



ISABELLA AVILA LEMOS

**DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE IMEDIATA
E LATENTE DE CAFÉ SECADO COM BAIXAS
UMIDADES RELATIVAS DO AR**

LAVRAS- MG

2018

ISABELLA AVILA LEMOS

**DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE IMEDIATA E LATENTE DE
CAFÉ SECADO COM BAIXAS UMIDADES RELATIVAS DO AR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade

Orientador

Prof. Dr. Flávio Meira Borém

Coorientador

LAVRAS-MG

2018

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Lemos, Isabella Avila.

Determinação da qualidade imediata e latente de café secado
com baixas umidades relativas do ar / Isabella Avila Lemos. –
2018.

94 p. : il.

Orientador: Ednilton Tavares de Andrade.

Coorientador: Flávio Meira Borém.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Armazenamento. 2. Modelagem matemática. 3. *Coffea
arabica* L.. I. Andrade, Ednilton Tavares de. II. Borém, Flávio
Meira. III. Título.

ISABELLA AVILA LEMOS

**DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE IMEDIATA E LATENTE DE
CAFÉ SECADO COM BAIXAS UMIDADES RELATIVAS DO AR**

**DETERMINATION OF IMMEDIATE AND LATENT QUALITY OF
DRIED COFFEE WITH LOW RELATIVE AIR HUMIDITY**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 09 de março de 2018.

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa UFLA

Dr. Diego Egídio Ribeiro Syngenta

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade
Orientador

Prof. Dr. Flávio Meira Borém
Coorientador

LAVRAS-MG

2018

AGRADECIMENTOS

A Deus, que iluminou o meu caminho durante esta caminhada, por me ajudar a alcançar grandes desejos e superar desafios.

Aos meus pais, José Gabriel e Vera, por todo amor e dedicação durante esses anos. Por me ensinarem a sempre continuar e conseguir superar as dificuldades encontradas, com honestidade e sinceridade. Ao meu irmão, Álvaro, por todo carinho e apoio.

Ao meu orientador, professor Dr. Ednilton Tavares de Andrade por ter aceitado me orientar e pela sua dedicação e orientação no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Dr. Flávio Meira Borém por ter me dado a oportunidade de entrar no mundo dos cafés especiais e me ensinar a grandeza desse universo.

Ao programa de pós graduação da Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar meu mestrado.

A FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos.

À UFLA por disponibilizar todo o espaço físico e institucional que propiciou a realização do projeto.

Aos demais membros da banca, Dr. Diego e Prof. Dr. Jefferson, pelo conhecimento, experiência e colaboração.

A Dra. Maria Helena e seu marido, por toda atenção e carinho ao nos fornecer os cafés.

Aos meus amigos do LPPA por terem ajudado durante todo o trabalho, pelas noites viradas, sem vocês nada disso seria possível, em especial à Camilinha, que me ajudou em todas as etapas, sem você eu não teria conseguido realizar este trabalho.

A Dra. Ana Paula pela disponibilidade em me ajudar sempre. Você faz toda diferença no laboratório.

Aos colegas do Núcleo de Estudos em Pós-Colheita do Café – Pós-Café, por todo conhecimento transmitido, pela ajuda em aprender a lidar com diversas situações, por me ensinar a ter espírito de liderança e comprometimento na realização de atividades.

Aos amigos de Lavras sempre presentes, por todo companheirismo, amizade, carinho, incentivo e ajuda. Por tornarem esse caminho mais fácil e os dias mais felizes.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo estudar os efeitos imediatos e latentes na qualidade de frutos de café secados em baixa umidade relativa do ar, bem como avaliar a cinética de secagem dos frutos de café e determinar as isotermas de sorção. Para a condução do experimento, foram utilizados frutos de café (*Coffea arabica* L.). Os frutos colhidos foram separados em dois estádios de maturação, imaturo e maduro. Para o estádio maduro a amostra foi dividida em três partes: a primeira foi levada diretamente para os secadores, constituindo, assim, a porção de café “natural” (processamento via seca), a segunda foi descascada e a terceira beneficiada, secando apenas o grão. O café imaturo foi levado diretamente para os secadores. A secagem foi realizada em um secador de camada fixa (SCAL) com um sistema composto de condicionamento de ar acoplado, com fluxo de ar de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, temperatura do ar de 40°C e umidades relativas de 10%; 17,5%; 25% e 32,5%. Depois da secagem a curva de secagem, as propriedades físicas e fisiológicas e higroscopicidade do café foram determinadas. O café foi armazenado em embalagens permeáveis durante seis meses, foram realizadas análises de condutividade elétrica, lixiviação de potássio e cor a cada dois meses. O experimento foi montado num esquema fatorial $4 \times 4 \times 4$ (4 umidades relativas do ar de secagem, 4 tipos de café [1-natural maduro, 2-natural verde, 3-descascado e 4- café beneficiado úmido] e 4 tempos de armazenamento), em DIC com 4 repetições. Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 7.0® (Statsoft, Tulsa, USA), para os demais resultados, foi utilizado o programa estatístico Sisvar 5.6, e nele, os resultados foram analisados por meio de análise de variância. Não houve danos imediatos na qualidade física e fisiológica dos cafés natural maduro, natural verde, descascado e beneficiado úmido. O dano latente foi percebido após 60 dias de armazenamento para os cafés natural maduro e descascado e, após 120 dias, para os cafés natural verde e beneficiado úmido. O modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou para representar a cinética de secagem para o café natural verde, para todas as UR. Para o teor de água de equilíbrio, os melhores ajustes aos dados experimentais foram obtidos pelo modelo de Copace, para o café natural verde.

Palavras-chave: Armazenamento. Modelagem matemática. *Coffea arabica* L..

ABSTRACT

The objective of this work was to study the immediate and latent effects on the quality of dried coffee fruits in low relative humidity and to evaluate the drying kinetics and sorption isotherms of the coffee fruits. Coffee fruits (*Coffea arabica* L.) were harvested and separated into two stages of maturation: immature and mature. For the mature stage, the sample was divided into three parts: the first one was taken directly from the dryers, thus constituting the "natural" portion of coffee (dry processing), the second was peeled and the third benefited, drying only the grain. The immature coffee was taken from the dryers. Drying was performed in a fixed layer dryer (SCAL) with a composite air-conditioning coupled system, with airflow of $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, air temperature of $40 \text{ }^\circ\text{C}$ and relative humidity of 10%; 17.5%; 25% and 32.5%. The drying curve, the physical and physiological properties and hygroscopicity of the coffee were determined. The samples were stored in permeable packs for six months, conducting analyzes of electrical conductivity, potassium leaching and color every two months. The experiment was set up in a $4 \times 4 \times 4$ factorial scheme (4 relative humidity of drying air, 4 types of mature [1-natural, 2-natural green, 3-peeled and 4-wetted coffee] and 4 storage times) in DIC with 4 replicates. For the adjustment of the mathematical models, non-linear regression analyzes were performed by the Gauss-Newton method, using the software STATISTICA 7.0® (Statsoft, Tulsa, USA). For the other results the statistical program Sisvar 5.6 was used for the analysis of variance. There was no immediate damage in the physical and physiological quality of the natural mature, natural green, peeled and wetted coffee. The latent damage was perceived after 60 days of storage for the natural ripe and peeled coffees and after 120 days for the natural coffees green and benefited wet. The Midilli model was the one that had the best fit to represent the drying kinetics for the natural green coffee, for all UR. For the equilibrium water content, the best adjustments to the experimental data were obtained by the Copace model for the natural green coffee.

Keywords: Storage. Mathematical modeling. *Coffea arabica* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de secagem que foi utilizado para a secagem mecânica do café.....	32
Figura 2 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café natural verde nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, em função do tempo.....	48
Figura 3 - Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do café natural verde, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.....	51
Figura 4 - Temperatura ambiente do local de armazenamento, localizado na Universidade Federal de Lavras- UFLA, durante 180 dias de armazenamento do café.....	53
Figura 5 - Valores médios de teor de água de equilíbrio calculados e experimentais (observados) do café natural maduro, durante cento e oitenta dias de armazenamento.....	55
Figura 6 - Valores médios de teor de água de equilíbrio calculados e experimentais (observados) do café natural verde, durante cento e oitenta dias de armazenamento.....	57
Figura 7 - Valores médios de teor de água de equilíbrio calculados e experimentais (observados) do café descascado, durante cento e oitenta dias de armazenamento.....	58
Figura 8 - Valores médios de teor de água de equilíbrio calculados e experimentais (observados) do café beneficiado úmido, durante cento e oitenta dias de armazenamento.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem.	35
Tabela 2 - Umidade relativa de equilíbrio (%) de soluções salinas saturadas.	36
Tabela 3 - Modelos matemáticos usados para a representação do equilíbrio higroscópico.	37
Tabela 4 - Teores de água e tempos de secagem em função do processamento e umidade relativa do ar de secagem.	43
Tabela 5 - Valores de coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), obtidos para os modelos analisados para descrever a cinética de secagem do café natural verde para diferentes umidades relativas.	46
Tabela 6 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café natural, para as quatro umidades relativas estudadas.	47
Tabela 7 - Teor de água final (T_f), base seca, do café natural verde, após atingir o equilíbrio higroscópico com o ambiente.	49
Tabela 8 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados na modelagem das isotermas de sorção do café natural verde.	50
Tabela 9 - Valores médios dos teores de água de equilíbrio higroscópico (T_e) (decimal, base seca) do café natural maduro em função da temperatura ($^{\circ}C$) e da umidade relativa do ar (decimal), durante 180 dias de armazenamento.	54

Tabela 10 - Valores médios dos teores de água de equilíbrio higroscópico (Te) (decimal, base seca) do café natural verde em função da temperatura (°C) e da umidade relativa do ar (decimal), durante 180 dias de armazenamento.	56
Tabela 11 - Valores médios dos teores de água de equilíbrio higroscópico (Te) (decimal, base seca) do café descascado em função da temperatura (°C) e da umidade relativa do ar (decimal), durante 180 dias de armazenamento.	58
Tabela 12 - Valores médios dos teores de água de equilíbrio higroscópico (Te) (decimal, base seca) do café beneficiado úmido em função da temperatura (°C) e da umidade relativa do ar (decimal), durante 180 dias de armazenamento.	59
Tabela 13 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural maduro submetido à secagem com diferentes umidades relativas.	62
Tabela 14 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) para o café natural maduro armazenado durante cento e oitenta dias.	62
Tabela 15 - Valores médios de lixiviação de potássio (LK) do café natural verde para a interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.	63
Tabela 16 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café descascado para interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.....	65

Tabela 17 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café descascado para interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.....	66
Tabela 18 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) para o café beneficiado úmido armazenado durante cento e oitenta dias.	67
Tabela 19 - Resultados médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) avaliado para o café natural em duas diferentes maturações.	68
Tabela 20 - Resultados médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) avaliado para as formas de preparo natural, descascado e beneficiado úmido.	69
Tabela 21 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada b^* , para grãos beneficiados do café natural maduro, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.....	70
Tabela 22 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada a^* , para grãos beneficiados do café natural maduro, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.....	71
Tabela 23 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L^* , para grãos beneficiados do café natural maduro, para a interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.....	72

Tabela 24 - Valores médios dos dados obtidos das coordenadas L^* e b^* , para grãos beneficiados do café natural verde, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.....	73
Tabela 25 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L^* , para grãos beneficiados do café natural verde, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.....	73
Tabela 26 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L^* , para grãos beneficiados do café descascado, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.....	74
Tabela 27 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L^* , para grãos beneficiados do café descascado, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.....	75
Tabela 28 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L^* , para o café beneficiado úmido, para a interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.....	76
Tabela 29 - Porcentagem de grãos preto-verdes, obtida após a secagem do café natural verde.	77

APÊNDICE A

Tabela 30 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos nos testes padrão de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café natural maduro, submetido a diferentes condições de secagem e armazenado por 180 dias.....	91
--	----

Tabela 31 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos nos testes padrão de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café natural verde, submetido a diferentes condições de secagem e armazenado por 180 dias.....	91
Tabela 32 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos nos testes padrão de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café descascado, submetido a diferentes condições de secagem e armazenado por 180 dias.....	92
Tabela 33 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos nos testes padrão de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café beneficiado úmido, submetido a diferentes condições de secagem e armazenado por 180 dias.....	92
Tabela 34 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos das coordenadas L, a e b, para grãos beneficiados do café natural maduro, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por 180 dias.	93
Tabela 35 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos das coordenadas L e b, para grãos beneficiados do café natural verde, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por 180 dias.	93
Tabela 36 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos das coordenadas L, a e b, para grãos beneficiados do café descascado, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por 180 dias.	94
Tabela 37 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos das coordenadas L,a e b, para o café beneficiado úmido, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por 180 dias.	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Colheita e processamento	19
2.2	Secagem de café	20
2.3	Modelagem matemática e simulação da secagem do café	22
2.4	Armazenamento do café	23
2.5	Teor de água no armazenamento e isotermas de sorção	24
2.6	Aspectos relacionados à qualidade do café	26
2.6.1	Avaliação física do café beneficiado	27
2.6.2	Aspectos relacionados à integridade da membrana	28
3	METODOLOGIA DE TRABALHO	31
3.1	Colheita e processamento do café	31
3.2	Sistema de secagem	31
3.3	Teor de água	33
3.4	Razão de umidade	34
3.5	Higroscopicidade	35
3.6	Caracterização da qualidade do café	39
3.6.1	Evolução da Cor do café	39
3.6.2	Condutividade elétrica	40
3.6.3	Lixiviação de potássio	40
3.6.4	Porcentagem de grãos preto-verde	41
3.7	Armazenamento	41
3.8	Delineamento experimental e análises estatísticas	42
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	43
4.1	Cinética de secagem do café natural maduro e verde, descascado e beneficiado úmido	43
4.2	Isotermas de sorção do café natural verde	49
4.3	Monitoramento da Temperatura e Umidade Relativa	52
4.4	Teores de água de equilíbrio do café natural maduro e verde, descascado e beneficiado úmido	54
4.4.1	Teores de água de equilíbrio do café natural maduro	54
4.4.2	Teores de água de equilíbrio do café natural verde	55
4.4.3	Teores de água de equilíbrio do café descascado	57
4.4.4	Teores de água de equilíbrio do café beneficiado úmido	59
4.4.5	Discussão geral	60
4.5	Caracterização da qualidade do café	61
4.5.1	Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café natural maduro	61

4.5.2	Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café natural verde.....	63
4.5.3	Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café descascado.....	64
4.5.4	Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café beneficiado úmido	67
4.5.5	Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café natural maduro e verde, descascado e beneficiado úmido.....	68
4.6	Evolução da cor do café.....	69
4.6.1	Evolução da cor do café natural maduro.....	70
4.6.2	Evolução da cor do café natural verde.....	72
4.6.3	Evolução da cor do café descascado	74
4.6.4	Evolução da cor do café beneficiado úmido.....	75
4.6.5	Discussão geral	76
4.7	Porcentagem de grãos preto-verde.....	77
5	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS.....	81
	APÊNDICE A - TABELAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

O café representa importante fonte de renda para a economia brasileira, é o segundo produto na pauta das exportações agrícolas do país. O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, com estimativa de produção, da safra de 2017 de 45,56 milhões de sacas do produto beneficiado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2017).

O café recém-colhido difere dos demais grãos cultivados em larga escala por apresentar certas peculiaridades, tais como alto teor de água, aproximadamente 60% (bu) e desuniformidade com relação à maturação. Assim, a secagem é uma etapa de fundamental importância na fase pós-colheita do café e deve ser iniciada logo após a colheita para reduzir, rapidamente, o alto teor de água dos frutos e evitar as fermentações que podem prejudicar a qualidade do café (RESENDE et al., 2009).

Todos os produtos agrícolas têm a capacidade de ceder ou absorver água do ambiente, convergindo, constantemente, para uma relação de equilíbrio entre o seu teor de água e as condições do ar ambiente. Torna-se necessário o conhecimento das relações entre a temperatura e a umidade relativa do ar e as condições desejáveis de conservação do produto para as operações de secagem e armazenagem de produtos (GONELLI et al., 2009).

Para a secagem do café, a tecnologia disponível atualmente permite o aumento da taxa de secagem pelo aumento da temperatura, do fluxo ou a diminuição da umidade relativa do ar de secagem. O desenvolvimento de tecnologias ou metodologias de secagem que proporcionem rápida desidratação sem o uso de temperaturas elevadas de secagem é uma alternativa altamente promissora, principalmente, quanto à redução do tempo de secagem. Uma secagem com ar ultrasseco e temperaturas moderadas propiciará a desidratação

rápida dos frutos sem causar danos térmicos e prejudicar a qualidade (ISQUIERDO et al., 2011).

A maior parte da produção de café passa por um período de estocagem até ser comercializada, assim, as condições de armazenamento irão alterar suas características físicas, químicas e sensoriais (OLIVEIRA et al., 2015), o que pode pronunciar os efeitos de danificação da secagem de forma latente, e fazer com que o café perca qualidade.

Com o conhecimento sobre a secagem em baixa umidade relativa do ar e a relação com os danos latentes de secagem, podem-se delinear novas estratégias de secagem visando à redução do tempo e um menor dano fisiológico durante o armazenamento.

Considerando-se as poucas informações sobre o efeito da secagem com baixa umidade relativa no armazenamento de café e sobre as alterações na qualidade física e fisiológica do produto durante o armazenamento, este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos imediatos e latentes na qualidade de frutos de café secados em baixa umidade relativa do ar, bem como avaliar a cinética de secagem dos frutos de café e determinar as isotermas de sorção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Colheita e processamento

No Brasil, o método predominante de colheita é o de derriça completa onde os frutos são derriçados do cafeeiro sobre pano colocado no chão ou diretamente no chão, obtendo-se um produto bastante heterogêneo, constituído de frutos maduros (cereja), imaturos (verdes) e sobre maduros (passa e seco), além de outros materiais e impurezas, como folhas, ramos, paus, terra, pedras, etc. Outro tipo de colheita realizada no Brasil é a seletiva, onde só os frutos maduros são colhidos (BORÉM, 2014).

Após a colheita, o café poderá passar pelo processo de abanação e peneiramento, manual ou mecânico, que tem a finalidade de retirar as impurezas menos densas (folhas, gravetos e outras impurezas), maiores e menores que os frutos. Em seguida, independentemente do método de processamento adotado, é recomendado que o café seja submetido à separação hidráulica em lavadores, que tem o objetivo de separar os frutos conforme seu estágio de maturação. Os frutos mais densos (maduros e verdes) afundam e a porção menos densa (sobremaduros, brocados, chochos, etc) boiam (BORÉM, 2014).

Os métodos de processamento de café utilizados são os por via seca ou via úmida. No processamento via seca, os frutos são secados na sua forma integral, originando o café em coco ou natural. O processamento via úmida pode ser realizado de diferentes formas: por meio da remoção da casca e de parte da mucilagem, pelo método mecânico, obtém-se o café descascado; removendo-se, mecanicamente, a casca e a mucilagem, por fermentação biológica, tem-se o café despulpado; e removendo mecanicamente a casca e a mucilagem, obtém-se o café desmucilado (BORÉM, 2014; MALTA, 2011).

A etapa de processamento do café tem por finalidade promover a separação dos frutos em lotes mais homogêneos. Tal separação pode ser feita pelo estádio de maturação, teor de água, tamanho e densidade, dentre outros, o que facilita as operações posteriores, principalmente a secagem, evitando-se possíveis comprometimentos na qualidade da bebida (BORÉM, 2014).

De acordo com Oliveira et al. (2015), o tipo de processamento é importante para determinar as características físicas e químicas do café cru, bem como suas características sensoriais. Estudos sinalizam que a composição química dos grãos de café é dependente da forma de processamento utilizada (BYTOF et al., 2005; KNOPP; BYTOF; SELMAR, 2006).

2.2 Secagem de café

Entre as várias etapas da pós-colheita do café, a secagem é a etapa de maior relevância, tanto do ponto de vista do consumo de energia e formação dos custos de processamento, como do ponto de vista da manutenção da qualidade do café (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008).

Quando colhidos, os frutos de café têm um elevado teor de água quando comparado a outros grãos agrícolas (BOTELHO et al., 2016). Portanto, para ser armazenado deve-se reduzir a atividade de água até níveis seguros para que o produto possa ser armazenado sem riscos de deterioração (GAZOR; MOHSENIMANESH, 2010; PEREA-FLORES et al., 2012). Ao longo da secagem, a redução do teor de água ocorre por uma diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície do produto a ser seco e o ar que o envolve. Para que ocorra secagem é necessário que a pressão parcial de vapor d'água em sua superfície seja maior do que no ar de secagem (PABIS; JAYAS; CENKOWSK, 1998).

A preservação da qualidade dos grãos pela secagem baseia-se no fundamento de que com a redução da quantidade de água disponível há uma redução da atividade de água e, conseqüentemente, da velocidade das reações químicas, bioquímicas e do desenvolvimento de microrganismos, contribuindo para um armazenamento seguro por períodos maiores (ARAÚJO et al., 2014). Os cafés obtidos por via seca são mais sensíveis à secagem em alta temperatura do que cafés processados pela via úmida, resultando em um menor desempenho fisiológico (ALVES et al., 2017).

A taxa de secagem, que indica a perda de água do produto por unidade de tempo, é influenciada por vários fatores, tais como método de secagem, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, teor de água inicial do produto e tempo de exposição do café a temperatura de secagem, entre outros. A falta de controle desses pode comprometer a qualidade final do produto (ALVES et al., 2017; COELHO et al., 2015).

Uma alternativa para aumentar a taxa de secagem sem causar danos térmicos aos grãos é a redução da umidade relativa do ar de secagem por outros meios, tais como a circulação do ar por meio de um material dessecante, que adsorve e remove a umidade do ar de secagem ou pela redução da temperatura de ponto de orvalho do ar (ISQUIERDO et al., 2013; ONDIER; SIEBENMORGEN; MAUROMOUSTAKOS, 2010).

Isquierdo et al. (2013) estudaram a taxa de secagem de água de grãos de café com teor de água inicial entre 0,471 e 0,513 (bs) submetidos à secagem com altas temperaturas (35, 40 e 45 °C) e temperaturas de ponto de orvalho de 2,6, 10,8 e 16,2. O autor observou que, para uma mesma temperatura de bulbo seco, a redução da temperatura de ponto de orvalho e da umidade relativa aumenta a taxa de secagem e reduz o tempo de secagem dos frutos de café.

2.3 Modelagem matemática e simulação da secagem do café

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (CORRÊA et al., 2011; RESENDE et al., 2009).

Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas finas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (BERBERT et al., 1995; GINER; MASCHERONI, 2002). O processo de secagem de produtos agrícolas, em camada fina, tem por finalidade a determinação das taxas de secagem do produto utilizando-se para a coleta de dados o registro das perdas de massa ocorridas em uma amostra durante a remoção de água (MONTE et al., 2008). Assim, as curvas de secagem, em camada fina, variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores.

As relações semiempíricas e empíricas têm-se mostrado como as melhores opções para prever a secagem de grãos e sementes, apesar de sua validade estar restrita às condições externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (BROOKER; BAKER-ARKEMA; HALL, 1992). Nesse sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados, dentre eles os modelos de Midilli, de Page, de Thompson, de Verma, de Henderson e Pabis, de Henderson e Pabis modificado, de dois termos, de exponencial de dois termos, de Newton, de Wang e Sing e de Valcam (AKPINAR, 2006; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA et al., 2010a; CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2006; GONELLI et al., 2009; ISQUIERDO et al., 2013; KASHANINEJAD et al., 2007; MOHAPATRA; RAO, 2005; RESENDE et al.,

2009; RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010; SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012).

Esses modelos, entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorra somente no período de taxa decrescente. As equações semiempíricas têm como base a lei de resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção, presumindo-se que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de água seja restrita à superfície do produto.

Na literatura, são descritos inúmeros trabalhos com o objetivo de identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem como: feijão (CORRÊA et al., 2007), pimenta (REIS et al., 2011), tomate (DOYMAZ, 2007), trigo parboilizado (MOHAPATRA; RAO, 2005), sementes de crambe (FARIA et al., 2012) e café (CORRÊA et al., 2010b; RESENDE et al., 2009), dentre outros.

2.4 Armazenamento do café

O armazenamento de grãos tem a finalidade de preservar a qualidade do produto estocado por um período que se estende da colheita até a comercialização, permitindo, assim, a adequada distribuição e o abastecimento de diferentes mercados consumidores (BORÉM, 2014).

As interações entre fatores abióticos, como temperatura, teor de água, concentração de gases, umidade relativa do ar, tipo e condições do armazém, características do sistema de armazenagem e fatores bióticos, como grãos, insetos, ácaros, fungos e bactérias, fazem com que os grãos armazenados se tornem um ecossistema cuja dinâmica, dependendo dos níveis dos fatores e do grau de interações, pode levar ao processo de sua deterioração, com maior ou

menor velocidade (RIGUEIRA et al., 2009). Grãos que sofreram maiores danos térmicos ou mecânicos durante as etapas de processamento e secagem sofrerão alterações fisiológicas mais intensas (AFONSO JUNIOR et al., 2006).

As perdas causadas durante o armazenamento de grãos podem ser quantitativas que é a redução de peso ou de volume e qualitativas que se caracteriza pelas alterações na qualidade do produto, em razão da diminuição do valor nutricional, devido à presença de contaminantes nas fases de pré e pós-colheita (BACALTCHUK; LORINI, 2008).

Alterações na qualidade da bebida do café são evidenciadas durante o armazenamento, devido à degradação de compostos químicos e à geração de substâncias que conferem características indesejáveis ao paladar, afetando negativamente alguns atributos sensoriais, como acidez, sabor, doçura e corpo. Tais mudanças são mais acentuadas nos grãos acondicionados em sacos de juta, intensificando-se com o período de armazenamento e com o aumento da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente (RIBEIRO, 2013).

O método de armazenamento é classificado de acordo com a forma de acondicionamento e manuseio do produto: no armazenamento convencional, o café é armazenado em sacos de juta e, no armazenamento a granel, ele é estocado e manuseado sem sacaria (BORÉM, 2014). A maior parte do café brasileiro é armazenada no sistema convencional, ou seja, em sacos de juta, no qual o produto fica susceptível à perda de qualidade, devido à variação do teor de água dos grãos e à sua interação com o ar ambiente (BORÉM, 2014; RIBEIRO, F. et al., 2011).

2.5 Teor de água no armazenamento e isothermas de sorção

O teor de água tem importante influência na qualidade dos grãos armazenados, é o recomendado para o armazenamento de grãos de café entre

10,8 e 11,2% (b.u.). Quando esses grãos são armazenados com um teor de água acima do recomendado, apresentam uma maior atividade respiratória o que causará um autoconsumo dos compostos orgânicos, afetando as características organolépticas do produto e reduzindo a qualidade (BORÉM, 2014; VENTURI et al., 2007).

Em contrapartida, quando os grãos são armazenados com um teor de água abaixo do recomendado, esses terão menor atividade de água o que diminuirá o risco de deterioração. Essa prática impactará diretamente na renda do produtor, aumentando o gasto com mão de obra e energia, além de ocasionar uma redução na massa total de café. Como a quantidade de café a ser vendida é mensurada por sua massa, haverá perda na quantidade e uma consequente diminuição da renda do produtor. Além disso, os grãos muito secos ficam mais susceptíveis a danos mecânicos imediatos quando manuseados. Essa situação pode aumentar a porcentagem de grãos quebrados, que são separados nas máquinas de rebenefício e possuem menor preço no mercado.

Por serem produtos higroscópicos, o conteúdo de água dos grãos pode variar, em função do ambiente em que estão armazenados, tendendo, constantemente, a manter uma relação de equilíbrio entre o seu teor de água e o ar (PITTIA; NICOLI; SACCHETTI, 2007). Temperatura e umidade relativa do ambiente são variáveis climáticas que exercem grande influência sobre essa característica (ABREU, 2015; NOBRE et al., 2007).

Durante o armazenamento, a estabilidade do material pode ser calculada pelo teor de água do produto quanto a variações de temperatura e umidade relativa do ar e expressa por meio de equações matemáticas denominadas isotermas de sorção ou curvas de equilíbrio higroscópico (POLACHINI et al., 2016).

A determinação das isotermas de sorção de água constitui fator essencial nos projetos e estudos de sistemas de secagem, manuseio, processamento,

armazenagem, embalagem e predição da vida-de-prateleira de produtos alimentícios (LIMA et al., 2008). O comportamento das isotermas de sorção é ainda necessário para se conhecer bem a sua relação com as características físicas, químicas e de estabilidade dos produtos desidratados ou parcialmente desidratados (HUBINGER et al., 2009).

Vários pesquisadores têm estudado o comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas, que descrevem modelos diferenciados para expressar o teor de água de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar. Entretanto, para o estabelecimento de isotermas que representam essa relação de equilíbrio são utilizados modelos matemáticos empíricos, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de prever com precisão o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar (ANDRADE et al., 2017; BRACHT et al., 2014; CHEN; WENG, 2010; PUMACAHUA-RAMOS et al., 2016).

2.6 Aspectos relacionados à qualidade do café

Existem várias análises cujos resultados podem servir como indicadores da qualidade do café. Essas análises fornecem informações sobre o estado físico e fisiológico do produto ajudando na compreensão dos fenômenos e/ou alterações que ocorrem nos grãos quando submetidos a diferentes processos na pós-colheita.

No caso do café, um produto agrícola precificado pela sua qualidade, é importante o conhecimento desses indicadores, pois eles possuem alta correlação com os aspectos sensoriais detectados na prova de xícara.

Vários estudos já foram realizados no sentido de correlacionar a manutenção da qualidade fisiológica com a qualidade sensorial da bebida

durante esse processo (ALVES et al., 2017; BORÉM et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015).

2.6.1 Avaliação física do café beneficiado

Os atuais procedimentos para avaliação comercial da qualidade do café estão baseados em características subjetivas, pois dependem de sensações e habilidades pessoais dos provadores, adquiridas com muitos anos de experiência. Apesar da análise sensorial ser a metodologia adotada pela Associação de Cafés Especiais (SCA), esta, por ser subjetiva, é sujeita a críticas (OLIVEIRA et al., 2015). Assim, a complementação dos procedimentos como uso de métodos que caracterizam a qualidade física e fisiológica do café tornaria mais real e objetiva a sua determinação.

A cor dos grãos crus de café pode estar relacionada com a qualidade da bebida e é um fator importante para a valorização do produto. Alterações na cor são fortes indícios da ocorrência de processos oxidativos e transformações bioquímicas enzimáticas que alteram a composição dos precursores responsáveis pelo sabor e aroma da bebida, resultando em redução da qualidade (ABREU et al., 2015; BORÉM et al., 2013; ISQUIERDO et al., 2011; RENDÓN; SALVA; BRAGAGNOLO, 2014; RIBEIRO, B. et al., 2011).

Durante o armazenamento, alterações na cor dos grãos podem ocorrer mesmo em condições adequadas (SELMAR; BYTOF; KNOPP, 2007; SPEER; KÖLLING-SPEER, 2006), ou seja, a tonalidade verde-azulada passa à marrom-clara e esbranquiçada, fenômeno este conhecido como branqueamento. Fatores como danos sofridos pelo produto, luz, umidade relativa, teor de água, tempo de armazenagem e tipo de embalagem exercem influência nas alterações na cor dos grãos (BORÉM et al., 2013; CORADI; BORÉM, 2009).

O grão de café armazenado em coco ou pergaminho tem uma maior proteção e pode prevenir variações na cor do produto, quando comparado com o café armazenado já beneficiado (SELMAR; BYTOF; KNOPP, 2007). Assim, grãos de café beneficiados são mais susceptíveis ao branqueamento durante o armazenamento. Principalmente se estiverem armazenados em condição ambiente e durante um longo período.

2.6.2 Aspectos relacionados à integridade da membrana

A integridade das membranas presentes no endosperma dos grãos de café possui relação com a qualidade, visto que grãos com sistema de membrana organizado e funcional apresentam qualidade superior (MALTA et al., 2013; SAATH et al., 2012).

Um dos primeiros eventos que caracterizam a deterioração dos grãos é a degeneração das membranas celulares, conseqüentemente ocorrendo perda do controle da permeabilidade. Para Oliveira et al. (2015), grãos com membranas mal estruturadas, desorganizadas e danificadas, lixiviam maior quantidade de solutos provocando alterações que modificam a composição química original do grão de café cru e em consequência as características sensoriais da bebida. Essas alterações na membrana podem ocorrer durante o período de armazenamento do café.

Dessa forma, foram desenvolvidos testes indiretos para avaliar a qualidade dos grãos baseados na perda de integridade das membranas, como o teste de condutividade elétrica e lixiviação de potássio.

Os solutos, com propriedades eletrolíticas possuem cargas elétricas que podem ser medidas com condutivímetro. Assim, grãos de baixo vigor liberam grande quantidade de eletrólitos na solução, resultando em alto valor de condutividade elétrica (MALTA; PEREIRA; CHAGAS, 2005; SAATH et al.,

2012) ou em elevadas concentrações de determinados íons, principalmente potássio, medido no espectrofotômetro de chama (MARCOS FILHO et al., 1990; PRETE, 1992).

O aumento observado, nos valores de lixiviação e condutividade elétrica, indica desorganização das membranas celulares, que é acompanhada por uma perda de controle da permeabilidade e pelo extravasamento de solutos, promovendo reações oxidativas ou catalíticas, resultando em compostos indesejáveis e prejudiciais à qualidade sensorial do café (ANDRADE, 2017).

Diante da importância que o sistema de membrana íntegro representa, na qualidade do café, é de interesse acompanhar essa característica, nos grãos crus de café armazenado, a fim de detectar possíveis alterações causadas durante o armazenamento.

3 METODOLOGIA DE TRABALHO

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas, no Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

3.1 Colheita e processamento do café

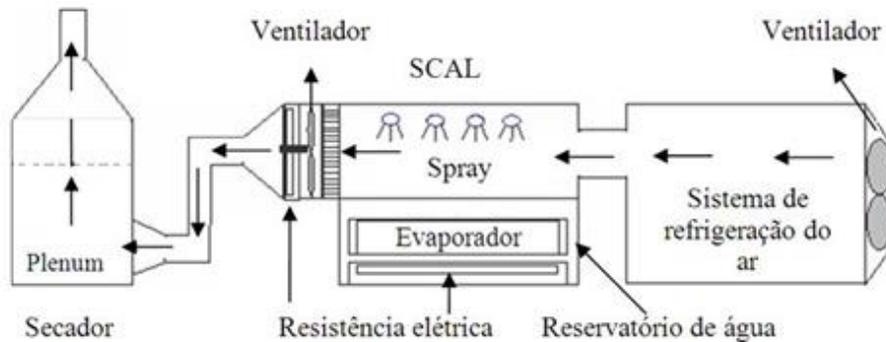
Para a condução do experimento, foram utilizados frutos de café (*Coffea arabica* L.) cv. Catuaí Vermelho IAC 99 colhidos manualmente em uma lavoura comercial da propriedade Três Porteiras localizada no município de Ingaí, Minas Gerais, Brasil. Depois da colheita, os frutos foram separados, em água, por diferença de densidade, removendo-se os de menor massa específica (secos, chochos, brocados e mal granados). Em seguida, foi feita uma separação manual dos frutos de acordo com seu estágio de maturação, e foram classificados em dois estágios de maturação: verde e maduro. Para o estágio maduro, a amostra foi dividida em três partes: uma parte foi levada diretamente para os secadores, constituindo, assim, a porção de café “natural” (processamento via seca), a outra parte foi descascada constituindo, a porção café descascado (processado via úmida) e a outra foi beneficiada manualmente, e secados apenas os grãos. O estágio verde foi levado diretamente para o secador. Todos os procedimentos de colheita e processamento foram realizados segundo Borém (2014).

3.2 Sistema de secagem

Para a condução da secagem, foi utilizado um secador de camada fixa com um sistema de condicionamento de ar acoplado (Figura 1), foi adotada a

temperatura do ar de secagem de 40 °C (para não provocar danos térmicos ao produto). As características do ar foram controladas por um sistema de condicionamento de ar de laboratório (SCAL), modelo proposto por Fortes et al. (2006). Esse equipamento permite obter o controle do fluxo ($20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), da temperatura (T) e da umidade relativa (UR) do ar de secagem com precisão. Foram avaliadas quatro umidades relativas: $10 \pm 2\%$; $17,5 \pm 2\%$; $25 \pm 2\%$ e $32,5 \pm 2\%$. Para se obter as menores temperaturas de ponto de orvalho e, conseqüentemente, a menor umidade relativa, antes do SCAL, o ar foi pré-condicionado por um sistema de refrigeração composto por três unidades de ar condicionado.

Figura 1- Sistema de secagem que foi utilizado para a secagem mecânica do café.



Fonte: Fortes et al. (2006).

Esse sistema fornece ar com temperatura de ponto de orvalho na faixa de 2 °C a 30 °C e temperatura de bulbo seco de 2 °C a 50 °C, com vazões de até $10 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$. O secador é composto por quatro bandejas removíveis com fundo perfurado, de seção quadrada, com lados iguais a 0,3 m e profundidade de 0,1 m, localizadas sobre um plenum para uniformização do fluxo de ar.

O fluxo de ar foi regulado por um inversor de frequência, marca Weg, modelo CFW-10, que controla a rotação do ventilador centrífugo que insufla o ar aquecido no plenum do secador e a velocidade do ar foi monitorada com o uso de um anemômetro de pás.

A temperatura de ponto de orvalho foi medida no interior da câmara do SCAL e a temperatura do ar de secagem foi medida no plenum, sob as bandejas de fundo perfurado, por termopares conectados a controladores universais marca Novus, modelo N1100. A umidade relativa do ar de secagem foi medida por termohigrômetro digital portátil modelo ITLOG 80, com sensor inserido no interior do plenum. A temperatura do ar de secagem, no entorno dos frutos de café foi medida com termômetros de mercúrio inseridos no centro da amostra.

3.3 Teor de água

O teor de água dos frutos de café, do café em pergaminho e do café beneficiado úmido, no início da secagem, foi determinado utilizando-se o método padrão de estufa, 105 ± 3 °C, durante 24 horas, de acordo com Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Já o teor de água do café seco beneficiado foi determinado pelo método padrão ISO 6673 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2003).

Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos frutos do café, o acompanhamento do teor de água dos cafés natural maduro e verde, descascado e beneficiado úmido durante o armazenamento foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa). O acompanhamento da secagem também foi realizado por esse método até atingir o teor de água desejado, utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,01 g, de acordo com a equação abaixo.

$$U_t = \frac{M_{ai} - (M_{ti} - M_{tt})}{M_{ms}} \quad (1)$$

Em que,

U_t : teor de água no tempo t (kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs));

M_{ai} : massa de água inicial (kg);

M_{ti} : massa total inicial (kg);

M_{tt} : massa total no tempo t (kg);

M_{ms} : massa de matéria seca (kg).

3.4 Razão de umidade

Na análise de dados da secagem, a razão de umidade (RU) é essencial para descrever diferentes modelos de secagem em camada fina. A razão de umidade durante a secagem, em função das variáveis avaliadas, foi determinada pela Equação 2. Para todas as condições testadas, os valores de razão de umidade em função do tempo de secagem foram ajustados aos modelos (Tabela 1) utilizados para descrever a cinética de secagem dos cafés.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (2)$$

Em que:

RU: razão de umidade (adimensional);

U: teor de água do produto no tempo t (decimal, (bs));

U_e : teor de água de equilíbrio do produto (decimal, (bs)); e

U_i : teor de água inicial do produto (decimal, (bs)).

Tabela 1 - Modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem.

Designação do modelo	Modelo	Equação
Dois termos ¹	$RU = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(3)
Exponencial de dois termos ²	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	(4)
Henderson & Pabis modificado ³	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(5)
Henderson & Pabis ⁴	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(6)
Midilli ⁵	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(7)
Newton ⁶	$RU = \exp(-k \cdot t)$	(8)
Page ⁷	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(9)
Thompson ⁸	$RU = \exp\{[-a - (-a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0.5}] \cdot (2 \cdot b)^{-1}\}$	(10)
Verma ⁹	$RU = -a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-k_1 \cdot t)$	(11)
Wang e Sing ¹⁰	$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	(12)
Valcam ¹¹	$RU = a + b \cdot t + c \cdot t^{1.5} + d \cdot t^2$	(13)

¹(HENDERSON, 1974); ²(SHARAF-ELDEE; BLAISDELL; HAMDY, 1980); ³(KARATHANOS, 1999); ⁴(HENDERSON; PABIS, 1961); ⁵(MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002); ⁶(LEWIS, 1921); ⁷(PAGE, 1949); ⁸(THOMPSON; PEARTT; FOSTER, 1968); ⁹(VERMA et al., 1985); ¹⁰(WANG; SING, 1978); ¹¹(SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2013).

Em que:

RU: razão de umidade;

t: tempo de secagem (h);

k, k₀ e k₁: constantes de secagem;

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

3.5 Higroscopicidade

Os testes de higroscopicidade foram realizados em câmara incubadora BOD e estufa, as amostras foram armazenadas de forma hermética em caixas plásticas gerbox transparente de 250 ml e com tela em aço inox com controle de temperatura e umidade relativa do ar. Para cada teste de equilíbrio higroscópico, as amostras foram colocadas em saches de tecido permeável (tipo voile), de

forma a garantir uma maior superfície de contato do material com o ambiente. As temperaturas dos experimentos foram obtidas a partir das regulagens da câmara e estufa, e a umidade relativa, a partir das soluções a serem utilizadas, as temperaturas que foram experimentadas eram de 20°C, 30°C, 55°C e 70°C, por aproximadamente 96 horas. As soluções utilizadas para o experimento e suas respectivas umidades relativas de equilíbrio em função da temperatura do ar ambiente estão dispostas na Tabela 2 (GREENSPAN, 1977).

Tabela 2 - Umidade relativa de equilíbrio (%) de soluções salinas saturadas.

Temperatura (°C)	Sais	UR (%)	
20	Cloreto de Magnésio	MgCl ₂	33,07±0,18
	Cloreto de lítio	LiCl	11,31±0,31
	Cloreto de Potássio	KCl	85,11±0,29
	Nitrato de Magnésio	Mg(NO ₃)	54,38±0,23
	Acetato de potássio	CH ₃ COOK	23,11±0,25
30	Cloreto de Magnésio	MgCl ₂	32,44 ± 0,14
	Cloreto de lítio	LiCl	11,28 ± 0,24
	Cloreto de Potássio	KCl	83,62 ± 0,25
	Nitrato de Magnésio	Mg(NO ₃)	51,40 ± 0,24
	Acetato de potássio	CH ₃ COOK	21,61 ± 0,53
55	Cloreto de lítio	LiCl	11,03 ± 0,23
	Cloreto de Potássio	KCl	80,70 ± 0,35
	Brometo de sódio	NaBr	50,15 ± 0,65
	Cloreto de Magnésio	MgCl ₂	29,93 ± 0,16
70	Cloreto de lítio	LiCl	10,75 ± 0,33
	Cloreto de Potássio	KCl	79,49 ± 0,57

Fonte: Greenspan (1977).

Para a verificação e quantificação do fenômeno de equilíbrio higroscópico, ainda em laboratório, as amostras foram pesadas antes e depois de serem, respectivamente, colocadas e retiradas da câmara BOD e estufa, após entrarem em equilíbrio térmico com o ambiente circundante em condições herméticas. As pesagens foram realizadas em balança analítica, SHIMADZU

modelo AY220, com 4 casas decimais. Dessa maneira, foram verificados os diversos teores de água de equilíbrio, para as várias combinações de temperatura e umidade relativa do ar. Para um melhor tratamento dos dados, foram utilizadas, para cada combinação de umidade relativa do ar e temperatura, 3 repetições para o café natural verde.

De acordo com Teixeira, Andrade e Silva (2012), os modelos matemáticos, obtidos na literatura e representativos da higroscopicidade de produtos agrícolas, utilizados para análise do produto, foram escolhidos, aleatoriamente, em função da avaliação da temperatura e umidade relativa do ar ambiente, para a verificação do que melhor se ajustasse à realidade empírica do produto, de maneira a melhor representar sua isoterma. Os modelos utilizados estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Modelos matemáticos usados para a representação do equilíbrio higroscópico.

Modelo	Equação	
ChungPfofost	$U_e = a - b \cdot \ln[-(T + c) \cdot \ln(UR)]$	(14)
Copace	$U_e = \exp[a - (b \cdot T) + (c \cdot UR)]$	(15)
GAB Modificado	$U_e = \frac{ab(c / T)UR}{\{[1 - b UR][1 - b UR + b(c / T)UR]\}}$	(16)
Halsey Modificado	$U_e = [\exp(a - bT) / - \ln(UR)]^{1/c}$	(17)
Henderson	$U_e = [\ln(1 - UR) / (- a \cdot T_{abs})]^{1/b}$	(18)
Henderson Modificado	$U_e = \{ \ln(1 - UR) / [- a \cdot (T + b)] \}^{1/c}$	(19)
Oswin	$U_e = (a - b \cdot T) / [(1 - UR) / UR]^{1/c}$	(20)
Sabbab	$U_e = a (UR^b / T^c)$	(21)
Sigma Copace	$U_e = \exp\{ a - (bT) + [c \exp(UR)] \}$	(22)

Fonte: Da autora (2018).

Onde, U_e : Teor de água do produto, b.s.; UR: Umidade relativa do ar, decimal; T: Temperatura do ar ambiente, °C; T_{abs} : Temperatura absoluta do ar ambiente, K; a, b, c: Parâmetros que dependem da natureza do produto.

O modelo que melhor se ajustou para representar a isoterma foi utilizado para representar o teor de água de equilíbrio do café durante o armazenamento em função das temperaturas e umidades relativas médias dos meses.

O teor de água de equilíbrio higroscópico para os cafés natural maduro e beneficiado úmido será calculado pela equação 23 (ARTEAGA, 1986), enquanto o do café descascado será calculado pelo modelo de Sabbab segundo Dias, 2017.

$$U_e = 1,1282[-\ln(1-UR)/T+40,2520]^{0,5405} \quad (23)$$

Em que:

U_e : teor de água de equilíbrio do produto (decimal, (bs));

T : temperatura do ambiente de armazenamento (°C);

UR : umidade relativa do ambiente de armazenamento (decimal).

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 7.0[®] (Statsoft, Tulsa, USA). A escolha do melhor modelo foi em função dos parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), coeficiente de determinação (R^2) e tendência de distribuição dos resíduos. O desvio padrão da estimativa e o erro médio relativo foram calculados, respectivamente, pelas equações 24 e 25.

$$SE = \sqrt{\sum(Y - \hat{Y})^2 / GLR} \quad (24)$$

$$P = \left[(100/n) \sum \left(\left| \frac{Y - \hat{Y}}{Y} \right| \right) \right] \quad (25)$$

Em que:

SE: desvio padrão da estimativa (decimal);

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo;

GLR: graus de liberdade do modelo (n° de parâmetros do modelo – 1);

P: erro médio relativo (%);

n: número de dados observados.

3.6 Caracterização da qualidade do café

As determinações das propriedades físicas e fisiológicas do café foram feitas após a secagem e a cada dois meses durante seis meses de armazenamento.

3.6.1 Evolução da Cor do café

A quantificação de cor foi realizada por meio de colorímetro Minolta CR-410, previamente calibrado em superfície branca de acordo com padrões pré-estabelecidos (BIBLE; SINGHA, 1997). As medições foram realizadas diretamente sobre os grãos, mantendo-se a integridade dos mesmos. Os cafés foram analisados após a secagem e a cada dois meses durante o armazenamento. Foram avaliados 3 (três) parâmetros de cor: L^* , a^* e b^* . O valor de a^* caracteriza coloração na região do vermelho ($+a^*$) ao verde ($-a^*$), o valor b^* indica coloração no intervalo do amarelo ($+b^*$) ao azul ($-b^*$). O valor L nos fornece a luminosidade, variando do branco ($L=100$) ao preto ($L=0$) (ESTÉVEZ; VENTANAS; CAVA, 2005).

3.6.2 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica dos grãos crus foi realizada após a secagem e durante seis meses, a cada dois meses. Foi determinada pela metodologia proposta por Krzyzanowski, França Neto e Henning (1991). Foram utilizadas duas repetições de 50 grãos de cada amostra, as quais foram pesadas com precisão de 0,001g e imersas em 75 mL de água destilada, no interior de copos plásticos de 200 mL de capacidade. Em seguida, esses recipientes foram levados à BOD com ventilação forçada regulada para 25 °C, por cinco horas, procedendo-se à leitura da condutividade elétrica da água de embebição em aparelho BEL W12D. Com as leituras obtidas foi calculada a condutividade elétrica pela Equação 26, expressando-se o resultado em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ de grãos.

$$CE = \frac{CE'}{\text{Massa (g)}} \quad (26)$$

Onde,

CE' = Leitura da condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)

3.6.3 Lixiviação de potássio

A lixiviação de íons de potássio foi realizada nos grãos crus, segundo metodologia proposta por Prete (1992). Os cafés foram analisados após a secagem e a cada dois meses durante o tempo de armazenamento. Após a leitura da condutividade elétrica, as soluções foram submetidas à determinação da quantidade de potássio lixiviado. A leitura foi realizada em fotômetro de chama Digimed NK-2002. Com os dados obtidos, foi calculada a quantidade de potássio lixiviada de acordo com a Equação 27, expressando-se o resultado em ppm.

$$LK = \frac{(LK' \times \text{Diluição} \times 1,56)}{\text{Massa(g)}} \quad (27)$$

Onde,

LK' = Leitura da lixiviação de potássio (ppm)

3.6.4 Porcentagem de grãos preto-verde

A porcentagem de grãos preto-verde foi realizada em grãos crus. Na amostra de café natural verde beneficiada manualmente foram contados cem grãos, separando os em verde e preto-verde, obtendo diretamente a porcentagem.

3.7 Armazenamento

As amostras foram embaladas em sacos de papel kraft pardo uni folhado, revestidos com sacos plásticos de polietileno transparentes e devidamente identificadas e armazenadas no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas (UFLA), em câmara fria com temperatura controlada a 10°C e umidade relativa de 60%, durante trinta dias para o início das análises.

Depois desse período as amostras foram retiradas dos sacos plásticos e ficaram armazenadas em sacos de papel Kraft, por seis meses em ambiente não controlado onde foram coletados os dados de temperatura e umidade relativa do ar, utilizando o termohigrômetro digital portátil da marca Instrutemp, modelo ITLOG 80.

3.8 Delineamento experimental e análises estatísticas

Em decorrência das combinações entre processamento e umidade relativa, foram obtidas as diferentes condições de secagem. Para cada tratamento, foram realizadas quatro repetições. O fluxo de ar adotado foi de $20\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ com temperatura do ar de 40°C e umidades relativas de $10 \pm 2\%$; $17,5 \pm 2\%$; $25 \pm 2\%$ e $32,5 \pm 2\%$. Foram armazenadas durante seis meses com avaliações fisiológicas a cada dois meses.

O experimento foi montado num esquema fatorial $4 \times 4 \times 4$ (4 umidades relativas do ar de secagem, 4 tipos de café [1–natural maduro, 2–natural verde, 3- descascado e 4-café beneficiado úmido] e 4 tempos de armazenamento) em um delineamento inteiramente casualizado. Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 7.0® (Statsoft, Tulsa, USA), para os demais resultados foi utilizado o programa estatístico Sisvar 5.6, onde os resultados foram analisados por meio de análise de variância.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 Cinética de secagem do café natural maduro e verde, descascado e beneficiado úmido

Foi desenvolvida a curva de secagem de acordo com a variação da razão de umidade em relação ao tempo de secagem, foi possível verificar a dinâmica do processo de secagem do café natural verde. As curvas de secagem para o café natural maduro, descascado e beneficiado úmido estão de acordo com os descritos por Dias (2017).

Na Tabela 4, são apresentados os teores de água inicial e final e os tempos de secagem em relação ao processamento do café e das umidades relativas do ar de secagem.

Tabela 4 - Teores de água e tempos de secagem em função do processamento e umidade relativa do ar de secagem.

(Continua)

Processamento	Umidade Relativa (%)	Teor de água (bs) (kg.kg ⁻¹)		Tempo de secagem (horas)
		Inicial	Final	
Natural maduro	10	2,196	0,123	105
	17,5	2,196	0,118	118,5
	25	2,196	0,127	120
	32,5	2,196	0,118	123,5
Natural Verde	10	2,334	0,101	81,3
	17,5	2,334	0,118	83,5
	25	2,334	0,146	83
	32,5	2,334	0,099	99,5
Descascado	10	1,413	0,097	50
	17,5	1,413	0,107	55
	25	1,413	0,104	60
	32,5	1,413	0,093	61,5

Tabela 4 - Teores de água e tempos de secagem em função do processamento e umidade relativa do ar de secagem.

(Conclusão)

Processamento	Umidade Relativa (%)	Teor de água (bs) (kg.kg ⁻¹)		Tempo de secagem (horas)
		Inicial	Final	
Café beneficiado úmido	10	1,069	0,107	15
	17,5	1,069	0,128	16,5
	32,5	1,069	0,106	23,5

Fonte: Da autora (2018).

Observa-se na Tabela 4 que, com a diminuição da umidade relativa do ar, há uma redução no tempo de secagem dos cafés natural maduro e verde, descascado e beneficiado úmido, de 15,0%, 18,3%, 19,0% e 36,2%, respectivamente. O processamento também influenciou diretamente o tempo de secagem, e os cafés natural maduro e verde apresentam um maior teor de água inicial e maior resistência à saída de água, gastando mais tempo para secar.

Na Tabela 5, encontram-se os parâmetros estatísticos coeficientes de determinação (R^2), erro relativo médio (P) e desvio padrão da estimativa (SE), utilizados para a comparação entre os doze modelos de secagem analisados, nas quatro condições de secagem utilizadas para o café natural verde.

Os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 98% (Tabela x), fato que, segundo Kashaninejad et al. (2007) e Madamba, Driscoll e Buckle (1996), indicam representação satisfatória desses modelos ao fenômeno de secagem estudado. Entretanto, a utilização do coeficiente de determinação como único critério de avaliação para a seleção dos modelos de secagem não constitui um bom parâmetro, é necessária a análise conjunta de outros parâmetros estatísticos (MOHAPATRA; RAO, 2005).

Nota-se que todos os modelos ajustados apresentam valores de coeficiente de determinação satisfatórios ($R^2 > 90\%$), erro relativo médio abaixo

de 10%, indicando que esses modelos são adequados para representação do fenômeno estudado, segundo Mohapatra e Rao (2005). Segundo Kashaninejad et al. (2007), os valores de erro médio relativo indicam desvio dos valores observados, em relação à curva estimada pelo modelo. Assim, conjuntamente a esse parâmetro estatístico, optou-se por adotar, como critério adicional, o modelo ter bom ajuste para todas as umidades relativas estudadas, durante a secagem.

Além dos valores do coeficiente de determinação e do erro médio relativo, também foram calculados os valores do desvio padrão da estimativa. De acordo com Draper e Smith (2014), a capacidade de um modelo para descrever, com fidelidade, um determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa. Dessa forma, quanto menor for o valor dessa variável, melhor será a qualidade de ajuste do modelo, em relação aos dados observados.

Assim, com base em todos os parâmetros estatísticos utilizados, o modelo escolhido para a representação do fenômeno de secagem do café natural verde para todas as umidades relativas estudadas foi o de Midilli. Apresentando para todas as umidades relativas estudadas coeficiente de determinação (R^2) superior a 99,9% e valores de desvio padrão da estimativa, menores que 0,05.

Esse modelo também foi usado por Coradi, Borém e Renato (2017) para descrever a secagem do café despoldado. Corrêa et al. (2010b) também recomendaram o modelo matemático de Midilli para descrever a cinética de secagem dos frutos de café por obter um ajuste satisfatório. Além de ser um modelo reconhecido internacionalmente é, matematicamente, mais prático, e apresenta menor número de parâmetros, tornando mais simples sua aplicação e uso, em simulações de secagem (KASHANINEJAD et al., 2007).

Tabela 5 - Valores de coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), obtidos para os modelos analisados para descrever a cinética de secagem do café natural verde para diferentes umidades relativas.

Modelos	UMIDADE RELATIVA											
	10%			17,5%			25%			32,5%		
	R^2	P	SE	R^2	P	SE	R^2	P	SE	R^2	P	SE
Dois termos	99,84	1,015	0,146	99,38	2,439	0,355	99,57	2,099	0,258	99,69	1,426	0,275
Henderson & Pabis modificado	99,84	1,015	0,113	99,38	2,441	0,275	99,57	2,080	0,198	99,69	1,443	0,215
Henderson & Pabis	99,84	1,015	0,253	99,38	2,438	0,614	99,57	2,078	0,443	99,69	1,426	0,476
Midilli	99,96	0,014	0,002	99,97	0,000	0,000	99,92	0,011	0,001	99,99	0,004	0,001
Newton	99,78	0,508	0,127	99,29	1,708	0,430	1,00	1,866	0,397	99,61	0,863	0,288
Page	99,94	0,510	0,127	99,79	1,798	0,453	1,00	1,659	0,353	99,92	0,848	0,283
Thompson	99,95	0,023	0,006	99,95	0,358	0,090	99,88	0,681	0,145	99,98	0,050	0,017
Verma	99,92	0,340	0,060	99,82	0,341	0,061	99,57	2,079	0,313	99,67	1,369	0,323
Wang & Sing	98,99	2,331	0,581	99,34	2,255	0,568	98,71	3,477	0,741	99,16	1,946	0,649
Valcam	99,91	0,000	0,000	99,93	0,000	0,000	99,91	0,000	0,000	99,94	0,000	0,000
Exponencial de dois termos	99,78	0,602	0,150	99,29	1,754	0,442	99,51	1,678	0,358	99,24	1,201	0,401
Aproximação da difusão	99,94	0,398	0,070	99,83	1,559	0,278	99,83	1,378	0,208	99,91	0,830	0,196

Fonte: Da autora (2018).

Na Tabela 6, são mostrados os coeficientes do modelo matemático escolhido, com base nos critérios de seleção estatísticos, na modelagem das curvas de secagem do café natural verde, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

Tabela 6 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café natural, para as quatro umidades relativas estudadas.

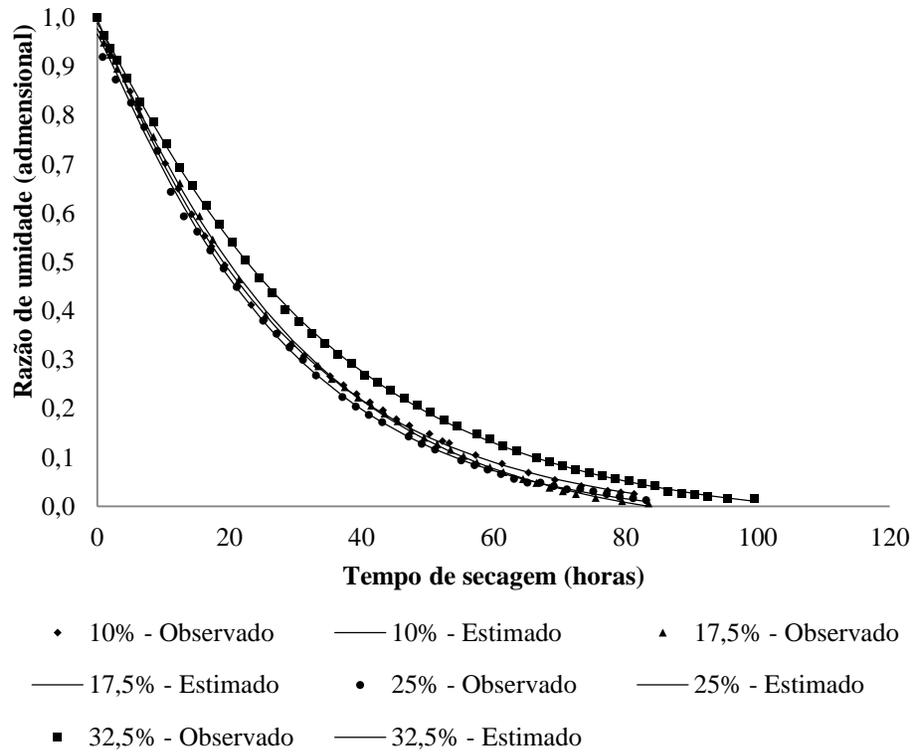
MODELOS	UR (%)	COEFICIENTES			
		a	k	n	b
Midilli	10	0,997120	0,031255	1,045390	-0,000232
	17,5	0,977648	0,023759	1,109212	-0,000467
	25	0,966493	0,026716	1,097330	-0,000263
	32,5	0,989149	0,023013	1,079989	-0,000262

Fonte: Da autora (2018).

Pode-se observar pela Tabela 6 que a constante de secagem “k” é maior para a umidade relativa de 10%, quando comparada à umidade relativa de 32,5%. Esse fato, facilmente visualizado na Figura 2, é esperado, uma vez que menores umidades relativas acarretam em maior taxa de secagem, chegando ao teor de água de equilíbrio em menor tempo de submissão do produto ao ar de secagem.

Na Figura 2, apresentam-se os comportamentos da razão de umidade observado e estimado pelo modelo de Midilli, para o café natural nas umidades relativas de 10; 17,5, 25% 32,5%, durante a secagem.

Figura 2 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café natural verde nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, em função do tempo.



Fonte: Da autora (2018).

As curvas de secagem para o café natural maduro, descascado e beneficiado úmido foram determinadas a partir da equação de Midilli, que melhor se ajustou para a representação do fenômeno de secagem, em todas as umidades relativas do ar estudadas exceto para a umidade relativa de 25% para o café beneficiado úmido, no qual, o modelo que melhor se ajustou foi o de Page (DIAS, 2017).

4.2 Isotermas de sorção do café natural verde

De acordo com os teores de água de equilíbrio, foram determinadas as isotermas de sorção do café natural verde de acordo com as condições ambientais controladas.

As isotermas de dessorção do café natural verde foram modeladas nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C. O teor de água inicial foi de 0,1156 (b.s.) e o teor de água após atingir o equilíbrio higroscópico com o ambiente está apresentado na Tabela 7:

Tabela 7 - Teor de água final (T_f), base seca, do café natural verde, após atingir o equilíbrio higroscópico com o ambiente.

Teor de água (b.s.)	Temperatura (°C)							
	20	UR (%)	30	UR (%)	55	UR (%)	70	UR (%)
T _f	0,2064	85,11	0,2006	83,62	0,2006	80,70	0,1572	79,49
	0,1640	54,38	0,1074	32,44	0,0930	50,15	0,0412	10,75
	0,0998	33,07	0,0857	21,61	0,0594	29,93		
	0,0915	23,11	0,0752	11,28	0,0474	11,03		
	0,0829	11,31						

Fonte: Da autora (2018).

Na Tabela 8, encontram-se os valores dos coeficientes de determinação (R²), erro relativo médio (P) e desvio padrão da estimativa (SE), utilizados para a comparação entre os nove modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais das isotermas de dessorção do café natural verde, para as diferentes temperaturas.

Tabela 8 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados na modelagem das isotermas de sorção do café natural verde.

Modelos	Parâmetros estatísticos		
	R^2	P	SE
Chung Pfast	94,91	1,63E-08	2,1E-11
Copace	93,31	3,304	0,004
GAB modificado	93,66	4,030	0,008
Halsey modificado	91,10	4,402	0,008
Henderson	89,76	1,445	0,004
Henderson modificado	92,46	0,255	0,000
Oswin	92,38	2,695	0,005
Sabbab	90,35	3,388	0,006
Sigma Copace	91,87	4,470	0,008

Fonte: Da autora (2018).

A análise de um único parâmetro não constitui uma boa ferramenta para a seleção de modelos matemáticos, é necessária a análise conjunta dos parâmetros coeficiente de determinação (R^2), desvio padrão de estimativa (SE) e erro médio relativo (P) (MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996).

Nota-se que todos os modelos ajustados apresentam valores de coeficiente de determinação satisfatórios ($R^2 > 90\%$), erro relativo médio abaixo de 10%, indicando que esses modelos são adequados para representação do fenômeno estudado. O desvio padrão apresentou valores satisfatórios, para todos os modelos, considerando que SE próximos a 0 (zero) são ideais (MOHAPATRA; RAO, 2005). Esses critérios de seleção foram utilizados para estabelecer o modelo que melhor descreve o processo estudado.

O modelo escolhido para representar as isotermas de sorção do café natural verde foi o modelo de Copace, apresentando os valores dos parâmetros estatísticos $R^2=94,31\%$ $P=3,304\%$ e $SE=0,004$.

Almeida et al. (2013), Bortolotti e Barrozo (2013), Costa, Resende e Oliveira (2013) e Sousa, Resende e Costa (2013), estudando o equilíbrio

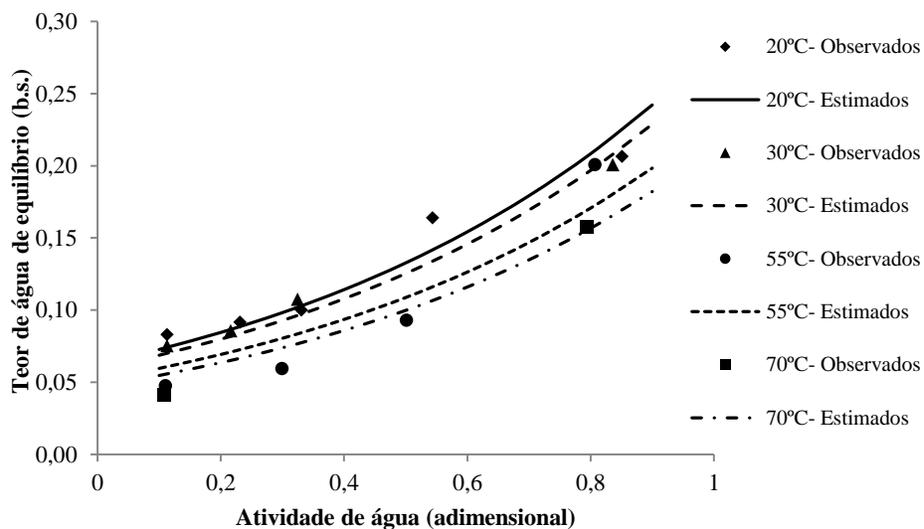
higroscópico das sementes de feijão adzuki, sementes de alface, frutos de crambe e nabo forrageiro, respectivamente, verificaram também que o modelo de Copace foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Definidos os coeficientes do modelo matemático escolhido, com base nos critérios de seleção estatísticos, obtém-se a equação utilizada para modelar as isotermas de sorção do café natural verde.

$$U_e = \exp[-2,65798 - (0,005699 * T) + (1,504139 * UR)] \quad (28)$$

Na Figura 3, é mostrada a isoterma de sorção do café natural verde, com os dados experimentais e estimados pelo modelo matemático de Copace, em função do teor de água (base seca) e atividade de água (decimal).

Figura 3 - Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do café natural verde, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.



Fonte: Da autora (2018).

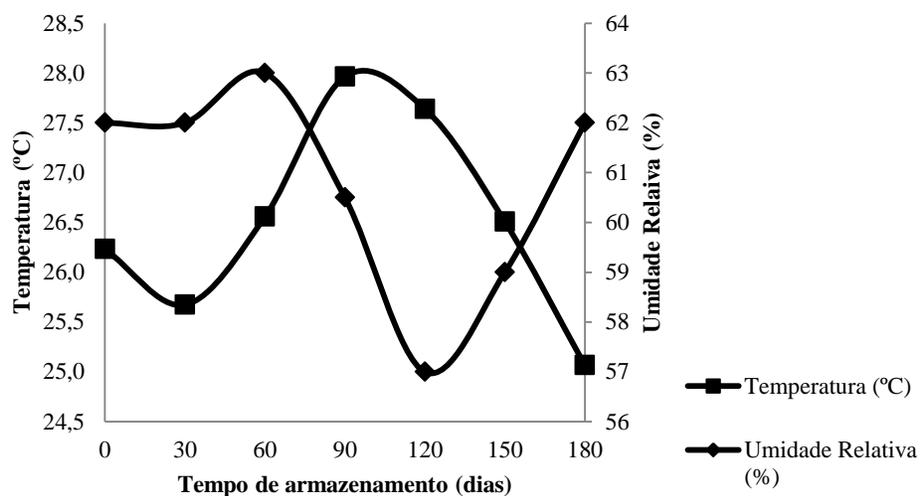
O modelo de Copace se adequou bem aos dados experimentais, para toda a faixa de atividade de água e teor de água de equilíbrio, nas quatro temperaturas estudadas para o café natural verde.

Observa-se que, para uma atividade de água constante, os valores de teor de água de equilíbrio diminuíram com o aumento da temperatura, seguindo a mesma tendência da maioria dos produtos agrícolas. Assim, a partir dessas isotermas, pode-se manejar, adequadamente, o produto, visando à manutenção do seu teor de água nos níveis recomendados para o armazenamento seguro (COSTA et al., 2015).

4.3 Monitoramento da Temperatura e Umidade Relativa

Os valores da temperatura e da umidade relativa média do ambiente de armazenamento do Laboratório de processamento de Produtos Agrícolas (LPPA), localizado na Universidade Federal de Lavras- UFLA, no período de outubro de 2016 a abril de 2017, são apresentados, na Figura 4.

Figura 4 - Temperatura ambiente do local de armazenamento, localizado na Universidade Federal de Lavras- UFLA, durante 180 dias de armazenamento do café.



Fonte: Da autora (2018).

A temperatura média foi de 26,5°C, a média das máximas de 28°C e a média das mínimas de 24°C. A umidade relativa média foi de 62%, a média das máximas foi 64% e a média das mínimas de 57%.

As condições médias de temperatura de armazenamento não foram consideradas boas, para a manutenção da qualidade do café, tendo em vista que os valores máximos estão próximos de 30°C, os valores médios se apresentaram ao redor de 26,5°C, com ocorrência de períodos com altas temperaturas próximas a 31°C durante o verão. Observa-se, no entanto, que os valores máximos de UR não ultrapassaram 64%, com média, durante todo o período, acima de 60%.

4.4 Teores de água de equilíbrio do café natural maduro e verde, descascado e beneficiado úmido

Foram determinados os teores de água de equilíbrio para os cafés natural maduro, verde, descascado e beneficiado úmido durante cento e oitenta dias de armazenamento de acordo com as condições ambientais.

4.4.1 Teores de água de equilíbrio do café natural maduro

Os teores de água de equilíbrio para o café natural maduro foram determinados a partir da equação descrita por Arteaga (1986) que melhor representou o equilíbrio higroscópico, para as faixas de temperatura de 25a 28°C e umidade relativa do ar (UR) de 0,58 a 0,62, durante os meses de outubro de 2016 a abril de 2017 (DIAS, 2017). Os valores estão representados na Tabela 9:

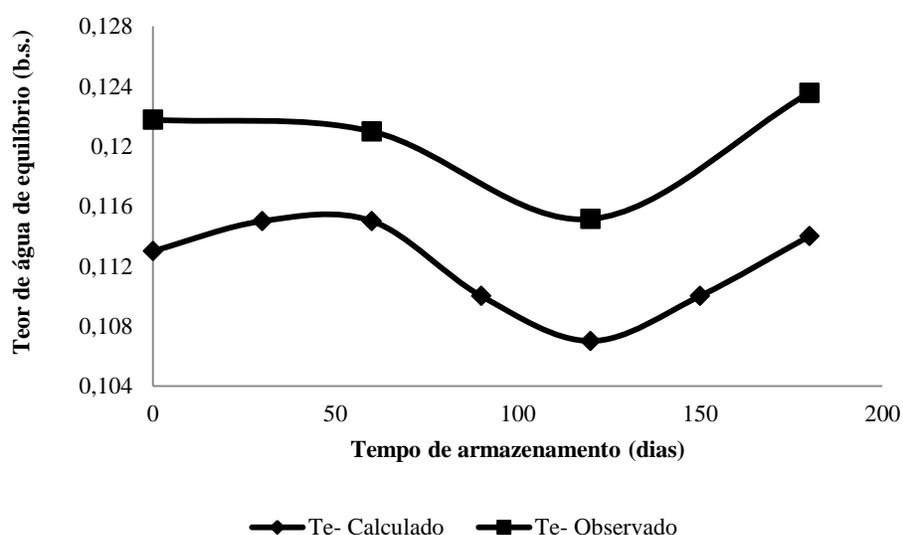
Tabela 9 - Valores médios dos teores de água de equilíbrio higroscópico (Te) (decimal, base seca) do café natural maduro em função da temperatura (°C) e da umidade relativa do ar (decimal), durante 180 dias de armazenamento.

Dias	Temperatura	UR	Te
0	26,36	0,61	0,113
30	25,67	0,61	0,115
60	25,56	0,62	0,115
90	27,96	0,6	0,11
120	27,64	0,58	0,107
150	26,51	0,59	0,11
180	25,04	0,61	0,114

Fonte: Da autora (2018).

Na Figura 5, são mostrados os valores médios de teor de água de equilíbrio (b.s.) experimentais e calculados pela equação descrita por Arteaga (1986), em função do tempo de armazenamento.

Figura 5 - Valores médios de teor de água de equilíbrio calculados e experimentais (observados) do café natural maduro, durante cento e oitenta dias de armazenamento.



Fonte: Da autora (2018).

4.4.2 Teores de água de equilíbrio do café natural verde

Na Tabela 10, estão apresentados os teores de água de equilíbrio médio (Te) obtidos por meio da equação de Copace, que melhor representou o equilíbrio higroscópico do café natural verde, para as faixas de temperatura de 25 a 28°C e umidade relativa do ar (UR) de 0,58 a 0,62, durante os meses de outubro de 2016 a abril de 2017.

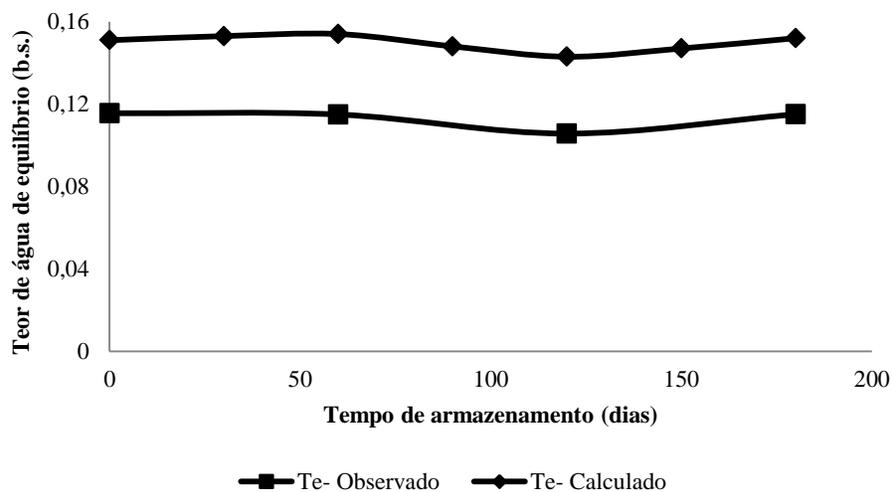
Tabela 10 - Valores médios dos teores de água de equilíbrio higroscópico (Te) (decimal, base seca) do café natural verde em função da temperatura (°C) e da umidade relativa do ar (decimal), durante 180 dias de armazenamento.

Dias	Temperatura	UR	Te
0	23,36	0,61	0,151
30	25,67	0,61	0,153
60	26,56	0,62	0,154
90	27,96	0,60	0,148
120	27,64	0,58	0,143
150	26,51	0,59	0,147
180	25,04	0,61	0,152

Fonte: Da autora (2018).

Na Figura 6, são mostrados os valores médios de teor de água de equilíbrio (b.s.) experimentais e calculados pelo modelo de copace, em função do tempo de armazenamento.

Figura 6 - Valores médios de teor de água de equilíbrio calculados e experimentais (observados) do café natural verde, durante cento e oitenta dias de armazenamento.



Fonte: Da autora (2018).

4.4.3 Teores de água de equilíbrio do café descascado

Os teores de água de equilíbrio (Te) para o café descascado foram determinados a partir da equação de Sabbab, que melhor representou o equilíbrio higroscópico, para as faixas de temperatura de 25 a 28°C e umidade relativa do ar (UR) de 0,58 a 0,62, durante os meses de outubro de 2016 a abril de 2017 (DIAS, 2017). Os valores estão representados na Tabela 11:

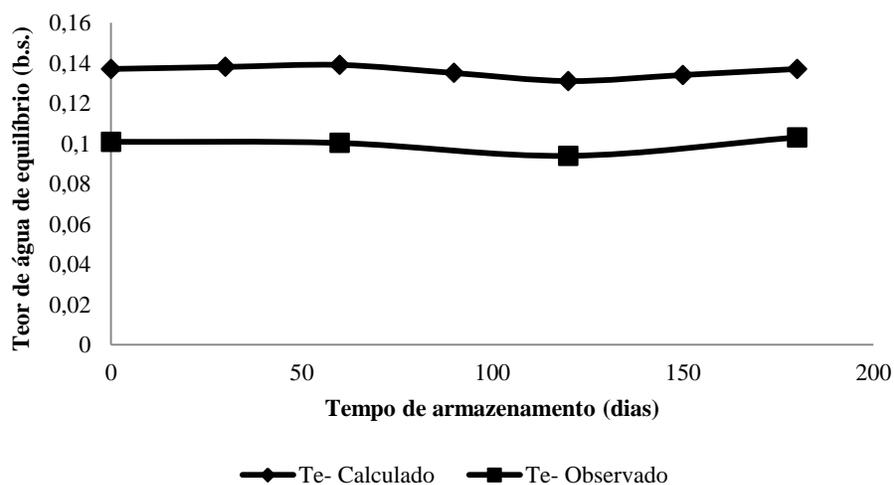
Tabela 11 - Valores médios dos teores de água de equilíbrio higroscópico (Te) (decimal, base seca) do café descascado em função da temperatura (°C) e da umidade relativa do ar (decimal), durante 180 dias de armazenamento.

Dias	Temperatura	UR	Te
0	26,36	0,61	0,137
30	25,67	0,61	0,138
60	25,56	0,62	0,139
90	27,96	0,60	0,135
120	27,64	0,58	0,131
150	26,51	0,59	0,134
180	25,04	0,61	0,137

Fonte: Da autora (2018).

Na Figura 7, são mostrados os valores médios de teor de água de equilíbrio (b.s.) experimentais e calculados pelo modelo de Sabbab, em função do tempo de armazenamento.

Figura 7 - Valores médios de teor de água de equilíbrio calculados e experimentais (observados) do café descascado, durante cento e oitenta dias de armazenamento.



Fonte: Da autora (2018).

4.4.4 Teores de água de equilíbrio do café beneficiado úmido

Os teores de água de equilíbrio (Te) para o café beneficiado úmido foram determinados a partir da equação descrita por Arteaga (1986), que melhor representou o equilíbrio higroscópico, para as faixas de temperatura de 25 a 28°C e umidade relativa do ar (UR) de 0,58 a 0,62, durante os meses de outubro de 2016 a abril de 2017 (DIAS, 2017). Os valores estão representados na Tabela 12:

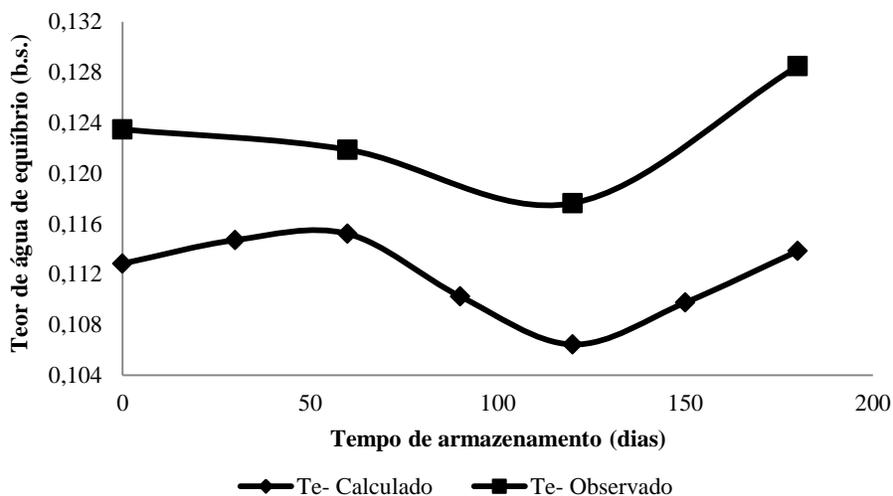
Tabela 12 - Valores médios dos teores de água de equilíbrio higroscópico (Te) (decimal, base seca) do café beneficiado úmido em função da temperatura (°C) e da umidade relativa do ar (decimal), durante 180 dias de armazenamento.

Dias	Temperatura	UR	Te
0	26,36	0,61	0,113
30	25,67	0,61	0,115
60	25,56	0,62	0,115
90	27,96	0,6	0,110
120	27,64	0,58	0,106
150	26,51	0,59	0,110
180	25,04	0,61	0,114

Fonte: Da autora (2018).

Na Figura 8, são mostrados os valores médios de teor de água de equilíbrio (b.s.) experimentais e calculados pela equação descrita por Arteaga (1986), em função do tempo de armazenamento.

Figura 8 - Valores médios de teor de água de equilíbrio calculados e experimentais (observados) do café beneficiado úmido, durante cento e oitenta dias de armazenamento.



Fonte: Da autora (2018).

4.4.5 Discussão geral

As condições de armazenamento podem permitir a alteração do teor de água, podendo acelerar a respiração e promover a redução da qualidade do produto durante o armazenamento (BORÉM et al., 2013).

Para todos os tratamentos verifica-se que o teor de água dos cafés tende a entrar em equilíbrio com as condições ambientais e que as oscilações observadas são próprias da natureza biológica do material. O teor de água dos grãos de café oscila entre 0,115 a 0,124 (b.s.), para a forma de preparo natural maduro, entre 0,106 a 0,116 (b.s.), para a forma de preparo natural verde, entre 0,094 a 0,103 (b.s.), para a forma de preparo descascado e entre 0,118 a 0,128 (b.s.), para o café beneficiado úmido, uma vez que os cafés foram acondicionados em embalagem permeável (sacos de papel).

A análise dos gráficos acima permite verificar que a variação do teor de água dos grãos de café, durante o armazenamento, pode ser considerada pequena e, em consequência, esses cafés não terão sua qualidade prejudicada e o teor de água não interferirá nas interpretações dos resultados dos testes de qualidade fisiológica dos grãos.

Ressalta-se que o teor de água é um dos principais fatores que afeta a qualidade dos grãos durante o armazenamento (ABREU, 2015; RIBEIRO, F. et al., 2011; SAATH et al., 2012; SPEROTTO et al., 2015). Teores de água maiores que 11,5% promovem aumento na taxa respiratória dos grãos, decomposição e consumo de compostos químicos do café (VENTURI et al., 2007; VILELA; CHANDRA; OLIVEIRA, 2000).

4.5 Caracterização da qualidade do café

Os efeitos imediatos e latentes da secagem com baixa umidade relativa do ar na qualidade fisiológica e física dos cafés foram avaliados após a secagem e durante seis meses de armazenamento, a cada dois meses, pelas análises de condutividade elétrica (CE), lixiviação de potássio (LK) e evolução da cor.

4.5.1 Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café natural maduro

A análise de variância (Tabela 30, APÊNDICE A) indicou que para os testes de lixiviação de potássio (LK) e condutividade elétrica (CE) existem diferenças significativas para os fatores analisados: umidade relativa do ar e tempo de armazenamento. Os valores médios de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, dos grãos de café natural maduro para o fator umidade relativa do ar de secagem, encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural maduro submetido à secagem com diferentes umidades relativas.

Tipos de café	Umidade Relativa (%)	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$)	LK (ppm)
Natural maduro	10	18,463 a	44,337 a
	17,5	20,018 b	50,594 b
	25	21,109 b	51,913 b
	32,5	20,109 b	50,676 b

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

Na tabela 13, constata que o café natural maduro apresentou menores valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio quando secado em umidade relativa do ar de 10%. O fato que pode explicar esse resultado seria o menor tempo de exposição desse café à alta temperatura e baixa umidade relativa do ar de secagem (BORÉM et al., 2006; SAATH et al., 2012).

Na Tabela 14, encontram-se os valores médios do teste de condutividade elétrica e lixiviação de potássio (LK) do café natural maduro em relação ao tempo de armazenamento.

Tabela 14 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) para o café natural maduro armazenado durante cento e oitenta dias.

Tipos de café	Tempo de armazenamento (dias)	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$)	LK (ppm)
Natural maduro	0	18,170 a	40,932 a
	60	19,130 a	52,568 b
	120	20,997 b	52,545 b
	180	21,003 b	51,475 b

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

Observa-se, pelos dados da Tabela 14, que o café obteve maiores valores de condutividade elétrica, a partir de 120 dias e de lixiviação de potássio aos 60 dias de armazenamento. Maiores valores observados, no teste de condutividade elétrica, são indicativos de desorganização celular, que é acompanhada por uma perda de controle da permeabilidade e pelo extravasamento de solutos (MALTA et al., 2013). Assim como neste trabalho, outros, também, detectarem alterações nos valores de lixiviação de potássio e condutividade elétrica dos grãos ao longo do armazenamento (ANDRADE, 2017; RIBEIRO, 2013; SAATH et al., 2012).

4.5.2 Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café natural verde

A análise de variância (TABELA 31, APÊNDICE A) indicou que para o teste de lixiviação de potássio (LK) existem diferenças significativas para os fatores analisados: umidade relativa do ar e tempo de armazenamento, bem como a interação entre esses dois fatores.

Na Tabela 15 encontram-se os valores médios do teste de lixiviação de potássio do café natural verde para a interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e período de armazenamento.

Tabela 15 - Valores médios de lixiviação de potássio (LK) do café natural verde para a interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.

Tipos de café	Tempo de armazenamento (dias)	Umidade Relativa (%)		
		10	17,5	32,5
Natural verde	0	409,285 Aa	406,189 Aa	422,022 Aa
	60	797,316 Bb	722,092 Bb	581,082 Ab
	120	938,825 Bc	687,364 Ab	660,606 Ac
	180	916,769 Ac	887,331 Ac	805,852 Ad

Fonte: Da autora (2018).

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente a nível de 5% de probabilidade, pelo teste de skott-knott.

Durante o armazenamento, os valores de lixiviação de potássio variaram, quanto maior o tempo de armazenamento, maiores foram os valores obtidos, ou seja, o café sofreu dano fisiológico durante o armazenamento. Nota-se também que os valores de lixiviação de potássio foram influenciados pelo efeito da umidade relativa do ar de secagem nos tempos de armazenamento. De um modo geral, os maiores valores de lixiviação de potássio foram encontrados nos grãos de café natural verde, secados com a umidade relativa de 10%. Isso sugere que, quanto menor a umidade relativa utilizada maior será o dano celular no café já que esse teste é indicativo de desorganização celular (MALTA et al., 2013). Uma vez que o café verde apresenta paredes celulares mais finas devido ao baixo teor de celulose, isso será acompanhado por uma maior perda de controle da permeabilidade e extravasamento dos solutos (ILLY; VIANI, 1995). Assim como neste trabalho, os estudos de Afonso Junior et al. (2006) e Isquierdo et al. (2011), realizados com café natural e descascado, respectivamente, afirmaram que quanto menor a umidade relativa do ar de secagem maior será o dano nas membranas celulares.

4.5.3 Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café descascado

A análise de variância (TABELA 32, APÊNDICE A) indicou que para os testes de lixiviação de potássio (LK) e condutividade elétrica (CE) existem diferenças significativas para os fatores analisados: umidade relativa do ar e tempo de armazenamento, bem como a interação entre esses dois fatores.

Nas Tabelas 16 e 17, encontram-se os valores médios do teste de condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café descascado para a interação umidade relativa do ar de secagem e período de armazenamento.

Tabela 16 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café descascado para interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.

Tipos de café	Umidade Relativa (%)	Tempo de armazenamento (dias)	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$)	LK (ppm)
CD	10	0	11,867 a	24,165 a
		60	11,814 a	33,662 c
		120	11,360 a	30,236 b
		180	12,674 a	29,663 b
	17,5	0	12,494 a	21,983 a
		60	15,093 b	33,276 c
		120	16,170 b	33,895 c
		180	15,388 b	29,552 b
	25	0	16,265 a	32,477 a
		60	17,394 a	44,732 c
		120	17,561 a	39,133 b
		180	18,061 a	41,814 b
	32,5	0	14,487 a	26,560 a
		60	15,141 a	36,453 b
		120	18,268 b	38,014 b
		180	17,676 b	35,634 b

Fonte: Da autora (2018).

Para cada nível do fator fixado, as médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente a nível de 5% de probabilidade, pelo teste de skott-knott.

Observa-se que, os valores de condutividade elétrica não foram influenciados pelo efeito do tempo de armazenamento, nas umidades relativas do ar de 10% e 25%. Nas umidades relativas do ar de secagem de 17,5% e 32,5% os valores de condutividade foram menores logo após a secagem. Os valores de lixiviação de potássio para cada nível de umidade relativa do ar de secagem foram menores logo após a secagem, e durante o armazenamento, os valores aumentaram, concordando com estudos realizados sobre

armazenamento, que indicam uma perda de qualidade do produto durante esse período (ANDRADE, 2017; OLIVEIRA, 2011; RIBEIRO, 2013).

Tabela 17 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café descascado para interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.

Tipos de café	Tempo de armazenamento (dias)	Umidade Relativa (%)	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	LK (ppm)
CD	0	10	11,867 a	24,165 a
		17,5	12,494 a	21,983 a
		25	16,265 c	32,477 c
		32,5	14,487 b	26,560 b
	60	10	11,814 a	33,662 a
		17,5	15,093 b	33,276 a
		25	17,394 c	44,732 c
		32,5	15,141 b	36,453 b
	120	10	11,360 a	30,236 a
		17,5	16,170 b	33,895 b
		25	17,561 c	39,133 c
		32,5	18,268 c	38,014 c
	180	10	12,674 a	29,663 a
		17,5	12,388 a	29,552 a
		25	18,601 b	41,814 c
		32,5	17,676 b	35,634 b

Fonte: Da autora (2018).

Para cada nível do fator fixado, as médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, pelo teste de skott-knott.

Verifica-se nessa tabela, que os grãos de café descascado conservam melhor sua qualidade fisiológica, quando submetidos à secagem com umidade relativa de 10% e 17,5%. O fato que pode explicar esse resultado seria o menor tempo de exposição desses cafés à alta temperatura e baixa umidade relativa do ar de secagem, ou seja, sofreu um menor estresse de secagem (BORÉM et al., 2006; SAATH et al., 2012).

4.5.4 Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café beneficiado úmido

A análise de variância (Tabela 33, APÊNDICE A) indicou que para os testes de lixiviação de potássio (LK) e condutividade elétrica (CE) existem diferenças significativas apenas para o fator tempo de armazenamento.

Os valores médios de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, do café beneficiado úmido para o fator tempo de armazenamento, encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) para o café beneficiado úmido armazenado durante cento e oitenta dias.

Tipos de café	Tempo de armazenamento (dias)	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	LK (ppm)
	0	14,042 a	30,920 a
Café beneficiado úmido	60	17,021 a	46,639 b
	120	22,753 b	61,112 c
	180	20,502 b	55,153 c

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

Constata na Tabela 18, que o café beneficiado úmido apresentou maiores valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, a partir dos 120 dias de armazenamento, e as condições de temperatura e umidade relativa do ar de armazenamento são fatores que interferem na quantidade de íons lixiviados, de acordo com Marques et al. (2008), nota-se um maior dano na membrana plasmática, afetando a qualidade fisiológica do café beneficiado úmido.

4.5.5 Lixiviação de potássio e condutividade elétrica do café natural maduro e verde, descascado e beneficiado úmido

Na Tabela 19, encontram-se os valores médios do teste de condutividade elétrica e lixiviação de potássio para os cafés natural maduro e verde. Com o objetivo de comparar as duas maturações estudadas.

Tabela 19 - Resultados médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) avaliado para o café natural em duas diferentes maturações.

Maturação	Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	Lixiviação de potássio (ppm)
Natural maduro	20,352 a	49,116 a
Natural verde	237,039 b	633,524 b

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

Observa-se, pelos dados da Tabela 19 que, o café natural verde foi o que apresentou maiores valores, conseqüentemente, obteve uma maior quantidade de danos causados aos grãos. Isso se deve ao seu amadurecimento incompleto, pois ao examinar um café verde no microscópio, é visível que as paredes celulares são mais finas (baixo teor de celulose), quando comparado a um café natural maduro (ILLY; VIANI, 1995). Esses resultados estão de acordo com os apresentados por Malta, Pereira e Chagas (2005), o qual observou que grãos de café verde têm valores condutividade elétrica e lixiviação de potássio, muito maiores que o esperado, influenciando de forma significativa a determinação da qualidade fisiológica de um lote de café.

Na Tabela 20, encontram-se os valores médios do teste de condutividade elétrica e lixiviação de potássio para os cafés natural maduro, descascado e beneficiado úmido. Com o objetivo de comparar os diferentes processamentos.

Tabela 20 - Resultados médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) avaliado para as formas de preparo natural, descascado e beneficiado úmido.

Tipo de café	Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	Lixiviação de potássio (ppm)
Natural maduro	20,352 b	49,116 b
Descascado	15,274 a	33,793 a
Café beneficiado úmido	19,899 b	49,950 b

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

Observa-se, pelos dados da Tabela 20 que o café descascado foi o que apresentou menores valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, conseqüentemente, obteve uma menor quantidade de danos causados aos grãos, apontando que essa forma de processamento contribuiu para os valores de condutividade elétrica serem menores, por ser mais resistente à secagem em alta temperatura do que cafés processados pela via úmida, resultando em um maior desempenho fisiológico (ALVES et al., 2017). Outro fato que pode ter contribuído para isso, seria o menor tempo de exposição desses cafés às altas temperaturas, quando comparados aos tempos de exposição dos cafés naturais (OLIVEIRA, 2011; PRETE, 1992; SAATH et al., 2012).

4.6 Evolução da cor do café

Os efeitos imediatos e latentes da secagem com baixa umidade relativa do ar na qualidade física dos cafés foram avaliados após a secagem e durante seis meses de armazenamento, a cada dois meses, pela evolução da cor dos grãos.

4.6.1 Evolução da cor do café natural maduro

A análise de variância (TABELA 34, APÊNDICE A) indicou que a coordenada L* foi significativa para os fatores analisados: umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento, bem como para a interação entre esses fatores. As coordenadas a* e b* apresentaram diferenças significativas para o fator tempo de armazenamento e umidade relativa do ar de secagem, respectivamente.

Os valores médios da coordenada b*, dos grãos beneficiados de café natural maduro para o fator umidade relativa do ar de secagem, encontram-se na Tabela 21, na qual é possível observar que os valores da coordenada para quantificação da cor dos grãos beneficiados pouco se alteraram, indicando ser pequena a influência desses fatores sobre a coloração do produto.

Tabela 21 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada b*, para grãos beneficiados do café natural maduro, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.

Tipos de café	Umidade Relativa (%)	Tempo de secagem (horas)	Coordenada b*
Natural maduro	10	105	19,554 b
	17,5	118,5	19,807 b
	25	120	18,949 a
	32,5	123,5	19,806 b

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

Os valores médios da coordenada a*, dos grãos beneficiados de café natural maduro para o fator tempo de armazenamento, encontram-se na Tabela 22, na qual é possível observar, que para a coordenada a*, o período de

armazenamento teve efeito até os cento e vinte dias, tempo em que ocorreu a estabilização de seus valores, concordando com Abreu et al. (2015), Andrade (2017) e Ribeiro (2013) quando afirmaram que o tempo de armazenamento influencia na coloração dos grãos de café.

Tabela 22 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada a*, para grãos beneficiados do café natural maduro, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.

Tipos de café	Tempo de armazenamento (dias)	Coordenada a*
Natural Maduro	0	1,538 a
	60	1,544 a
	120	1,758 b
	180	1,918 b

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

Os valores médios da coordenada L dos grãos de café natural maduro para a interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e período de armazenamento encontram-se na Tabela 23, na qual se nota a pouca influência do fator umidade relativa do ar de secagem para os períodos de armazenamento analisados. Observa-se também, que a coordenada L* independentemente da umidade relativa do ar enfocada, apresentou tendência de aumento de seus valores com o prolongamento do tempo de estocagem do produto, reafirmando a importância da contribuição dessa coordenada para a avaliação da cor dos grãos de café, como atributo de qualidade.

Tabela 23 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L*, para grãos beneficiados do café natural maduro, para a interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.

Tipos de café	Tempo de armazenamento (dias)	Umidade Relativa (%)			
		10	17,5	25	32,5
Natural maduro	0	39,053 Aa	38,208 Aa	38,477 Aa	40,475 Ba
	60	42,720 Bb	44,150 Bb	41,295 Ab	42,758 Bb
	120	44,680 Bc	42,795 Ab	43,265 Ac	44,790 Bc
	180	45,190 Ac	45,778 Ac	44,190 Ac	45,498 Ac

Fonte: Da autora (2018).

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente a nível de 5% de probabilidade, pelo teste de skott-knott.

4.6.2 Evolução da cor do café natural verde

A análise de variância (TABELA 35, APÊNDICE A) indicou que a coordenada L* foi significativa para os fatores analisados: umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento e a coordenada b* apresentou diferença significativa para o fator umidade relativa do ar de secagem.

Os valores médios das coordenadas L* e b*, dos grãos beneficiados de café natural verde para o fator umidade relativa do ar de secagem, encontram-se na Tabela 24, na qual indica haver influência desse fator sobre a cor do produto. De modo geral, verifica-se, a partir da umidade relativa do ar de secagem de 25%, um aumento dos valores da coordenada L. Esse aumento pode ser devido à porcentagem de grãos preto verde contidos na amostra.

Tabela 24 - Valores médios dos dados obtidos das coordenadas L* e b*, para grãos beneficiados do café natural verde, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.

Tipos de café	Umidade Relativa (%)	Tempo de secagem (horas)	Coordenada L*	Coordenada b*
	10	81,3	31,063 a	17,596 a
Natural verde	17,5	83,5	31,361 a	17,491 a
	25	83,0	34,399 b	19,379 b
	32,5	99,5	33,590 b	18,553 b

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

Os valores médios da coordenada L*, dos grãos beneficiados de café natural verde para o fator tempo de armazenamento, encontram-se na Tabela 25, na qual indica haver um aumento nos valores das coordenadas analisadas com o prolongamento do período de armazenamento do produto.

Tabela 25 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L*, para grãos beneficiados do café natural verde, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.

Tipos de café	Tempo de armazenamento (dias)	Coordenada L*
Natural verde	0	29,244 a
	60	32,657 b
	120	33,979 c
	180	34,533 c

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

4.6.3 Evolução da cor do café descascado

A análise de variância (TABELA 36, APÊNDICE A) indicou que a coordenada L* foi significativa para os fatores analisados: umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.

Os valores médios da coordenada L*, dos grãos beneficiados de café descascado para o fator umidade relativa do ar de secagem, encontram-se na Tabela 26, na qual revela que os valores da coordenada L* para quantificação da cor dos grãos beneficiados pouco se alteraram, indicando ser pequena a influência desse fator sobre a coloração do produto.

Tabela 26 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L*, para grãos beneficiados do café descascado, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.

Tipos de café	Umidade Relativa (%)	Tempo de secagem (horas)	Coordenada L*
CD	10	50	44,058 b
	17,5	55	44,571 b
	25	60	42,760 a
	32,5	61,5	44,151 b

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

Os valores médios da coordenada L*, dos grãos beneficiados de café descascado para o fator tempo de armazenamento, encontram-se na Tabela 27, na qual indica que não houve variação significativa dos valores da coordenada analisada com o prolongamento do período de armazenamento do produto.

Tabela 27 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L*, para grãos beneficiados do café descascado, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por cento e oitenta dias.

Tipos de café	Tempo de armazenamento (dias)	Coordenada L*
CD	0	40,703 a
	60	44,831 b
	120	44,442 b
	180	45,563 b

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de skott-knott, a 5% de probabilidade.

4.6.4 Evolução da cor do café beneficiado úmido

A análise de variância (TABELA 37, APÊNDICE A) indicou que a coordenada L* foi significativa para os fatores analisados: tempo de armazenamento e a interação do tempo com a umidade relativa do ar de secagem.

Os valores médios da coordenada L*, do café beneficiado úmido para a interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e período de armazenamento encontram-se na Tabela 28, na qual se nota que logo após a secagem os valores da coordenada L* foram menores em todas as umidades relativas do ar de secagem, havendo pouca alteração dos valores da coordenada estudada durante o armazenamento.

Tabela 28 - Valores médios dos dados obtidos da coordenada L*, para o café beneficiado úmido, para a interação dos fatores umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento.

Tipos de café	Tempo de armazenamento (dias)	Umidade Relativa (%)		
		10	17,5	32,5
Café beneficiado úmido	0	39,230 Aa	39,685 Aa	37,350 Aa
	60	42,025 Aa	45,300 Ab	43,860 Ab
	120	44,860 Ab	43,035 Ab	47,090 Bb
	180	46,135 Ab	43,495 Ab	44,910 Ab

Fonte: Da autora (2018).

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, pelo teste de skott-knott.

4.6.5 Discussão geral

Fazendo uma avaliação geral dos resultados obtidos para os quatro tipos de café estudados, de acordo com a umidade relativa do ar de secagem e tempo de armazenamento, pode-se observar que a luminosidade foi a mais influenciada pelos fatores estudados para todos os tipos de café, enquanto as coordenadas de cromaticidade a* e b*, foram influenciadas apenas para o café processado natural.

O branqueamento é um fenômeno conhecido durante o armazenamento dos grãos de café beneficiados e explicado pelo aumento da coordenada (L*). O aumento das coordenadas a* e b* indica perda, respectivamente, da coloração verde e azulada dos grãos (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 2003).

Analisando a cor dos grãos beneficiados de café como um dos principais atributos de qualidade do produto, observa-se para os quatro tipos de café estudado, que houve efeito da secagem com baixa umidade relativa do ar sobre a coloração dos grãos armazenados. Verifica-se que os cafés natural maduro e verde apresentaram um aumento no valor da coordenada L* com o prolongamento do período de armazenamento do produto, conseqüentemente

apresentaram maiores índices de branqueamento. Esse resultado pode ser devido à presença de fragmentos do espermoderma (película prateada) aderidos aos grãos, o que pode ter influenciado na leitura do aparelho, uma vez que foi observado em maior intensidade neste processamento (ABREU et al., 2015).

Analisando o efeito da umidade relativa do ar de secagem sobre a cor, e consequentemente a qualidade dos grãos de café, observou-se que as umidades relativas estudadas, embora tenham influenciado na alteração da coloração dos cafés, os resultados apresentados indicam uma reduzida contribuição desse fator como elemento capaz de grandes modificações da cor dos grãos beneficiados, independentemente do tipo de café. Esses resultados estão de acordo com os apresentados por Afonso Júnior (2001), o qual não encontrou grande influência da secagem com diferentes umidades relativas do ar de secagem (30 a 60%) como elemento modificador da coloração dos grãos de café.

4.7 Porcentagem de grãos preto-verde

Os valores da porcentagem em relação à umidade relativa do ar de secagem, dos grãos preto-verdes contidos na amostra de café natural verde estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Porcentagem de grãos preto-verdes, obtida após a secagem do café natural verde.

Umidade Relativa (%)	Grãos preto-verde (%)
10	33,00 ab
17,5	37,00 b
25	27,83 a
32,5	31,17 ab

Fonte: Da autora (2018).

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

O grão preto verde se caracteriza por uma coloração preta brilhante devido à aderência da película prateada. Os defeitos do café verde e preto-verdes são oriundos de grãos imaturos, são considerados defeitos graves e que afetam negativamente a qualidade da bebida do café (BRASIL, 2003).

Pode-se observar, pelos dados da Tabela 29, que o número médio de defeitos variou significativamente entre os tratamentos, e para os cafés secados na umidade relativa de 25%, foi observada uma menor porcentagem de grãos preto-verdes quando comparado aos cafés secados na umidade relativa de 17,5%.

A temperatura de secagem é outro fator que interfere na formação de grãos preto-verdes durante essa etapa. Tudo indica que enzimas do grão, em função de alterações fisiológicas, reagem com o substrato (compostos fenólicos existentes junto à parede celular), formando polímeros de coloração castanha. O mesmo efeito também pode ser produzido pela oxidação ou desnaturação, tanto de compostos fenólicos como proteínas ou açúcares. Chalfoun e Carvalho (1998) observaram que, quando se aumenta a temperatura de secagem na massa do café, aumenta o número de defeitos preto-verdes. Quando o café é secado a uma temperatura de 40°C, a porcentagem de grãos preto-verdes será maior que 21,5%, assim, esse dado se assemelha com a porcentagem encontrada neste estudo.

5 CONCLUSÕES

Nas condições em que foi desenvolvido o presente trabalho, conclui-se que para o café natural verde, o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou para a representação do fenômeno de cinética de secagem, independentemente da umidade relativa estudada.

De acordo com os resultados obtidos no estudo das isotermas de sorção do fruto do café natural verde e, nas condições em que foi desenvolvido o trabalho, pode-se concluir que para esse café, o modelo matemático que melhor descreveu os dados experimentais de teor de água de equilíbrio foi o modelo de Copace. Em uma mesma temperatura, o aumento da atividade de água promove o aumento do teor de água de equilíbrio.

Sobre o estudo da qualidade fisiológica e física do café, pôde se concluir que o café natural maduro não atestou uma depreciação na qualidade quando secado com umidade relativas do ar de 10% e o café descascado com as umidades relativas de 10% e 17,5%. Já o café natural verde teve uma melhor qualidade física e fisiológica quando secado na umidade relativa do ar de 32,5%.

A secagem com baixas umidades relativas do ar não causam danos na qualidade física e fisiológica dos cafés natural maduro, natural verde, descascado e beneficiado úmido de imediato. O dano latente na qualidade foi notável após 60 dias de armazenamento para os cafés natural maduro e descascado e após 120 dias para os cafés natural verde e beneficiado úmido.

REFERÊNCIAS

- ABREU, G. F. de. **Aspectos sensoriais, fisiológicos e bioquímicos de grãos de café armazenados em ambiente refrigerado**. 2015. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.
- ABREU, G. F. de et al. Alterações na coloração de grãos de café em função das operações pós-colheita. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 4, p. 429-436, out./dez. 2015.
- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e da qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001. 373 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.
- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Influência do tempo de armazenagem na cor dos grãos de café pré-processados por "via seca" e "via úmida". **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 6, p. 1268-1276, dez. 2003.
- AFONSO JÚNIOR, P. C. et al. Secagem, armazenamento e qualidade fisiológica de sementes do cafeeiro. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, n. 9, p. 67-82, 2006. Especial café.
- AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 73, n. 1, p. 75-84, 2006.
- ALMEIDA, D. P. et al. Higroscopicidade das sementes de feijão adzuki. **Científica**, Jaboticabal, v. 41, n. 2, p. 130-137, 2013.
- ALVES, G. E. et al. Physiological and sensorial quality of Arabica coffee subjected to different temperatures and drying airflows. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 39, n. 2, p. 225-233, 2017.
- ANDRADE, E. T. et al. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engvista**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.
- ANDRADE, E. T. et al. Determination of the hygroscopic equilibrium and isosteric heat of aji chili pepper. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 12, p. 865-871, 2017.

ANDRADE, F. T. **Qualidade do café natural especial acondicionado em embalagens impermeáveis e armazenado no Brasil e no exterior**. 2017. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

ARAÚJO, W. D. et al. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 279-286, 2014.

ARTEAGA, M. S. Modelación del proceso de secado. In: SEMINÁRIO DE SECADO SOLAR, 2., 1986, Cuzco, Peru. **Resumos...** Lima: Instituto General de Investigación, 1986. p. 51-56.

BACALTCHUK, B.; LORINI, I. **A qualidade desejada na armazenagem de grãos no país**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2008.

BERBERT, P. A. et al. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, n. 3, p. 167-173, 1995.

BIBLE, B. B.; SINGHA, S. Canopy position influences CIELab coordinates of peach color. **Hortscience**, Alexandria, v. 28, p. 992-993, 1997.

BORÉM, F. M. **Handbook of coffee post-harvest technology**. Norcross: Gin, 2014.

BORÉM, F. M. et al. Effect of intermittent drying and storage on parchment coffee quality. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30 n. 5, p. 609-616, 2014.

BORÉM, F. M. et al. Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. **Journal of Storage Products Research**, Pelotas, v. 52, p. 1-6, 2013.

BORÉM, F. M. et al. Qualidade do café submetido a diferentes temperaturas, fluxos de ar e períodos de pré-secagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 1, p. 55-63, 2006.

BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. p. 205-240.

BORTOLOTTI, C. T.; BARROZO, M. A. S. Searching the best equilibrium moisture equation for lettuce seeds using measures of curvature and bias. **Food Science & Nutrition**, London, v. 1, n. 6, p. 422-427, 2013.

BOTELHO, F. M. et al. Propriedades físicas de frutos de café robusta durante a secagem: determinação e modelagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 65-75, 2016.

BRACHT, C. K. et al. Determinação das isotermas de equilíbrio das sementes de uva das variedades cabernet sauvignon e bordô. **Engevista**, Niterói, v. 17, n. 1, p. 44-58, 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 8**, de 11 de junho de 2003. Aprova o regulamento técnico da identidade e de qualidade para a classificação do café beneficiado grão cru. Brasília, DF, 2003. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 23 set. 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 2009. 399 p.

BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 1992. 450 p.

BYTOF, G. et al. Influence of processing on the generation of γ -aminobutyric acid in green coffee beans. **European Food Research Technology**, Heidelberg, v. 220, n. 3, p. 245-250, 2005.

CHALFOUN, S. M.; CARVALHO, V. D. **Colheita e preparo do café**. Lavras: Ed. UFLA/FAEPE, 1998. 49 p.

CHEN, C.; WENG, Y. Moisture sorption isotherms of Oolong Tea. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v. 3, p. 226-233, 2010.

COELHO, S. V. B. et al. Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de café secas em sílica gel e soluções salinas saturadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, n. 6, p. 483-491, jun. 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café**: v. 4, safra 2017, n. 2, segundo levantamento. Brasília, DF, 2017. 104 p.

CORADI, P. C.; BORÉM, F. M. Alterações dos parâmetros físico químicos na qualidade de bebida do café natural e despulpado em função de diferentes tipos de secagem e condição de armazenamento. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, n. 11, p. 54-63, 2009.

CORADI, P. C.; BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. Mathematical modeling of drying the pulped coffee (*Coffea arabica* L.) at different air conditions. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, Ponta Grossa, v. 11, n. 2, p. 2397-2419, jul./dez. 2017.

CORRÊA, P. C. et al. Mathematical modelling for describing the drying process of the edible bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in thin layers. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

CORRÊA, P. C. et al. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 33, n. 4, p. 575-581, 2011.

CORRÊA, P. C. et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010a.

CORRÊA, P. C. et al. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in diferente processing levels. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 45, p. 2016-2022, 2010b.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2006.

COSTA, L. M. et al. Isotermas e calor isostérico de sementes de *Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 516-523, 2015.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. Isotermas de dessorção e calor isostérico dos frutos de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 412-418, 2013.

DIAS, C. A. **Análise da resistência à desidratação dos tecidos do pericarpo e do café beneficiado úmido do fruto de café arábica**. 2017. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

DOYMAZ, I. Air-drying characteristics of tomatoes. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 4, p. 1291-1297, 2007.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: J. Wiley, 2014. 706 p.

ESTÉVEZ, M.; VENTANAS, S.; CAVA, R. Protein oxidation in frankfurters with increasing levels of added rosemary essential oil: effect on color and texture deterioration. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 70, n. 7, p. c427-c432, 2005.

FARIA, R. Q. de et al. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 573-584, 2012.

FORTES, M. et al. Modelagem de um condicionador de ar de alta precisão para uso em processamento agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 578-589, maio/ago. 2006.

GAZOR, H. R.; MOHSENIMANESH, A. Modelling the drying kinetics of canola in fluidized bed dryer. **Journal of Food Science**, Praha, v. 28, n. 6, p. 531-537, 2010.

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

GONELLI, A. L. D. et al. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 11, p. 64-73, 2009. Edição especial café.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of National Bureau of Standards A. Physics and Chemistry**, New York, v. 81A, n. 1, p. 89-96, 1977.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 17, p. 1167-1168, 1974.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, p. 169-174, 1961.

HUBINGER, M. D. et al. Isotermas de dessorção de filé de bonito (*Sarda sarda*) desidratado osmoticamente e defumado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 305-311, 2009.

ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso coffee: the chemistry of quality**. San Diego: Academic, 1995. 253 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Green coffee: determination of loss in mass at 105°C: ISO 6673**. Geneva, 2003. 17 p.

ISQUIERDO, E. P. et al. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 56, n. 3, p. 1003-1010, 2013.

ISQUIERDO, E. P. et al. Qualidade do café cereja desmucilado submetido ao parcelamento da secagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-90, 2011.

KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 39, n. 4, p. 337-344, 1999.

KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

KNOPP, S.; BYTOF, G.; SELMAR, D. Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans. **European Food Research and Technology**, Berlin, v. 223, n. 2, p. 195-201, 2006.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA NETO, J. B.; HENNING, A. A. Relatos dos testes de vigor disponíveis as grandes culturas. **Informativo ABRATES**, Brasília, DF, v. 1, n. 2, p. 15-50, mar. 1991.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

LIMA, E. E. et al. Estudo das isotermas e calor isostérico de adsorção da farinha da coroa de frade. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 163-170, 2008.

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

MALTA, M. R. Processamento e qualidade do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 32, n. 261, p. 66-75, 2011.

MALTA, M. R. et al. Alterações na qualidade do café submetido a diferentes formas de processamento e secagem. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 21, n. 5, p. 431-440, 2013.

MALTA, M. R.; PEREIRA, R. G. F. A.; CHAGAS, S. J. de R. Condutividade elétrica e lixiviação de potássio do exsudato de grãos de café: alguns fatores que podem influenciar essas avaliações. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 1015-1020, set./out. 2005.

MARCOS FILHO, J. et al. Estudo comparativo de métodos para a avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja, com ênfase ao teste de condutividade elétrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, n. 12, p. 1805-1815, dez. 1990.

MARQUES, E. R. et al. Eficácia do teste de acidez graxa na avaliação da qualidade do café arábica (*Coffea arábica* L.) submetido a diferentes períodos e temperaturas de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1557-1562, set./out. 2008.

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

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

MONTE, J. E. C. et al. Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 30, n. 3, p. 307-312, 2008.

NOBRE, G. W. et al. Alterações químicas do café-cereja descascado durante o armazenamento. **Coffee Science**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 1-9, jan./jun. 2007.

OLIVEIRA, A. P. L. R. et al. Comparative study of the physical and chemical characteristics of coffee and sensorial analysis by principal components. **Food Analytical Methods**, New York, v. 5, n. 8, p. 1303-1314, 2015.

OLIVEIRA, P. D. **Aspectos ultraestruturais e fisiológicos associados à qualidade da bebida de café arábica submetido a diferentes métodos de**

processamento e secagem. 2010. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

ONDIER, G. O.; SIEBENMORGEN, T. J.; MAUROMOUSTAKOS, A. Lowtemperature, low-relative humidity drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 100, n. 3, p. 545-550, Oct. 2010.

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice.** New York: J. Wiley, 1998. 303 p.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layers.** 1949. 44 f. Thesis (Ph.D. in Mechanical Engineering)-Purdue University, Lafayette, 1949.

PEREA-FLORES, M. J. et al. Mathematical modeling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 38, p. 64-71, 2012.

PITTIA, P.; NICOLI, M. C.; SACCHETTI, G. Effect of moisture and water activity on textural properties of raw and roasted coffee beans. **Journal of Texture Studies**, Westport, v. 38, p. 16-134, 2007.

POLACHINI, T. C. et al. Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 632, p. 79-85, 2016.

PRETE, C. E. C. **Condutividade elétrica do exsudato de grãos de café (*Coffea arabica* L.) e sua relação com a qualidade da bebida.** 1992. 125 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1992.

PUMACAHUA-RAMOS, A. et al. Isotherms and isosteric heat of sorption of two varieties of Peruvian quinoa. **Scientia Agropecuaria**, Trujillo, v. 7, n. 4, p. 409-417, 2016.

REIS, R. C. dos et al. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 347-353, 2011.

RENDÓN, M. Y.; SALVA, T. de J. G.; BRAGAGNOLO, N. Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage. **Food Chemistry**, London, v. 147, p. 279-286, 2014.

RESENDE, O. et al. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora Pierre*) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

RIBEIRO, B. B. et al. Parâmetros qualitativos do café provenientes de diferentes processamentos na pós-colheita. **Agrarian**, Dourados, v. 4, n. 14, p. 273-279, 2011.

RIBEIRO, F. C. **Métodos alternativos para armazenamento de cafés especiais**. 2013. 109 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

RIBEIRO, F. C. et al. Storage of Green coffee in hermetic packaging injected with CO₂. **Journal of Stored Products Research**, Oxford, v. 47, p. 341-348, 2011.

RIGUEIRA, R. J. de A. et al. Armazenamento de grãos de café cereja descascado em ambiente refrigerado. **Engenharia na Agricultura**, Jaboticabal, v. 17, n. 4, p. 323-333, 2009.

SAATH, R. et al. Alterações na composição química e sensorial de café (*Coffea arabica* L.) nos processos pós colheita. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 2, p. 96-112, 2012.

SELMAR, D.; BYTOF, G.; KNOPP, S. E. The storage of green coffee (*Coffea arabica*): decrease of viability and changes of potential aroma precursors. **Annals of Botany**, London, v. 101, n. 1, p. 31-38, 2007.

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 23, p. 1261-1265, 1980.

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

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

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

SPEER, K.; KÖLLING-SPEER, I. The lipid fraction of the coffee bean. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Piracicaba, v. 18, n. 1, p. 201-216, 2006.

SPEROTTO, F. C. S. et al. Qualidade dos grãos e da bebida do café armazenados em dois tipos de embalagens e dois tipos de processamento. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 30, n. 2, p. 210-216, 2015.

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T.; SILVA, P. G. L. Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico da polpa e da casca do abacaxi (*Ananas comosus*). **Engvista**, Niterói, v. 14, p. 172-184, ago. 2012.

THOMPSON, T. L.; PEARTT, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-589, 1968.

VENTURI, L. et al. Water absorption of freeze-dried meat at different water activities: a multianalytical approach using sorption isotherm, differential scanning calorimetry, and nuclear magnetic resonance. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 55, p. 10572-10578, 2007.

VERMA, L. R. et al. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 1, p. 296-301, 1985.

VILELA, E. R.; CHANDRA, P. K.; OLIVEIRA, G. A. de. Efeito da temperatura e umidade relativa no branqueamento de grãos de café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, n. 1, p. 31-37, 2000. Especial café.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transaction of ASAE**, Saint Joseph, v. 11, p. 668-672, 1978.

APÊNDICE A- TABELAS

Tabela 30 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos nos testes padrão de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café natural maduro, submetido a diferentes condições de secagem e armazenado por 180 dias.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado médio	
		CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$)	LK (ppm)
Umidade Relativa (UR)	3	34,8784*	139,9804*
Tempo de armazenamento (T)	3	11,1088*	383,7158*
UR x T	9	6,4431 ^{n.s.}	21,0049 ^{n.s.}
Resíduo	32	3,3042	22,7836
Total	47		
C.V. (%)		8,99	9,67

Fonte: Da autora (2018).

*Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{n.s.} Não significativo

Tabela 31 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos nos testes padrão de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café natural verde, submetido a diferentes condições de secagem e armazenado por 180 dias.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado médio	
		CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}.\text{g}^{-1}$)	LK (ppm)
Umidade Relativa (UR)	2	870,2325 ^{n.s.}	44561,3154*
Tempo (T)	3	391,9924 ^{n.s.}	229339,6780*
UR x T	6	714,8514 ^{n.s.}	11133,5031*
Resíduo	12	485,6540	2333,2483*
Total	23		
C.V. (%)		8,86	7,04

Fonte: Da autora (2018).

*Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{n.s.} Não significativo

Tabela 32 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos nos testes padrão de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos grãos de café descascado, submetido a diferentes condições de secagem e armazenado por 180 dias.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado médio	
		CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	LK (ppm)
Umidade Relativa (UR)	3	73,2861*	270,9228*
Tempo (T)	3	9,2837*	271,0580*
UR x T	9	5,1625*	9,1566*
Resíduo	32	0,8753	3,1427
Total	47		
C.V. (%)		6,26	5,34

Fonte: Da autora (2018).

*Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{n.s.} Não significativo

Tabela 33 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos nos testes padrão de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café beneficiado úmido, submetido a diferentes condições de secagem e armazenado por 180 dias.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado médio	
		CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	LK (ppm)
Umidade Relativa (UR)	2	37,3473 ^{n.s.}	37,3473 ^{n.s.}
Tempo (T)	3	88,2669*	1031,7021 *
UR x T	6	14,4215 ^{n.s.}	58,3917 ^{n.s.}
Resíduo	12	8,8659	33,6561
Total	23		
C.V. (%)		16,03	11,97

Fonte: Da autora (2018).

*Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{n.s.} Não significativo

Tabela 34 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos das coordenadas L, a e b, para grãos beneficiados do café natural maduro, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por 180 dias.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado médio		
		L	a	b
Umidade Relativa (UR)	3	7,0452*	0,0639 ^{n.s.}	2,4117*
Tempo (T)	3	111,7218*	0,2692*	1,4652 ^{n.s.}
UR x T	9	2,8198*	0,1772 ^{n.s.}	0,8800 ^{n.s.}
Resíduo	48	1,1170	0,0715	0,7560
Total	63			
C.V. (%)		2,47	15,83	4,46

Fonte: Da autora (2018).

*Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{n.s.} Não significativo

Tabela 35 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos das coordenadas L e b, para grãos beneficiados do café natural verde, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por 180 dias.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado médio	
		L	b
Umidade Relativa (UR)	3	21,6373*	6,3182*
Tempo (T)	3	45,0752*	1,5648 ^{n.s.}
UR x T	9	2,7210 ^{n.s.}	1,1827 ^{n.s.}
Resíduo	16	1,0778	1,1706
Total	31		
C.V. (%)		3,18	5,93

Fonte: Da autora (2018).

*Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{n.s.} Não significativo

Tabela 36 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos das coordenadas L, a e b, para grãos beneficiados do café descascado, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por 180 dias.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado médio		
		L	a	b
Umidade Relativa (UR)	3	9,7921*	0,0802 ^{n.s.}	7,4693 ^{n.s.}
Tempo (T)	3	75,4387*	0,0528 ^{n.s.}	4,6154 ^{n.s.}
UR x T	9	3,7162 ^{n.s.}	0,0302 ^{n.s.}	2,8975 ^{n.s.}
Resíduo	48	2,6510	0,0827 ^{n.s.}	2,9124
Total	63			
C.V. (%)		3,71	20,33	8,82

Fonte: Da autora (2018).

*Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{n.s.} Não significativo

Tabela 37 - Resumo da análise de variância dos dados obtidos das coordenadas L,a e b, para o café beneficiado úmido, submetido a diferentes condições de secagem e armazenados por 180 dias.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado médio		
		L	a	b
Umidade Relativa (UR)	2	0,3612 ^{n.s.}	0,0101 ^{n.s.}	0,1055 ^{n.s.}
Tempo (T)	3	51,8286*	0,0228 ^{n.s.}	0,1449 ^{n.s.}
UR x T	6	6,6106*	0,3224 ^{n.s.}	0,3433 ^{n.s.}
Resíduo	12	1,7199	0,0809	1,2076
Total	23			
C.V. (%)		3,04	20,49	6,16

Fonte: Da autora (2018).

*Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{n.s.} Não significativo