



**EDER PEDROZA ISQUIERDO**

**CINÉTICA DE SECAGEM DE CAFÉ NATURAL  
E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE PARA  
DIFERENTES TEMPERATURAS E UMIDADES  
RELATIVAS DO AR**

**LAVRAS-MG**

**2011**

**EDER PEDROZA ISQUIERDO**

**CINÉTICA DE SECAGEM DE CAFÉ NATURAL E SUAS RELAÇÕES  
COM A QUALIDADE PARA DIFERENTES TEMPERATURAS E  
UMIDADES RELATIVAS DO AR**

Tese apresentada à Universidade Federal de  
Lavras como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação Stricto-Sensu  
em Ciência dos Alimentos para a obtenção  
do título de Doutor

Dr. Flávio Meira Borém  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2011**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Isquierdo, Eder Pedroza.

Cinética de secagem de café natural e suas relações com a  
qualidade para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar /  
Eder Pedroza Isquierdo. – Lavras : UFLA, 2011.

157 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Flávio Meira Borém.

Bibliografia.

1. Cafés especiais. 2. Temperatura de ponto de orvalho. 3. Taxa  
de secagem. 4. Dano térmico. I. Universidade Federal de Lavras. II.  
Título.

CDD – 663.932

**EDER PEDROZA ISQUIERDO**

**CINÉTICA DE SECAGEM DE CAFÉ NATURAL E SUAS RELAÇÕES  
COM A QUALIDADE PARA DIFERENTES TEMPERATURAS E  
UMIDADES RELATIVAS DO AR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Strictu-Sensu em Ciência dos Alimentos para a obtenção do título de Doutor

APROVADA em 21 de outubro de 2011.

Dr. Ednilton Tavares de Andrade      UFF

Dr. Gerson Silva Giomo                IAC

Prof. Dr Jefferson Luiz Gomes Corrêa   UFLA

Dr. Marcelo Ribeiro Malta                EPAMIG

Dr. Flávio Meira Borém  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2011**

Aos meus pais, Antônio e Maria Helena.

Ao meu irmão, Eric.

A minha avó, Neli.

**DEDICO**

A minha esposa, Carla

**OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha esposa, Carla, pelo amor, incentivo e companheirismo.

Aos meus pais, Antônio e Maria Helena e irmão, Eric, pelo amor e apoio.

Ao professor Flávio Borém, pela valiosa orientação, amizade, incentivo e dedicação no decorrer do curso, contribuindo para o meu amadurecimento e formação profissional.

Ao programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, pela oportunidade de realizar o doutorado.

Ao Departamento de Engenharia, pela disponibilidade dos equipamentos e estrutura para a realização dos trabalhos.

Aos professores Jefferson e Ednilton, pela atenção, disponibilidade e sugestões, para a elaboração do trabalho.

Ao amigo Pedro, pela presença constante e ajuda fundamental durante a realização do trabalho.

Aos estudantes de graduação Guilherme, Diego e Renan, pela valorosa contribuição durante o trabalho.

Aos doutores Gerson e Marcelo Malta, pela disponibilidade em participar da banca e sugestões para enriquecer o trabalho.

Ao professor Renato Lima, pelas contribuições nas análises estatísticas.

Aos produtores Paulo Regina e Glycia Tibúrcio Regina e aos funcionários da Fazenda Santa Mariana, Fabinho e Hélcio, por ceder o café utilizado no experimento e ajudar no preparo das amostras.

Ao laboratorista Samuel, pela ajuda e orientação na realização das análises químicas do café.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas, José Henrique, Fabiana, Luisa, Diego, Daiane, Samuel, Caio, Ana, Janaina, Paula, Carlos Henrique, Randal e Juliana pela ajuda, amizade e convivência durante o período de doutorado.

## RESUMO

O processamento do café pela via seca, pelo qual são produzidos os cafés naturais, é o método mais utilizado no Brasil. Frequentemente, são encontrados relatos na literatura que indicam pior qualidade do café natural em relação aos cafés processados pela via úmida, tornando-se necessário investimentos em pesquisas, no Brasil, tendo em vista a produção de cafés naturais de qualidade. A secagem é um dos principais fatores que influenciam a qualidade do café natural. Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a cinética de secagem e suas relações com a qualidade do café natural. Para isso foram realizados três experimentos. No primeiro experimento, foram avaliados os efeitos de três temperaturas de bulbo seco (35 °C, 40 °C e 45 °C) e três temperaturas de ponto de orvalho (2,6 °C 10,8 °C e 16,2 °C) do ar de secagem na cinética de secagem do café natural. Os modelos de Midilli modificado e de resíduos sucessivos com dois termos foram os mais adequados para descrever o processo de secagem. A elevação da temperatura de bulbo seco e a redução da temperatura de ponto de orvalho aumentam o coeficiente de difusividade efetivo e a taxa de secagem e reduzem o tempo de secagem. No segundo experimento foram avaliados os efeitos imediatos e latentes de três temperaturas de bulbo seco (35 °C, 40 °C e 45 °C) e três taxas de secagem para cada temperatura de bulbo seco na composição química e na qualidade fisiológica e sensorial do café natural. Os dados observados permitiram concluir que: a temperatura de 35°C é recomendada para a produção de cafés naturais especiais; a temperatura de 45°C não é recomendada para a produção de cafés naturais especiais; a taxa de secagem interfere na qualidade do café natural; a elevação da taxa de secagem, para as temperaturas de 35 °C e 40 °C tem efeito negativo sobre qualidade do café natural; a qualidade do café natural é influenciada, principalmente, pelos danos térmicos na secagem com ar aquecido a 45°C e cafés naturais submetidos à temperatura de secagem de 35°C e baixas taxas de secagem apresentaram melhor qualidade em comparação com os cafés secados em leito suspenso. O terceiro experimento foi realizado com o objetivo de se estudar os efeitos da temperatura de secagem (35 °C, 40 °C e 45 °C) e do manejo da secagem, com pré-secagem em leito suspenso ou secagem completa em secador, na qualidade do café natural. Os dados observados permitiram concluir que: temperaturas de secagem superiores a 40 °C são prejudiciais à qualidade do café natural e a secagem completa em secadores mecânicos à temperaturas máximas de 40°C não prejudica a qualidade do café natural.

Palavras-chave: Taxa de secagem. Dano térmico. Temperatura de ponto de orvalho. Cafés especiais.



## ABSTRACT

The dry method, by which natural coffees are produced, is the most coffee processing method used in Brazil. Reports of poor quality of natural coffee are frequently found in the literature, becoming necessary investments in research with a view to producing natural coffees with high quality. Drying is one of the main influencing factors on the quality of natural coffee. This work was carried out with the objective to study the drying kinetics and their relationship with the quality of natural coffee. For this purpose three experiments were performed. In the first experiment, the effects of three dry bulb temperatures (35, 40 and 45 °C) and three dew point temperatures (2.6, 10.8 and 16.2 °C) of the air drying in the drying kinetics of natural coffees were evaluated. The modified Midilli and successive residues, with two terms, models were the most adequate for describing the drying process. The raise in dry bulb and reduction in dew point temperature increased the effective diffusivity coefficient and drying rate and reduced drying time. In the second experiment were evaluate the instant and latent effects of three dry bulb temperatures (35, 40 and 45°C) and three drying rates for each dry bulb temperature in the chemical composition and physiological and sensory quality of natural coffee. It can be concluded that: temperature of 35 °C is recommended for the production of specialty natural coffees; temperature of 45 °C is not recommended for the production of specialty natural coffees; the drying rate influences in the quality of the natural coffee; raising the rate of drying at temperatures of 35 and 40 °C has a negative effect on the quality of natural coffee; the quality of natural coffee is influenced mainly by the thermal damage in dry with air heated to 45 °C and natural coffees dried at a temperature of 35 °C and low drying rates showed better quality in comparison with the dried coffee on sun dried. The third experiment was evaluated with the objective to study the effects of drying temperatures (35, 40 and 45 °C) and the management of drying, (pre-drying on suspended bed and complete drying with heated air), in the quality of natural coffee. The observed data showed that: drying temperatures above 40 °C are harmful to quality of natural coffee and the complete drying in mechanical dryers to the maximum temperatures of 40 °C did not affect the quality of natural coffee.

Keywords: Drying rate. Thermal damage. Dew point temperatures. Special coffees.

## LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2		
Tabela 1	Temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho e umidade relativa do ar de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.	57
Tabela 2	Modelos matemáticos usados para predizer o fenômeno de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	59
Tabela 3	Parâmetros estatísticos obtidos para os modelos de secagem utilizados para descrever a cinética de secagem de frutos de café. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	64
Tabela 4	Coefficientes do modelo de Midilli modificado ajustados aos dados observados da cinética de secagem em dos frutos de café. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	70
Tabela 5	Valores do tempo de meia resposta (TMR) e do coeficiente de difusão efetivo ( $D_{eff}$ ) dos frutos de café, em função das combinações temperatura de bulbo seco (Tbs) e temperatura de ponto de orvalho (Tpo) do ar de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	71
CAPÍTULO 3		
Tabela 1	Teores de água, tempo de secagem, taxa de secagem média e máxima do café natural, em função da temperatura de bulbo seco e temperatura do ponto de orvalho do ar de secagem. UFLA, Lavras, 2011.....	93
Tabela 2	Valores médios de acidez titulável total (ATT), açúcares totais (AT), açúcares não-redutores (ANR), ácidos graxos livres palmítico (C16:0), esteárico (C18:0), oleico (C18:1), linoleico (C18:2) e ácidos graxos livres totais (AGLT) do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e secado completamente em terreiro, analisado logo após a secagem e após sete meses de armazenamento. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	96
Tabela 3	Condutividade elétrica do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e seco completamente em terreiro, analisado logo após a secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	99
Tabela 4	Condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e seco completamente em terreiro, analisado após sete meses de armazenamento. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	100

Tabela 5	Valores médios de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	101
Tabela 6	Valores médios de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	101
Tabela 7	Teores médios de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, logo após a secagem, em função da taxa de redução de água, dentro de cada nível de temperatura. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	102
Tabela 8	Teores médios de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da taxa de redução de água, dentro de cada nível de temperatura. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	103
Tabela 9	Aspectos sensoriais do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e secado completamente em terreiro, analisado logo após a secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	105
Tabela 10	Aspectos sensoriais do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e seco completamente em terreiro, analisado após sete meses de armazenamento. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	105
Tabela 11	Notas médias de fragrância, sabor, acidez, corpo e nota total do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	107
Tabela 12	Notas médias de cada atributo e nota total da análise sensorial do café natural, logo após a secagem, em função da taxa de secagem, dentro de cada nível de temperatura. UFLA, Lavras, MG, 2011	107
Tabela 13	Notas médias de cada atributo e nota total da análise sensorial do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da taxa de secagem, dentro de cada nível de temperatura. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	108
 CAPÍTULO 4		
Tabela 1	Tempo de secagem, taxa de secagem média e máxima do café natural em função da temperatura do ar de secagem e da pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, 2011.....	125

Tabela 2	Valores médios de açúcares redutores (AR) e condutividade elétrica (CE) do café natural, antes do armazenamento, para cada tratamento de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011...	128
Tabela 3	Valores médios de acidez titulável total (ATT), açúcares redutores (AR), condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, após sete meses de armazenamento, para cada tratamento de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	129
Tabela 4	Valores de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	130
Tabela 5	Teores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura de secagem e do período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	131
Tabela 6	Teores médios de açúcares redutores do café natural, logo após a secagem, em função da pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	132
Tabela 7	Teores médios açúcares redutores, após sete meses de armazenamento, em função temperatura de secagem e do período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	132
Tabela 8	Teores médios de acidez titulável total (ATT) do café natural, logo após a secagem, em função temperatura de secagem e do período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	133
Tabela 9	Teores médios de acidez titulável total (ATT) do café natural, após sete meses de armazenamento, em função temperatura de secagem e do período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	134
Tabela 10	Notas médias da análise sensorial do café natural, logo após a secagem, para cada tratamento de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	135
Tabela 11	Notas médias da análise sensorial do café natural, após sete meses de armazenamento, para cada tratamento de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	135

Tabela 12	Notas médias da análise sensorial do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	137
Tabela 13	Notas médias da análise sensorial do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	137
Tabela 14	Notas médias da análise sensorial do café natural, logo após a secagem, em função do período de pré-secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	139

## LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2		
Figura 1	Sistema de secagem utilizado para a secagem mecânica do café. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	55
Figura 2	Valores de razão de umidade (adimensional) observados e estimados pelo modelo de Midilli modificado para a secagem de frutos de café. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	68
Figura 3	Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli modificado para a secagem de frutos de café, em função do tempo. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	69
Figura 4	Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar de secagem dos frutos de café. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	73
CAPÍTULO 3		
Figura 1	Taxa de secagem de frutos de café, em relação ao teor de água, em função da temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	94
Figura 2	Cromatograma exemplo do perfil de ácidos graxos livres do café natural. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	97
CAPÍTULO 4		
Figura 1	Taxa de redução de água de frutos de café em função da temperatura do ar de secagem. (A) sem pré-secagem em terreiro; (B) com pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011.....	126

## SUMÁRIO

	<b>CAPÍTULO 1</b> Introdução geral.....	17
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	21
<b>2.1</b>	<b>Cafés especiais</b> .....	21
<b>2.2</b>	<b>Colheita e processamento do café</b> .....	22
<b>2.3</b>	<b>Secagem do café</b> .....	23
<b>2.3.1</b>	<b>Teoria da Secagem</b> .....	24
<b>2.3.2</b>	<b>Pré-secagem em terreiro</b> .....	25
<b>2.3.3</b>	<b>Taxa de Secagem</b> .....	26
<b>2.3.3.1</b>	<b>Efeito da taxa de secagem na qualidade do café</b> .....	28
<b>2.3.4</b>	<b>Modelagem matemática e simulação da secagem</b> .....	31
<b>2.4</b>	<b>Avaliação da qualidade do café</b> .....	33
<b>2.4.1</b>	<b>Análise sensorial</b> .....	33
<b>2.4.2</b>	<b>Análises de condutividade elétrica e lixiviação de potássio</b> ..	34
<b>2.4.3</b>	<b>Análises químicas</b> .....	35
<b>2.4.3.1</b>	<b>Acidez titulável total</b> .....	35
<b>2.4.3.2</b>	<b>Açúcares totais, redutores e não-redutores</b> .....	36
<b>2.4.3.3</b>	<b>Ácidos graxos livres</b> .....	37
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	40
	<b>CAPÍTULO 2</b> Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar.....	48
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	51
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	53
<b>2.1</b>	<b>Obtenção e descrição da matéria-prima</b> .....	53
<b>2.2</b>	<b>Sistema de secagem</b> .....	54
<b>2.3</b>	<b>Procedimento e delineamento experimental</b> .....	56
<b>2.4</b>	<b>Análise dos dados e modelos de secagem</b> .....	57
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	63
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	75
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	76
	<b>CAPÍTULO 3</b> Efeitos imediatos e latentes da temperatura e taxa de secagem na qualidade do café natural.....	79
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	82
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	84
<b>2.1</b>	<b>Obtenção e descrição da matéria-prima</b> .....	84
<b>2.2</b>	<b>Delineamento experimental e análise estatística</b> .....	84
<b>2.3</b>	<b>Descrição dos secadores e do processo de secagem</b> .....	85
<b>2.4</b>	<b>Caracterização da qualidade do café natural</b> .....	87

2.4.1	Análise sensorial.....	88
2.4.2	Análises químicas.....	89
2.4.3	Condutividade elétrica e Lixiviação de potássio.....	90
2.4.4	Perfil de ácidos graxos livres.....	90
2.4.4.1	Extração dos ácidos graxos livres.....	91
2.4.4.2	Metilação dos ácidos graxos livres.....	91
2.4.4.3	Cromatografia Gasosa.....	91
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	93
4	<b>CONCLUSÕES</b> .....	113
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	114
	<b>CAPÍTULO 4 Efeitos imediatos e latentes da pré-secagem em terreiro em combinação com a temperatura do ar de secagem na qualidade do café natural</b> .....	117
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	120
2	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	122
2.1	Obtenção e descrição da matéria-prima.....	122
2.2	Descrição das secadores e do processo de secagem.....	122
2.3	Delineamento experimental e análise estatística.....	123
2.4	Determinação das taxas de secagem.....	124
2.5	Caracterização da qualidade do café natural.....	124
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	125
4	<b>CONCLUSÕES</b> .....	141
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	142
	<b>APÊNDICES</b> .....	144



## **CAPÍTULO 1**

### **Introdução geral**

## 1 INTRODUÇÃO

O café é uma importante fonte de renda para a economia brasileira, sendo o segundo produto na pauta das exportações agrícolas do Brasil. O país é o maior exportador e produtor mundial desse produto, com produção estimada na safra 2011 de 2,61 milhões de toneladas de café beneficiado (mais de 30% da produção mundial), sendo que, deste volume, 1,93 milhão de toneladas são da espécie *Coffea arabica* L. (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2011).

Embora seja o líder no mercado mundial, o Brasil ainda tem uma imagem internacional de fornecedor de grande quantidade de cafés comuns e de baixo preço utilizados na composição de blends, enquanto países como Quênia, Colômbia, Guatemala, Costa Rica, entre outros, são reconhecidos e valorizados pela qualidade de seus cafés.

Considerando-se que cafés especiais podem alcançar valores de venda de até 50% acima do café *commodity* e que o mercado de cafés especiais vem crescendo, aproximadamente, 10% ao ano, enquanto o consumo mundial de café cresce 3% ao ano, verifica-se a importância da qualidade para agregação de valor ao café brasileiro.

O processamento do café pela via seca, pelo qual são produzidos os cafés naturais ou café em coco, é o método mais utilizado no Brasil. Em geral, os cafés produzidos pela via seca apresentam atributos sensoriais que os distinguem dos cafés produzidos pela via úmida, como menor acidez e maior corpo, sendo ingrediente essencial para ligas de café expresso (ILLY; VIANI, 1995).

No entanto, frequentemente, são encontrados relatos na literatura que indicam pior qualidade do café natural em relação aos cafés processados pela via úmida (descascado, despulpado e desmucilado). As explicações para essa

qualidade inferior referem-se, principalmente, à ausência de cuidados na colheita, presença de frutos verdes, brocados e fermentados. Além disso, a presença da casca e o elevado teor de açúcares da mucilagem causam uma secagem mais lenta, aumentando os riscos de ocorrerem fermentações que prejudiquem a qualidade do café. Essa lentidão da secagem aumenta também a demanda por extensas áreas de terreiros e volume de secadores e o uso intensivo de mão de obra, aumentando os custos do processamento do café natural.

Por outro lado, a colheita do café com baixa proporção de frutos verdes, seguida pela separação hidráulica, para a retirada de frutos sobremaduros, brocados, chochos, etc., e por uma secagem cuidadosa, sem a ocorrência de fermentações, permite a produção de cafés naturais de excelente qualidade.

O Brasil possui condições favoráveis para aumentar sua participação no mercado de cafés especiais, devido à diversidade de seu parque cafeeiro e do elevado nível tecnológico da cafeicultura nacional. No entanto, para tornar isso realidade, são necessários investimentos em pesquisas científicas e tecnológicas, tendo em vista a produção de cafés naturais de qualidade.

A secagem é um dos principais fatores que influenciam a qualidade do café natural. Acredita-se que os riscos da ocorrência de fermentações podem ser reduzidos com a utilização de maiores taxas de redução de água dos frutos durante a secagem. No entanto, a tecnologia disponível atualmente para secagem de café só permite o aumento da taxa de secagem pelo aumento da temperatura. Porém, temperaturas da massa de café acima de 40°C causam danos térmicos que depreciam a qualidade do café natural (OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009).

O desenvolvimento de tecnologias de secagem que proporcionem uma rápida desidratação dos frutos sem o uso de temperaturas elevadas de secagem é uma alternativa promissora, do ponto de vista da qualidade do café natural, pois reduz significativamente o risco da ocorrência de fermentações sem causar

danos térmicos aos grãos. Essa elevação da taxa de redução de água dos frutos pode ser obtida pelo uso de ar de secagem com umidades relativas extremamente baixas e temperaturas reduzidas, abaixo da faixa normalmente recomendada para a secagem de café natural.

Este trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar os efeitos da taxa de secagem e da temperatura do ar de secagem na qualidade do café natural, bem como estudar a cinética de secagem para diferentes temperaturas de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho.

Os objetivos específicos foram:

Avaliar a cinética de secagem do café natural e ajustar modelos matemáticos aos valores experimentais em função da temperatura de bulbo seco e da temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem;

Avaliar a qualidade do café natural em função da temperatura do ar e da taxa de secagem;

Avaliar o perfil de ácidos graxos livres do café natural em função da temperatura do ar e da taxa de secagem;

Avaliar a influência da pré-secagem em ao sol em leito suspenso na qualidade do café natural;

Comparar a qualidade do café natural submetido aos diferentes tratamentos de secagem mecânica com o café natural secado completamente ao sol em leito suspenso.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Cafés especiais

A qualidade da bebida do café é considerada um critério consolidado para se atingir os mercados que melhor remuneram o produto. A demanda por cafés especiais no mercado mundial cresce em proporções muito maiores do que os cafés comuns. Além disso, o café especial pode ter um valor de venda de até 50% acima do café *commodity* (SCARAMUZZO, 2007). Diante disso, verifica-se a importância dos cafés especiais para a agregação de valor ao café brasileiro.

Os cafés especiais não podem apresentar qualquer tipo de defeito, obtendo, no mínimo, 80 pontos na escala de classificação de cafés especiais da Associação Americana de Cafés Especiais (SCAA, sigla em inglês), o que equivale a um café de bebida mole, de acordo com a Instrução Normativa nº 8 (BRASIL, 2003), além de possuir qualidade diferenciada e elevado potencial de expressão de aroma e sabor (GIOMO; BORÉM, 2011).

O conceito de café especial está intimamente ligado ao prazer que a bebida pode proporcionar ao consumidor por meio de algum atributo específico, processo de produção ou serviço a ele associado. Portanto, diferencia-se dos cafés comuns por características como qualidade superior da bebida, aspecto dos grãos, forma de colheita, tipo de preparo, história, origem dos plantios, cultivares e quantidades limitadas, entre outras. A qualidade e a complexidade da bebida é, certamente, o principal diferencial de um café especial, o qual é tanto mais valorizado quanto mais rara e exótica for a sensação de prazer e percepção sensorial proporcionada ao consumidor (GIOMO; BORÉM, 2011). Segundo Paiva (2005), um café especial é sinônimo de café fino ou de qualidade superior que apresente alguma característica que o diferencie dos outros, como o

sabor remanescente floral, cítrico ou achocolatado, entre outros, o que contribui para agregar valor ao produto.

## **2.2 Colheita e processamento do café**

No Brasil, o método de colheita do café predominante é por derriça completa, pelo qual se obtém um produto com elevado teor de água e bastante heterogêneo, constituído de frutos maduros (cereja), imaturos (verde), e sobremaduros (passa e seco), além de folhas, ramos, paus, pedras, terra, etc. Logo após a colheita, esses frutos devem seguir para o processamento, não devendo ser armazenados por períodos superiores a 8 horas, sob pena de ocorrerem fermentações indesejáveis e a formação do defeito ardido (BRANDO, 2004).

O processamento deverá promover a separação dos frutos conforme seu estágio de maturação, evitando-se possíveis comprometimentos na qualidade da bebida e facilitar as operações posteriores, como, por exemplo, a secagem.

Basicamente, o café pode ser processado por dois métodos: via seca e via úmida. O processamento por via seca consiste em secar os frutos na sua forma integral, ou seja, com exocarpo (casca), produzindo frutos secos, conhecidos como café em coco ou natural. Esse método é largamente utilizado em regiões tropicais onde há uma estação seca característica durante o período de colheita, sendo o método mais utilizado no Brasil. Na via úmida são produzidos os cafés em pergaminho (descascado, despoldado e desmucilado) (BORÉM, 2008).

O tipo de processamento do café é variável entre os produtores, dependendo, principalmente, dos aspectos climáticos, tecnológicos, econômicos e exigências do mercado consumidor quanto às características do produto (BORÉM, 2008).

Independente do método de processamento, via seca ou via úmida, é recomendado que o café seja submetido à separação hidráulica em lavadores, de acordo com sua densidade, para separar os frutos maduros e verdes, dos frutos sobremaduros, brocados, chochos, etc., resultando em lotes mais homogêneos no que se refere ao teor de água e ao estágio de maturação.

Cafés processados por via úmida e por via seca apresentam características diferentes na qualidade. Geralmente, os cafés naturais originam bebidas mais encorpadas e doces e com menor acidez, sendo ingrediente essencial para ligas de café expresso. Encontram-se, frequentemente, na literatura trabalhos que associam os cafés processados por via úmida a bebidas superiores, em comparação com os cafés processados por via seca (ILLY; VIANI, 1995; VILLELA, 2002; VINCENT, 1987; WILBAUX, 1963). Por outro lado, a colheita do café com baixa proporção de frutos verdes, seguida pela separação hidráulica e por uma secagem cuidadosa, sem a ocorrência de fermentações, permite a produção de cafés naturais de excelente qualidade (BORÉM, 2008).

### **2.3 Secagem do café**

Os frutos do café, geralmente, são colhidos com teor de água variando entre 30% a 65% (bu), dependendo do seu estágio de maturação, estando sujeitos à rápida deterioração. Dessa forma, o café deverá ser necessariamente secado antes de ser armazenado. A secagem é a etapa da pós-colheita 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).

A manutenção da qualidade pela secagem baseia-se no fato de que, com a redução da quantidade de água disponível, serão reduzidas a atividade de água,

a atividade metabólica e a velocidade das reações químicas e bioquímicas no produto, bem como o desenvolvimento de microrganismos, favorecendo o armazenamento mais seguro por longos períodos (CHRISTENSEN; KAUFMANN, 1974).

### **2.3.1 Teoria de secagem**

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Durante a 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 ( $P_g$ ) seja maior do que a pressão parcial do vapor d'água no ar de secagem ( $P_{ar}$ ) (PABIS; JAYAS; CENKOWSK, 1998).

O processo de secagem de um produto, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, pode ser dividido em um período de velocidade constante e outro de velocidade decrescente.

O período de velocidade constante ocorre nas primeiras horas de secagem dos cafés maduro e verde. Nesse período, o teor de água do produto é suficiente para mantê-la na superfície do mesmo e toda energia transferida ao produto pelo ar é utilizada na evaporação da água e a temperatura da massa de grãos se mantém igual à temperatura do ar de secagem saturado, temperatura de bulbo úmido. No período de velocidade decrescente de secagem, a taxa interna de transporte de água é menor do que a evaporação superficial. Dessa forma, a transferência de calor do ar para o produto não é compensada e,



consequentemente, a temperatura do grão aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem. Nesta fase ocorrem os maiores riscos de perda de qualidade por danos térmicos (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

### **2.3.2 Pré-secagem em terreiro**

A pré-secagem em terreiro tem sido recomendada com a finalidade de reduzir o gasto com energia na secagem mecânica. Em alguns estudos foi demonstrado que o período de pré-secagem tem influência também na qualidade final do produto.

Borém et al. (2006) e Marques et al. (2008), estudando a secagem de café cereja descascado, verificaram que o café submetido a três dias de pré-secagem apresentou menores valores de lixiviação de potássio e melhor qualidade de bebida, em relação ao café submetido a um dia de pré-secagem.

Borém et al. (2006) observaram, ainda, que os cafés submetidos ao período de três dias de pré-secagem e, consequentemente, menores valores de taxa de secagem no início da secagem mecânica apresentaram maiores valores de açúcares totais e não-redutores, quando comparados com os cafés submetidos a apenas um dia de pré-secagem. Esses resultados estão de acordo com os estudos realizados por Guimarães et al. (2002) que afirmam que baixas velocidades de secagem no início da secagem podem favorecer o acúmulo de sacarose, que tem sido proposto como um fator para a estabilização de membranas e está associado com a aquisição de tolerância à dessecação.

### 2.3.3 Taxa de secagem

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, umidade inicial do produto e tempo de exposição do café à temperatura de secagem, entre outros. A falta do controle desses fatores pode comprometer a qualidade do produto final.

Segundo Burmester e Eggers (2010), a taxa de secagem é influenciada, principalmente, pela temperatura do ar de secagem. Temperaturas mais altas tornam a secagem mais rápida e, portanto, mais econômica.

Assim como a temperatura, o fluxo de ar influencia a taxa de secagem e deve ser levado em consideração para uma maior eficiência da operação. Fluxos inferiores a  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  podem prolongar excessivamente o tempo de secagem, ao passo que fluxos acima de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  podem tornar o processo antieconômico (VILLELA; PESKE, 2003).

Guida e Vilela (1996) avaliaram o efeito de dois fluxos de ar ( $16$  e  $63 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) na secagem estacionária de café despulpado, utilizando temperatura de  $70^\circ\text{C}$  e verificaram que o aumento do fluxo de ar reduziu em mais de 50% o tempo total de secagem. Porém, a utilização do menor fluxo produziu cafés com melhor aspecto, indicando que o aumento do fluxo de ar com consequente aumento da taxa de secagem influencia negativamente a aparência do grão.

Segundo Burmester e Eggers (2010), o fluxo de ar só tem influência na taxa de secagem enquanto o café estiver com umidades elevadas, logo no início da secagem. Essa afirmação é ratificada por Ribeiro et al. (2003) que, estudando a cinética de secagem de café cereja descascado, observaram que, independentemente da temperatura do ar de secagem ( $40^\circ\text{C}$ ,  $45^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ ) o

aumento do fluxo de ar de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  para  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  tem efeito significativo na taxa de redução de água apenas na primeira hora de secagem. Os autores observaram, ainda, que o fluxo de ar não teve influência na qualidade sensorial da bebida.

Outro fator que afeta a taxa de redução de água, na secagem mecânica com ar aquecido, é o teor de água inicial do café e este, por sua vez, é influenciado pelo tempo de pré-secagem em terreiro. Borém et al. (2006) observaram que cafês submetidos a um período de três dias de pré-secagem apresentam menores teores de água e, conseqüentemente, menores taxas de redução de água, quando comparados com cafês submetidos a apenas um dia de pré-secagem.

A tecnologia disponível atualmente para secagem de café só permite que a taxa de secagem seja aumentada com o aumento da temperatura, porém, em diversas pesquisas tem sido demonstrado que, quando se visa à produção de cafês de qualidade superior, a temperatura da massa de café não pode ultrapassar  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  (BORÉM et al., 2006; BORÉM; MARQUES; ALVES, 2008; OLIVEIRA, 2010; SAATH et al., 2010; TAVEIRA, 2009).

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 através 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 (FORTES et al., 2006; KRZYZANOWSKI; WEST; FRANÇA NETO, 2006; ONDIER; SIEBENMORGEN; MAUROMOUSTAKOS, 2010).

Ondier, Siebenmorgen e Mauromoustakos (2010) estudaram a taxa de redução de água de grãos de arroz com teor de água inicial entre 17,5 e 19,6 (bu) submetidos à secagem com baixas temperaturas ( $26^\circ\text{C}$ ,  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $34 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e umidade relativa do ar entre 19% e 47%. Os autores observaram que, para uma

mesma temperatura, a redução da umidade relativa reduziu significativamente o tempo de secagem e que quanto menor a temperatura, maior foi o efeito da umidade relativa no tempo de secagem. A qualidade do arroz, avaliada em função do rendimento de grãos inteiros e da coloração dos grãos, não foi afetada negativamente pelo aumento da taxa de secagem, indicando o uso dessa técnica de desumidificação do ar para a secagem de arroz.

### **2.3.3.1 Efeito da taxa de secagem na qualidade do café**

A taxa de secagem tem efeito significativo na qualidade dos grãos e sementes. Elevadas taxas de secagem podem causar descoloração e manchas, desenvolvimento de trincas e rupturas nos grãos, além de causar danos que afetam a qualidade fisiológica de sementes, como a desorganização das membranas celulares, comprometendo sua germinação e vigor (GUIMARÃES et al., 2002). Por outro lado, taxas de secagem extremamente baixas nas primeiras horas de secagem do café maduro em terreiro, seja por condições ambientais desfavoráveis (tempo úmido e nublado), seja pelo manejo inadequado, como o uso de camadas espessas de café, podem proporcionar a ocorrência de fermentações indesejáveis e o desenvolvimento de microrganismos que vão depreciar a qualidade do café (BORÉM et al., 2006).

Borém et al. (2006) avaliaram a qualidade do café submetido a diferentes temperaturas (40 °C, 45 °C e 50°C), fluxos de ar (20 e 30 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>) e tempo de pré-secagem em terreiro (um e dois dias) e observaram que quanto maior a temperatura e o fluxo do ar de secagem e menor o tempo de pré-secagem em terreiro, maior é a taxa de secagem e maiores são os danos sofridos pelas membranas celulares do endosperma do café, indicados por maiores valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio. Esses resultados

indicam que o aumento da taxa de secagem acima de determinados valores tem efeito negativo sobre a qualidade do café.

A avaliação fisiológica dos grãos de café é uma importante ferramenta para avaliar a qualidade de sua bebida. Bytof et al. (2007) e Selmar et al. (2004) observaram alterações bioquímicas durante o processamento, relacionadas ao metabolismo da germinação, cuja extensão depende do tratamento, se via úmida ou via seca. Oliveira (2010) e Taveira (2009) observaram que a secagem com temperaturas do ar superiores a 40 °C é prejudicial tanto para a qualidade fisiológica quanto a qualidade sensorial de cafés naturais e despulpados.

A análise fisiológica do café durante a pós-colheita pode auxiliar na elucidação dos eventos que ocorrem nos grãos durante essas etapas, as quais resultarão em diferentes composições químicas e, portanto, em diferentes qualidades de bebida. O efeito da taxa de secagem na qualidade sensorial do café tem sido pouco estudado. Por outro lado, são encontrados, na literatura, estudos nos quais foi avaliado o efeito da taxa de secagem sobre a qualidade fisiológica de sementes de café e de outras espécies.

Um dos mecanismos responsáveis pela aquisição de tolerância à dessecação em sementes ortodoxas é o acúmulo de açúcares não redutores, como a sacarose e oligossacarídeos, como a estaquiase e a rafinose, os quais podem estabilizar membranas e proteínas em sementes secas (WOLKERS et al., 1998) ou promovem a formação de uma fase vítrea no citoplasma (WILLIAMS; LEOPOLD, 1995). Esse acúmulo de açúcares, segundo Guimarães et al. (2002), pode ser intensificado quando os frutos de café são submetidos à secagem lenta.

Poucos estudos têm focado o uso combinado de baixas temperaturas e baixas umidades relativas do ar de secagem e o seu impacto sobre a qualidade do café.

Afonso Júnior et al. (2006) estudaram os efeitos da combinação entre temperatura (30 °C, 40 °C, 50 °C e 60 °C) e umidade relativa (20% e 40%) do ar

de secagem na qualidade fisiológica de sementes de cafeeiro durante o armazenamento. Esses autores observaram que a germinação e o vigor das sementes de café diminuem com a redução da umidade relativa e com o aumento da temperatura do ar de secagem e, ainda, com o período de armazenamento; as temperaturas de 50 °C e 60 °C foram prejudiciais à qualidade das sementes, principalmente para a umidade relativa mais baixa (20%); as sementes secas à temperatura de 30 °C e de 40 °C não apresentaram diferenças significativas entre si na qualidade fisiológica, logo depois da secagem, apresentando elevados valores de germinação e vigor.

Estudos com outras espécies também indicam os efeitos negativos de elevadas temperaturas e taxas de secagem. Christ, Corrêa e Alvarenga (1997) avaliaram o efeito da temperatura (30 °C, 40 °C, 50 °C e 60° C) e da umidade relativa (30%, 40%, 50% e 60%) do ar de secagem sobre a taxa de secagem e a qualidade fisiológica das sementes de canola, pelos testes de germinação e primeira contagem. Os autores concluíram que houve efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a taxa de secagem e sobre a germinação e o vigor das sementes, tendo a combinação de 30 °C de temperatura com 60% de umidade relativa do ar de secagem, ou seja, a menor taxa de secagem, sido a que proporcionou melhores valores de germinação e vigor.

Rosa et al. (2004), trabalhando com sementes de milho colhidas em espiga, com teores de água próximos ao da maturidade fisiológica, entre 34% e 42% (bu), observaram que as sementes foram tolerantes à temperatura de 35°C e intolerantes à temperatura de 50°C. No entanto, quando essas sementes foram submetidas à temperatura de secagem de 35°C, nas fases iniciais de desidratação, gradativamente, à medida que perderam água, adquiriram tolerância à temperatura de 50°C, tendo atingido a tolerância máxima com teores de água na faixa de 25% a 28% (bu).

O efeito da secagem, às vezes, pode ser imediato, verificado logo após a operação, ou latente, verificado somente após determinado período de armazenamento. A composição química, a qualidade fisiológica e as características sensoriais do café podem sofrer alterações durante o armazenamento, dependendo da temperatura e da umidade relativa do ambiente e da forma de acondicionamento dos grãos. Essa depreciação pode ser observada pela redução do teor de açúcares, o aumento da condutividade elétrica e da lixiviação de potássio e a redução da qualidade sensorial, entre outros. Essas alterações dependerão também das condições iniciais do café, ou seja, da forma de processamento e secagem. Grãos que sofreram maiores danos mecânicos e/ou térmicos durante as etapas de processamento e secagem sofrerão alterações químicas, fisiológicas e sensoriais mais intensas (AFONSO JÚNIOR et al., 2006; CORADI et al., 2007).

#### **2.3.4 Modelagem matemática e simulação da secagem**

O estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial podem ser feitos por simulação matemática, cujo princípio se fundamenta na representação da secagem de sucessivas camadas delgadas do produto com a utilização de um modelo matemático que represente satisfatoriamente a redução da água contida no produto (ANDRADE; BORÉM, 2008).

Numerosos modelos têm sido propostos para descrever a taxa de redução de água durante a secagem em camada fina de materiais biológicos (ERBAY; ICIER, 2010). Estes estudos são fundamentais no desenvolvimento de modelos para simulação matemática da secagem de produtos agrícolas. Uma equação descrevendo a taxa de secagem de uma camada fina é necessária para simulação de secagem em camada espessa porque os modelos de simulação são,

geralmente, baseados no pressuposto de que a camada espessa é composta por uma série de camadas finas (KASHANINEJAD et al., 2007). Na literatura são citados vários métodos (teóricos, semiempíricos e empíricos) para se analisar a secagem de produtos higroscópicos (BURMESTER; EGGERS, 2010; DI SCALA; CRAPISTE, 2008; HERNÁNDEZ-DÍAZ et al., 2008; NILMONT et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010; PUTRANTO et al., 2011).

Os métodos teóricos, além das condições externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, consideram também os mecanismos internos de transferência de energia e massa, e seus efeitos. A literatura cita como possíveis mecanismos de transporte de água em produtos capilares porosos higroscópicos, como a maioria dos produtos agrícolas: difusão de líquido, difusão de vapor, difusão capilar, difusão na superfície e difusão térmica ou, ainda, a combinação desses mecanismos. Os modelos teóricos mais utilizados para simular a secagem de produtos agrícolas têm sido aqueles baseados na teoria da difusão líquida, em que a segunda lei de Fick tem sido utilizada por estabelecer a difusão de água, em termos do gradiente de concentração (ERBAY; ICIER, 2010). Em geral, o coeficiente de difusão é considerado constante ou linearmente dependente da temperatura, podendo essa relação ser expressa por meio do modelo de Arrhenius (FORTES; OKOS, 1980).

Os métodos semiempíricos e empíricos de análise do processo de secagem, geralmente, baseiam-se nas condições externas ao produto; entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e água no interior dos grãos. Esses métodos baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa, presumindo-se que, durante a secagem, as condições são isotérmicas e que a transferência de água se restringe à superfície do produto (ANDRADE; BORÉM, 2008).

Na maioria dos casos, os modelos empíricos e semiempíricos, devido à facilidade de seu uso, têm se mostrado como melhores opções para representar o



processo de secagem de produtos agrícolas, apesar de sua validade estar restrita às faixas de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Conforme as condições do processo de secagem, diferentes modelos podem ser ajustados para descrever adequadamente a cinética de secagem de produtos capilares porosos higroscópicos. Os modelos de Lewis, de Page, de Thompson, de Midilli Modificado, de Verna, de resíduos sucessivos e de Henderson e Pabis modificado têm sido ajustados com frequência para prever o comportamento da secagem de sementes e frutos (AKPINAR, 2006; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA et al., 2010; CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2006; GONELI et al., 2009; KASHANINEJAD et al., 2007; MOHAPATRA; RAO, 2005).

## **2.4 Avaliação da qualidade do café**

A qualidade do café é determinada, principalmente, pelo seu sabor e aroma formados durante a torração a partir de compostos químicos presentes no grão cru. Porém, a presença desses precursores no grão cru depende de fatores genéticos, ambientais e tecnológicos, como os métodos de processamento e secagem (FARAH et al., 2006; MALTA; CHAGAS; OLIVEIRA, 2003).

### **2.4.1 Análise sensorial**

Tradicionalmente, os cafés *commodities* são classificados pela prova de xícara, seguindo as recomendações da Instrução Normativa n° 8 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (BRASIL, 2003), em bebida estritamente mole, mole, apenas mole, dura, riado, rio e rio zona. Contudo, como

não há um critério uniforme ou padronização de procedimentos para a sua realização, especialmente quanto a torra do café, esse tipo de avaliação sensorial apresenta algumas limitações, não sendo adequado para a análise sensorial de cafés especiais (GIOMO; BORÉM, 2011).

Na avaliação sensorial de cafés especiais, além da nota global, são importantes as pontuações obtidas em cada um dos atributos sensoriais que compõem a qualidade da bebida (GIOMO; BORÉM, 2011). Dentre as metodologias disponíveis para análise sensorial de cafés destaca-se o método da Specialty Coffee Association of América (SCCA), elaborado a partir da sistematização de avaliação sensorial proposta por Lingle (2001). Nesse método, os atributos são agrupados em duas categorias, sendo uma subjetiva, representada pela fragrância/aroma, sabor, sabor residual, acidez, corpo, equilíbrio e impressão global, que são pontuados segundo sua qualidade em uma escala de 6 a 10 pontos, com intervalos de 0,25 pontos e outra objetiva, representada pela uniformidade, doçura e xícara limpa (ausência de defeitos). Os atributos objetivos são pontuados em uma escala de 0 a 10 pontos, sendo atribuídos 2 pontos para cada xícara que apresentar normalidade quanto à uniformidade, doçura e xícara limpa, sendo avaliadas 5 xícaras por amostra (GIOMO; BORÉM, 2011).

#### **2.4.2 Análises de condutividade elétrica e lixiviação de potássio**

Durante a secagem do café podem ocorrer alterações fisiológicas que comprometem a qualidade da bebida. Essas alterações podem ser indicadas pelos testes de condutividade elétrica e lixiviação de potássio que têm sido utilizados em várias pesquisas como indicadores consistentes da integridade de membranas (CORADI et al., 2007; ISQUIERDO, 2008; MARQUES et al., 2008; OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009).

Grãos com membranas mal estruturadas, desorganizadas e danificadas, em consequência de altas taxas de secagem provocadas por elevadas temperaturas, lixiviam maior quantidade de solutos quando são imersos em água, apresentando maiores valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio (KRZYZANOWSKY; FRANÇA NETO; HENNING, 1991; PRETE, 1992).

### **2.4.3 Análises químicas**

Durante a pós-colheita do café podem ocorrer alterações na composição química dos grãos, as quais resultarão em diferentes qualidades de bebida.

#### **2.4.3.1 Acidez titulável total**

A acidez titulável total em grãos de café tem sido apontada como um bom indicativo da qualidade do produto, podendo variar de acordo com os níveis de fermentação ocorridos nos grãos, o número de defeitos e também com o estado de maturação dos mesmos. A acidez titulável elevada, normalmente, está associada à pior qualidade da bebida por causa da ocorrência de fermentações indesejáveis e do aumento do número de defeitos (FRANCA et al., 2005).

Normalmente, a temperatura de secagem não apresenta diferenças significativas na acidez titulável total do café. Por outro lado, cafés processados pela via seca apresentam valores de acidez titulável total maiores, quando comparados aos cafés em pergaminho (CORADI et al., 2007; TAVEIRA, 2009). Esse fato pode ser explicado pela presença da casca e da mucilagem no café natural, que constituem uma barreira para a saída da água, reduzindo a velocidade da secagem. Além disso, a presença da mucilagem rica em açúcares

apresenta-se como um substrato para o desenvolvimento de microrganismos e ocorrência de fermentações indesejadas (VILLELA, 2002).

### 2.4.3.2 Açúcares totais, redutores e não-redutores

Os teores de açúcares redutores e não-redutores possuem uma associação positiva com a qualidade do café. Esses compostos participam de importantes reações químicas que ocorrem durante a torração, como a reação de Maillard e ou a caramelização que originam compostos responsáveis pela formação da cor, do sabor e do aroma peculiar da bebida (BORÉM et al., 2006; CAMPA et al., 2004).

Estudos indicam que as operações pós-colheita também exercem influência no teor de açúcares. Sabe-se que a taxa de secagem pode exercer influência na quantidade e na proporção dos diversos tipos de açúcares em grãos de café. Marques et al. (2008) observaram redução nos teores de açúcares não-redutores, com o aumento da temperatura de 40 °C para 60 °C. Já Borém et al. (2006) verificaram redução nos valores de açúcares totais em função da elevação da temperatura. De modo geral, a secagem lenta favorece o acúmulo de açúcares de maior peso molecular, como os oligossacarídeos, em detrimento da quantidade de açúcares redutores (ROSA et al., 2004).

Knopp, Bytof e Selmar (2006), estudando o efeito de processamento via seca e via úmida (café despulpado por fermentação biológica) sobre o teor de açúcares, encontraram menores teores de frutose e glicose nos cafés processados pela via úmida e atribuíram isso ao processo de fermentação anaeróbica ocorrida no endosperma do café e à participação da glicose em outros processos metabólicos durante o processo de fermentação. Os autores não encontraram diferenças entre os teores de açúcares totais e não-redutores, entre os cafés naturais e despulpados. Resultados semelhantes foram encontrados por Coradi et al. (2007).

Por outro lado, Taveira (2009) observou que o café despulpado apresentou menores teores de açúcares totais e de açúcares não-redutores, quando comparado com o café natural. Segundo o autor, isso pode ter ocorrido pela quebra de exoses para a produção de energia, devido à mudança da respiração aeróbica para alcoólica ou fermentação láctica na falta de oxigênio, durante o despulpamento. O consumo de açúcares em condições anaeróbicas é bem maior quando comparado às condições aeróbicas normais para a produção da mesma quantidade de energia. Em contraste com o processamento via úmida, o processamento via seca é mantido em condições ambientais aeradas, permitindo a respiração normal durante a secagem, menor quebra e consumo de açúcares.

#### **2.4.3.3 Ácidos graxos livres**

Alterações químicas ocorridas na fração lipídica do café podem indicar a os níveis de deterioração de grãos e sementes (CORADI et al., 2007; MARQUES et al., 2008; SAATH, 2010).

O conteúdo lipídico de grãos de café arábica é de, aproximadamente, 15%. A maioria dos lipídios encontra-se na fração de óleo localizada no endosperma dos grãos. Somente uma pequena quantidade (0,2% a 0,3%) está localizada na camada de cera que circunda o grão. O teor de ácidos graxos livres (AGL) em café arábica é em torno de 1,0% a 1,5%. Entre eles, os encontrados em maiores quantidades são o palmítico (C16:0), o esteárico (C18:0), o oleico (C18:1) e o linoleico (C18:2) (SPEER; KÖLING-SPEER, 2006).

Mudanças expressivas nas principais reservas ocorrem quando as sementes se deterioram. Uma das primeiras modificações associadas à deterioração de sementes, em geral, é a sua acidificação, causada, em parte, pelo aumento de ácidos graxos livres produzidos pelas lípases. Essa formação de

ácidos graxos livres pode ocorrer sob condições adversas de manejo pós-colheita, como o uso de temperaturas e taxas de secagem elevadas e condições inadequadas de armazenamento (SOARES, 2003).

A hidrólise dos triacilgliceróis durante a secagem e/ou armazenamento do café libera ácidos graxos que, por sua vez, podem ser oxidados na presença de oxigênio, dando origem a outros compostos, como os aldeídos voláteis que são associados ao sabor e ao aroma desagradáveis. Reduções significativas no conteúdo dos ácidos graxos insaturados linoleico (C18:2) e linolênico (C18:3) são observadas em grãos rançosos, enquanto os teores do maior ácido saturado, o ácido esteárico (C18:0), permanecem praticamente inalterados (VIDAL, 2001).

Segundo Biaggioni e Ferreira (1998), durante o armazenamento, a hidrólise do material graxo inicia-se antes da hidrólise de carboidratos ou proteínas. Portanto, o teor de ácidos graxos livres pode ser usado como um indicador da deterioração dos grãos. Dessa forma, o uso da análise de ácidos graxos livres é de grande importância no monitoramento da qualidade das sementes, a partir da maturidade, pois a queda do vigor antecede a perda da viabilidade.

Coradi et al. (2007) e Marques et al. (2008) observaram aumentos significativos no teor de ácidos graxos livres do café, por meio do teste de acidez graxa, em função da elevação da temperatura de secagem. No entanto, o teste de acidez graxa expressa o teor de ácidos graxos livres em função da acidez do óleo, porém, a acidez do óleo pode ser influenciada também por outros compostos ácidos. Dessa forma, o teor de ácidos graxos livres determinado por esse método é apenas um valor aproximado (SPEER; KÖLING-SPEER, 2006).

Melhores resultados podem ser obtidos pela cromatografia gasosa dos ésteres metílicos dos ácidos graxos com detecção por ionização de chama. Esse é o método mais frequentemente utilizado para análise de ácidos graxos e, além

de fornecer resultados mais precisos do que a análise de acidez graxa, fornece o perfil de ácidos graxos livres, ou seja, o fracionamento dos ácidos presentes na amostra (SPEER; KÖLING-SPEER, 2006).



## REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C. et al. Secagem, armazenamento e qualidade fisiológica de sementes do cafeeiro. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 9, p. 67-82, 2006. Número especial.

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, Jan. 2006.

ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M. Modelagem matemática e simulação aplicados na secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 301-347.

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.

BIAGGIONI, M. A. M.; FERREIRA, W. A. Variação na germinação e nível de ácidos graxos livres durante o armazenamento de milho colhido mecanicamente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1988, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: UFLA/SBEA, 1998. 1 CD-ROM.

BORÉM, F. M. Processamento do café. In: \_\_\_\_\_. **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 127-158.

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, abr./jun. 2006.

BORÉM, F. M.; MARQUES, E. R.; ALVES, E. Ultrastructural analysis damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. **Biosystems Engineering**, London, v. 99, n. 1, p. 62-66, Mar. 2008.

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

BRANDO, C. H. J. Harvesting and green coffee processing. In: WINTGENS, J. N. (Ed.). **Coffee: growing, processing, sustainable production**. Weimnheim: Wiley, 2004. p. 605-714.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 8, de 11 de Junho de 2003. Regulamento Técnico de Identidade e de Qualidade para a Classificação do Café Beneficiado Grão cru. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 13 jun. 2003. Seção 1, p. 22-29.

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

BURMESTER, K.; EGGERS, R. Heat and mass transfer during the coffee drying process. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 99, n. 4, p. 430-436, Aug. 2010.

BYTOF, G. et al. Transient occurrence of seed germination processes during coffee post-harvest treatment. **Annals of Botany**, London, v. 100, n. 1, p. 61-66, July 2007.

CAMPA, C. et al. Trigonelline and sucrose diversity in wild *Coffea* species. **Food Chemistry**, Washington, v. 88, n. 1, p. 39-43, Jan. 2004.

CHRIST, D.; CORRÊA, P. C.; ALVARENGA, E. M. Efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a qualidade fisiológica de sementes de canola (*Brassica napus* L. var. *oleifera* Metzg.). **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 19, n. 2, p. 150-154, mar./abr. 1997.

CHRISTENSEN, C. M.; KAUFMANN, H. H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C. M. (Ed.). **Storage of cereal grain and their products**. Saint Paul: AACCC, 1974. p. 158-192.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café, safra 2011 primeira estimativa, janeiro/2011**.

Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 mar. 2011.

CORADI, P. C. et al. Effect of drying and storage conditions on the quality of natural and washed coffee. **Coffe Science**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 38-47, Jan./June 2007.

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, 2010.

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.

DI SCALA, K.; CRAPISTE, G. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, London, v. 41, n. 5, p. 789-795, June 2008.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Cleveland, v. 50, n. 5, p. 441-464, Apr. 2010.

FARAH, A. et al. Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. **Food Chemistry**, Oxford, v. 98, n. 2, p. 373-380, Apr. 2006.

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.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Changes in physical properties of corn during drying. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 23, n. 4, p. 1004-1008, 1980.

FRANCA, A. S. et al. Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. **Food Chemistry**, Oxford, v. 90, n. 1/2, p. 89-94, Mar./Apr. 2005.

GIOMO, G. S.; BORÉM, F. M. Cafés especiais no Brasil: opção pela qualidade. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 32, n. 261, p. 7-16, mar./abr. 2011.

GONELI, 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.

GUIDA, V. F. A. A.; VILELA, E. R. Influência do fluxo de ar e do período de descanso na secagem do café (*coffea arabica* L.) despulpado em secador experimental de camada fixa. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 232-237, abr./jun. 1996.

GUIMARÃES, R. M. et al. Tolerância à dessecação em sementes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 1, p. 128-139, jan./fev. 2002.

HERNÁNDEZ-DÍAZ, A. et al. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 86, n. 1, p. 1-9, Jan. 2008.

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

ISQUIERDO, E. P. **Secagem e qualidade do café cereja desmucilado submetido a diferentes períodos de repouso**. 2008. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

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, Feb. 2007.

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

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

KRZYZANOWSKI, F. C.; WEST, S. H.; FRANÇA NETO, J. B. Drying soybean seed using air ambient temperature at low relative humidity. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 28, n. 2, p. 77-83, mar./abr. 2006.

LINGLE, T. R. **The coffee cupper's handbook**: systematic guide to the sensory evaluation of coffee's flavor. 3<sup>rd</sup> ed. Long Beach: Specialty Coffee Association of America, 2001. 66 p.

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

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

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, Feb. 2005.

NILNONT, W. et al. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby, 2011. In press.

OLIVEIRA, G. H. H. et al. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 45, n. 3, p. 546-554, Mar. 2010.

OLIVEIRA, P. D. **Microscopia eletrônica de varredura e aspectos fisiológicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

ONDIER, G. O.; SIEBENMORGEN, T. J.; MAUROMOUSTAKOS, A. Low-temperature, 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.

PAIVA, E. F. F. **Análise sensorial dos cafés especiais do Estado de Minas Gerais**. 2005. 55 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

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.

PUTRANTO, A. et al. Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 105, n. 4, p. 638-646, Aug. 2011.

RIBEIRO, D. M. et al. Taxa de redução de água do café cereja descascado em função da temperatura da massa, fluxo de ar e período de pré-secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 28, n. 7, p. 94-107, 2003.

ROSA, S. D. V. F. da et al. Indução de tolerância à temperatura de secagem em sementes de milho por meio de pré-condicionamento à baixa temperatura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 3, n. 2, p. 290-318, 2004.

SAATH, R. **Qualidade do café natural e despulpado em diferentes condições de secagem e tempos de armazenamento**. 2010. 229 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

SAATH, R. et al. Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 196-203, jan./fev. 2010.

SCARAMUZZO, M. Produtores saem em busca do café ideal: estão ressuscitando o Bourbon amarelo. **Valor Econômico**, Salvador, n. 429, jul. 2007. Disponível em: <<http://www.ag.dupont.com.br/detNews.php?codnoticia=429>>. Acesso em: 10 set. 2007.

SELMAR, D. et al. Biochemical insights into coffee processing: quality and nature of green coffee are interconnected with an active seed metabolism. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN COFFEE SCIENCE, 20., 2004, Bangladore. **Proceedings...** Bangladore: ASIC, 2004. 1 CD-ROM.

SOARES, T. A. **Análise da acidez graxa como índice de qualidade em grãos de soja**. 2003. 74 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

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.

TAVEIRA, J. H. S. **Aspectos fisiológicos e bioquímicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de**

- processamento e secagem.** 2009. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- VIDAL, H. M. **Composição lipídica e a qualidade do café (*Coffea arabica* L.) durante armazenamento.** 2001. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.
- VILLELA, F. A.; PESKE, S. T. Secagem de sementes. In: PESKE, S.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G. (Ed.). **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos.** Pelotas: UFPel, 2003. p. 283-321.
- VILLELA, T. C. **Qualidade de café despulpado, desmucilado, descascado e natural, durante o processo de secagem.** 2002. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.
- VINCENT, J. C. Green coffee processing. In: CLARKE, R. J.; MACRAE, R. (Ed.). **Technology.** London: Elsevier, 1987. p. 1-33.
- WILBAUX, R. **Agricultural engineering.** Rome: FAO, 1963. 293 p. (Informal Working Bulletin, 20).
- WILLIAMS, R. J.; LEOPOLD, A. C. Changes in glass transition temperatures in germinating pea seeds. **Seed Science Research**, Oxon, v. 5, n. 1, p. 117-120, 1995.
- WOLKERS, W. F. et al. Fourier transform infrared microscopy detects changes in protein secondary structure associated with desiccation tolerance in developing maize embryos. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 3, p. 1169-1177, Mar. 1998.



## **CAPÍTULO 2**

**Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar**

## RESUMO

Sete modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais para caracterizar o processo de secagem em camada fina de frutos de café. Foram avaliados os efeitos de três temperaturas de bulbo seco (35 °C, 40 °C e 45 °C) e três temperaturas de ponto de orvalho (2,6 °C, 10,8 °C e 16,2 °C) do ar de secagem. Os modelos de Midilli modificado e de resíduos sucessivos com dois termos foram os mais adequados para descrever o processo de secagem. A elevação da temperatura de bulbo seco e a redução da temperatura de ponto de orvalho aumentam o coeficiente de difusividade efetivo e a taxa de secagem e reduzem o tempo de secagem. Para as condições estudadas, o coeficiente de difusividade efetivo de água para frutos de café varia entre  $1,460 \times 10^{-11}$  a  $3,993 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  e a energia de ativação para a difusão líquida, descrita pela equação de Arrhenius, é de  $57,09 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Palavras-chave: Umidade relativa do ar. Razão de umidade. Tempo de meia resposta. Simulação matemática. Temperatura de ponto de orvalho.

## ABSTRACT

Seven mathematical models were fitted to experimental data to characterize the process of thin-layer drying of coffee berries. The effects of three dry bulb temperatures (35, 40 and 45 °C) and three dew point temperatures (2.6, 10.8 and 16.2 °C) of the drying air were evaluated. The modified Midilli and Successive Residues (with two terms) models were the most adequate for describing the drying process. A rise in temperature and reduction in dew point temperature increased the effective diffusivity coefficient and drying rate and reduced drying time. Under the studied conditions, the effective diffusivity coefficient of water in coffee berries varied between  $1.460 \times 10^{-11}$  and  $3.993 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , and the activation energy for liquid diffusion described by the Arrhenius equation was  $57.09 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Keywords: Relative humidity of air. Moisture ratio. Half response time. Mathematical simulation. Dew point temperature.

## 1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos relativos a plantio, cultivo, tratamento fitossanitário, poda e adubação, entre outros processos, ocorridos nos últimos anos, vem proporcionando um cenário de produtividade crescente na cafeicultura brasileira.

Até o final da década de 1990, a colheita era considerada o principal gargalo do processo produtivo do agronegócio café. No entanto, esse cenário foi modificado, sobretudo nos últimos quinze anos, com a evolução da mecanização na cafeicultura, por meio de inovações tecnológicas que foram desenvolvidas e introduzidas, principalmente, na mecanização da colheita do café atendendo às demandas dos agricultores.

Por outro lado, os avanços tecnológicos ocorridos no processo de secagem não acompanharam a evolução do processo produtivo e da mecanização da cafeicultura. Atualmente, são necessárias extensas áreas de terreiros e longos períodos de secagem, principalmente para o café natural, que representam gargalos no fluxo de processamento e podem causar perda de qualidade do café.

A taxa de secagem do café é afetada pela temperatura, pelo fluxo e pela umidade relativa do ar de secagem, além da umidade do produto. A tecnologia disponível atualmente para secagem de café permite que a taxa de secagem seja aumentada apenas pela elevação da temperatura, porém, sabe-se que temperatura na massa de café acima de 40°C causa danos ao café, prejudicando sua qualidade (OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009).

Uma alternativa para aumentar a taxa de secagem sem ultrapassar o limite máximo de temperatura tolerável pelo café é o uso de ar desumidificado artificialmente, seja por substâncias dessecantes, seja por refrigeração e

condensação. No entanto, esses métodos são caros e necessitam ser testados em escala experimental antes de serem utilizados em escala comercial.

O estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser feitos por simulação matemática, cujo princípio se fundamenta na representação da secagem de sucessivas camadas delgadas do produto com a utilização de um modelo matemático que represente satisfatoriamente a redução da água contida no produto (ANDRADE; BORÉM, 2008).

Conforme as condições do processo de secagem, diferentes modelos podem ser ajustados para descrever adequadamente a cinética de secagem de produtos capilares porosos higroscópicos.

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas, este trabalho foi desenvolvido com os objetivos de estudar a cinética de secagem em camada delgada dos frutos de café (*Coffea arabica* L.), cultivar Mundo Novo; ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais em função da temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem e determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação para as condições estudadas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Obtenção e descrição da matéria-prima

Utilizaram-se como matéria-prima, nesse experimento, frutos de café maduros ou “cereja” (*Coffea arabica* L. cv. Mundo Novo), colhidos na Fazenda Santa Mariana, localizada no município de Carmo da Cachoeira, MG (Latitude: 21°27'45”S; Longitude: 45°19'17,8”W; Altitude: 1100 m). A colheita dos frutos foi manual e selecionando-se somente frutos maduros. Após a colheita, realizou-se a separação hidráulica para remoção de frutos de menor massa específica (secos, chochos, brocados e mal granados) e a uma nova seleção manual, para a retirada de frutos imaturos e sobremaduros.

Os frutos, no momento da colheita, apresentavam teor de água de  $1,9 \pm 0,1$  kg.kg<sup>-1</sup> (bs). Logo após a seleção manual, o café foi submetido à pré-secagem ao sol em leito suspenso. Os frutos foram espalhados em camadas com espessuras equivalentes a um fruto (cerca de 0,015 m) e foram revolvidos cerca de 12 vezes ao dia. No início do terceiro dia, a espessura da camada foi aumentada para cerca de 0,03 m. No fim do quinto dia, o café atingiu teor de água entre de  $0,5 \pm 0,05$  kg.kg<sup>-1</sup> (bs) e, então, foi submetido à secagem mecânica em secadores.

No período da noite, os terreiros suspensos com os cafés foram levados para local coberto, evitando o contato dos frutos com o orvalho da noite.

Durante o período de pré-secagem dos frutos em leitos suspensos, a temperatura ambiente variou entre 10,4 °C e 25,7 °C. A temperatura e a umidade relativa médias no período foram, respectivamente, de 16,1 °C e 69,6%.

Para a determinação do teor de água dos frutos, utilizou-se o método padrão de estufa,  $105\pm 3$  °C, durante 24 horas, de acordo com Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Antes do início da secagem mecânica foi calculado o raio equivalente dos frutos de café, definido como o raio de uma esfera com volume equivalente ao volume do fruto. Para o cálculo do seu volume, tomou-se uma amostra de 100 frutos e realizaram-se medidas no comprimento (a), na largura (b) e na espessura (c) com o uso de um paquímetro digital com precisão de 0,01mm, sendo o volume dos frutos de café (V) calculado pela Equação 1.

$$V = \frac{4}{3} \pi abc \quad (1)$$

em que

V - volume dos frutos ( $m^3$ );

a – comprimento (m);

b – largura (m) e

c – espessura (m).

## 2.2 Sistema de secagem

O sistema de secagem foi composto por um sistema de condicionamento de ar acoplado a um secador de camada fixa (Figura 1). 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 o controle do fluxo, da temperatura (T) e da umidade relativa (UR) do ar de secagem com precisão. 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.

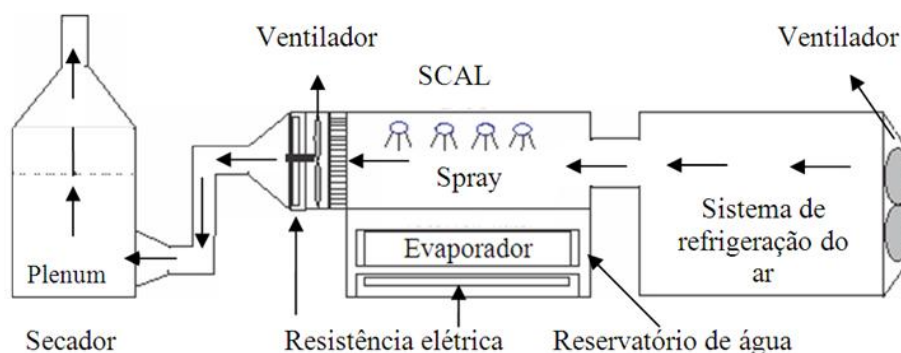


Figura 1 Sistema de secagem utilizado para a secagem mecânica do café. UFLA, Lavras, MG, 2011

Este 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 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. O secador foi 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 termo-higrômetro digital portátil, com sensor inserido no interior do plenum. A



temperatura dos frutos de café foi medida com termômetros de mercúrio inseridos no centro da massa.

### **2.3 Procedimento e delineamento experimental**

A quantidade de café utilizada promoveu o completo preenchimento das bandejas de fundo perfurado, formando uma camada delgada (Apêndice A). Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos frutos, o acompanhamento da secagem do produto foi realizado pelo método gravimétrico. As bandejas contendo as amostras foram retiradas do secador e pesadas, a cada duas horas, em uma balança analítica com resolução de 0,01 g, até que os frutos de café atingissem o teor de água de 0,14 (bs). Após cada tratamento, o teor de água dos frutos foi determinado pelo método padrão de estufa (BRASIL, 2009). Para minimizar possíveis diferenças de temperatura e fluxo de ar entre as bandejas de fundo perfurado, fez-se um rodízio de 90° na posição das bandejas a cada hora.

Para todos os tratamentos, a velocidade do ar de secagem foi mantida constante em  $0,33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , correspondendo ao fluxo de  $20\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ . Foram obtidos experimentalmente, para o ar de secagem, pontos de estado provenientes da relação entre temperaturas de bulbo seco ( $T_{\text{bs}}$ ) e temperaturas de ponto de orvalho ( $T_{\text{po}}$ ), sendo estas condições adotadas durante as secagens dos frutos. Foram realizados nove tratamentos em esquema fatorial 3x3, sendo três temperaturas de bulbo seco (35 °C, 40 °C e 45 °C) e três temperaturas de ponto de orvalho (2,6 °C, 10,8 °C e 16,2 °C). Em função das combinações entre temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho, foram obtidas diferentes umidades relativas (UR) do ar de secagem (Tabela 1). Para cada tratamento foram realizadas quatro repetições.

As temperaturas de bulbo seco utilizadas nesse experimento são temperaturas normalmente utilizadas para a secagem de café. Com relação às

temperaturas de ponto de orvalho, normalmente, no período de pico da colheita do café, entre os meses de maio a agosto, na região Sul de Minas, as temperaturas de bulbo seco e as umidades relativas médias encontram-se, respectivamente, nas faixas de 16 °C e 71%, o que corresponde a uma temperatura de ponto de orvalho de, aproximadamente, 10,8 °C. Para essa mesma época do ano, as temperaturas de ponto de orvalho alcançam valores aproximados de 2,6 °C em regiões produtoras de café mais secas, como o Cerrado Mineiro e 16,2 °C em regiões mais úmidas, como as Matas de Minas.

Tabela 1 Temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho e umidade relativa do ar de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Tpo (°C)	UR (%)
35	2,6	13,1
35	10,8	23,0
35	16,2	32,7
40	2,6	10,0
40	10,8	17,5
40	16,2	25,0
45	2,6	7,7
45	10,8	13,5
45	16,2	19,2

Para se determinar o efeito dos diferentes parâmetros (temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho) sobre a cinética de secagem de frutos de café, os dados do tempo de meia resposta e coeficiente de difusividade efetivo foram submetidos à análise de variância (ANAVA).

#### 2.4 Análise dos dados e modelos de secagem

Na análise de dados de secagem em camada fina, 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. A cada tempo de secagem, um teor de água foi

correlacionado com o teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio, para condições específicas de secagem. Dessa forma, em todas as condições testadas, os valores de razão de umidade em função do tempo de secagem foram ajustados aos modelos utilizados para descrever a cinética de secagem dos frutos de café apresentados na Tabela 2.

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

em que

RU - razão de umidade (adimensional);

U - teor de água do produto no tempo t (decimal, base seca);

U<sub>e</sub> - teor de água de equilíbrio do produto (decimal, base seca);

U<sub>i</sub> - teor de água inicial do produto (decimal, base seca).



Tabela 2 Modelos matemáticos usados para prever o fenômeno de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Designação do modelo/referência	Modelo	Equação
Lewis (LEWIS, 1921)	$RU = \exp(-kt)$	(3)
Page (PAGE, 1949)	$RU = \exp(-kt^n)$	(4)
Thompson (THOMPSON; PEARTT; FOSTER, 1968)	$RU = \exp\{[-a - (-a^2 + 4bt)^{0.5}] (2b)^{-1}\}$	(5)
Midilli Modificado (GHAZANFARI et al., 2006)	$RU = \exp(-kt^c) + bt$	(6)
Verma (VERMA et al., 1985)	$RU = -a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1t)$	(7)
Resíduos Sucessivos com dois termos (GLEN, 1978)	$RU = a \exp(-b \exp(-c T^l)) t) + d \exp(-e \exp(-f T^l))t)$	(8)
Henderson & Pabis Modificado (KARATHANOS, 1999)	$RU = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(9)

em que RU = razão de umidade; t = tempo de secagem (h); T = temperatura de secagem (° C); k, k<sub>0</sub> e k<sub>1</sub> = constantes de secagem; a, b, c, d, e, f, n = coeficientes dos modelos.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não-linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0<sup>®</sup> (Statsoft, Tulsa, USA). A escolha do melhor modelo baseou-se nos seguintes 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 10 e 11.

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

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

em que:

SE = desvio padrão da estimativa (decimal);

Y = valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$  = valor calculado pelo modelo;

GLR = graus de liberdade do modelo;

P = erro médio relativo (%);

n = número de dados observados.

Para avaliar a taxa de secagem, foi determinado o tempo de meia resposta, que é definido como o tempo necessário para a remoção da primeira metade de água livre ou 1/2 ( $U_i - U_e$ ) e, conseqüentemente, corresponde ao

tempo exigido para que grãos ou frutos, submetidos à secagem em camada fina, atinjam a razão de umidade (RU) de 0,5. Fatores que têm um efeito significativo sobre o tempo de meia resposta também terão influência nos parâmetros e constantes dos modelos que caracterizam a cinética de secagem de produtos agrícolas em camada fina (KASHANINEJAD et al., 2007).

O coeficiente de difusão efetivo para as condições de secagem utilizadas neste trabalho foi calculado ajustando-se o modelo baseado na teoria de difusão líquida (Equação 12) aos dados observados, por meio de regressão não linear, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0<sup>®</sup> (Statsoft, Tulsa, USA). Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como esférica, desconsiderando a contração volumétrica dos frutos e considerando a condição de contorno do teor de água conhecido na superfície do produto (BROOKER; BAKER-ARKEMA; HALL, 1992).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{p^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ - \frac{n^2 p^2 D_{\text{eff}} t}{R^2} \right] \quad (12)$$

em que:

$D_{\text{eff}}$  = coeficiente de difusão efetivo ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$R$  = raio equivalente dos frutos de café (m);

$n$  = número de termos;

$t$  = tempo (s).

A solução analítica dessa equação apresenta-se na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos ( $n$ ), no truncamento, poderá determinar a precisão dos resultados obtidos. Neste experimento, realizou-se uma aproximação de oito termos dessa série que, segundo Afonso Júnior e

Corrêa (1999), é adequada para fornecer uma estimativa satisfatória do coeficiente de difusão efetivo.

Para o cálculo da energia de ativação da cinética de secagem dos frutos de café utilizou-se a equação de Arrhenius (Equação 13). Essa equação demonstra a relação entre a energia de ativação e a velocidade em que a reação ocorre.

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (13)$$

em que:

$D_0$  = fator pré-exponencial;

$E_a$  = energia de ativação ( $\text{kJ mol}^{-1}$ );

$R$  = constante universal dos gases ( $8,134 \text{ J g mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O raio equivalente dos frutos de café calculado foi de  $5,51 \times 10^{-3}$  m.

Os valores de razão de umidade em função do tempo de secagem, para todas as combinações de temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem testadas nesse experimento, foram ajustados aos modelos utilizados para descrever a cinética de secagem dos frutos de café, que estão apresentados na Tabela 2. Na Tabela 3 são apresentados os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e tendência de distribuição dos resíduos, para os sete modelos empregados para descrever a cinética de secagem de frutos de café com teor de água inicial médio de 0,5 (bs), quando submetidos às condições de temperatura de bulbo seco e temperatura do ponto de orvalho do ar de secagem empregadas neste experimento. Esses parâmetros foram utilizados como critério para avaliar a eficiência dos modelos para prever o fenômeno de secagem dos frutos de café.

Tabela 3 Parâmetros estatísticos obtidos para os modelos de secagem utilizados para descrever a cinética de secagem de frutos de café. UFLA, Lavras, MG, 2011

Modelo	Tbs	Tpo	UR	R <sup>2</sup> (%)	P(%)	SE	Tendência
Lewis	35	2,6	13,1	99,87%	1,82	0,0515	Tendenciosa
	35	10,8	23,0	99,92%	2,02	0,0422	
	35	16,2	32,7	100,00%	4,10	0,0752	
	40	2,6	10,0	99,82%	2,64	0,0473	
	40	10,8	17,5	99,60%	4,16	0,0725	
	40	16,2	25,0	99,71%	4,30	0,0675	
	45	2,6	7,7	96,65%	10,48	0,1632	
	45	10,8	13,5	100,00%	4,95	0,0617	
	45	16,2	19,2	100,00%	2,07	0,0281	
Page	35	2,6	13,1	100,00%	2,05	0,0391	Tendenciosa
	35	10,8	23,0	99,94%	2,24	0,0378	
	35	16,2	32,7	99,79%	4,34	0,0741	
	40	2,6	10,0	99,91%	1,75	0,0325	
	40	10,8	17,5	99,90%	2,20	0,0359	
	40	16,2	25,0	99,86%	2,88	0,0482	
	45	2,6	7,7	99,83%	2,06	0,0372	
	45	10,8	13,5	100,00%	3,19	0,0452	
	45	16,2	19,2	100,00%	1,46	0,0214	
Thompson	35	2,6	13,1	99,86%	1,85	0,0518	Tendenciosa
	35	10,8	23,0	99,92%	2,00	0,0424	
	35	16,2	32,7	99,79%	3,88	0,0749	
	40	2,6	10,0	99,90%	1,56	0,0341	
	40	10,8	17,5	100,00%	1,76	0,0351	
	40	16,2	25,0	99,91%	2,24	0,0384	
	45	2,6	7,7	99,54%	3,62	0,0600	
	45	10,8	13,5	100,00%	2,28	0,0363	
	45	16,2	19,2	99,97%	1,16	0,0184	
Midilli modificado	35	2,6	13,1	99,95%	1,16	0,0234	Aleatória
	35	10,8	23,0	99,97%	0,98	0,0185	
	35	16,2	32,7	99,96%	1,00	0,0236	
	40	2,6	10,0	99,92%	1,51	0,0227	
	40	10,8	17,5	99,93%	1,41	0,0218	
	40	16,2	25,0	99,97%	0,90	0,0167	
	45	2,6	7,7	99,89%	2,21	0,0213	
	45	10,8	13,5	99,95%	1,23	0,0161	
	45	16,2	19,2	99,98%	0,87	0,0103	

“Tabela 3, conclusão”

Modelo	Tbs	Tpo	UR	R <sup>2</sup> (%)	P(%)	SE	Tendência
Verna	35	2,6	13,1	99,93%	1,84	0,0258	Tendenciosa
	35	10,8	23,0	99,93%	2,22	0,0291	
	35	16,2	32,7	99,79%	4,09	0,0531	
	40	2,6	10,0	100,00%	2,65	0,0334	
	40	10,8	17,5	99,61%	4,16	0,0513	
	40	16,2	25,0	99,72%	4,30	0,0477	
	45	2,6	7,7	96,65%	10,49	0,1154	
	45	10,8	13,5	99,61%	4,96	0,0437	
	45	16,2	19,2	99,93%	2,08	0,0198	
Resíduos sucessivos	35	2,6	13,1	100,00%	1,59	0,0203	Aleatória
	35	10,8	23,0	100,00%	2,06	0,0175	
	35	16,2	32,7	100,00%	1,88	0,0235	
	40	2,6	10,0	99,93%	1,07	0,0130	
	40	10,8	17,5	99,94%	0,97	0,0129	
	40	16,2	25,0	100,00%	1,04	0,0103	
	45	2,6	7,7	99,94%	1,93	0,0100	
	45	10,8	13,5	99,94%	1,31	0,0110	
	45	16,2	19,2	99,98%	0,86	0,0062	
Henderson e Pabis modificado	35	2,6	13,1	99,90%	1,59	0,0203	Tendenciosa
	35	10,8	23,0	99,93%	2,06	0,0175	
	35	16,2	32,7	99,97%	0,83	0,0117	
	40	2,6	10,0	99,93%	1,09	0,0130	
	40	10,8	17,5	99,94%	0,97	0,0129	
	40	16,2	25,0	99,97%	1,04	0,0103	
	45	2,6	7,7	99,99%	0,61	0,0035	
	45	10,8	13,5	99,66%	4,56	0,0260	
	45	16,2	19,2	99,98%	0,84	0,0062	

Segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), a análise de um único parâmetro não constitui uma boa ferramenta para a avaliação de modelos não lineares, sendo necessária uma análise conjunta dos parâmetros coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P). Para a adequabilidade de certo modelo na descrição de um fenômeno, segundo Mohapatra e Rao (2005), valores inferiores a 10% de erro médio relativo são recomendados para a seleção de modelos que representem satisfatoriamente o

fenômeno que está sendo estudado. De acordo com Draper e Smith (1998), a capacidade de um modelo para descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa (SE).

Todos os modelos empregados neste experimento, exceto os modelos de Verma e de Lewis para a temperatura de bulbo seco de 45 °C e temperatura de ponto de orvalho 2,6 °C (UR de 7,7%), apresentaram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superiores a 99,54%, o que, segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), são valores considerados aceitáveis para descrever o fenômeno de secagem. Quando se considera o critério ( $P < 10\%$ ) para um ajuste aceitável, os resultados obtidos foram semelhantes; somente os modelos de Verma e de Lewis, para a temperatura de bulbo seco de 45 °C e temperatura do ponto de orvalho de 2,6 °C (umidade relativa de 7,7%), apresentaram valores de erro médio relativo superiores a 10%.

Entre os modelos utilizados neste experimento para descrever o processo de secagem de frutos de café, os modelos de resíduos sucessivos com dois termos e de Midilli modificado foram os que apresentaram os melhores ajustes. Esses modelos obtiveram, em média, os maiores valores de coeficiente de determinação ( $R^2 > 99,89\%$ ) e os menores valores de erro médio relativo e desvio padrão da estimativa ( $P < 2,21\%$  e  $SE < 0,024$ ).

A análise da distribuição de resíduos (Apêndice C) confirma os resultados anteriores. Embora os sete modelos utilizados tenham apresentado valores de coeficiente de determinação, desvio padrão da estimativa e erro médio relativo considerados satisfatórios, os modelos de Midilli modificado e de resíduos sucessivos com dois termos apresentaram maior aleatoriedade na distribuição dos resíduos, indicando que eles são os mais apropriados para descrição do fenômeno de secagem de frutos de café nas condições consideradas neste experimento.

Esses resultados estão de acordo com o estudo realizado por Corrêa et al. (2010), que obtiveram um ajuste satisfatório do modelo de Midilli modificado para descrever a secagem de frutos de café. Dessa forma, devido à simplicidade e ao menor número de parâmetros em relação ao modelo de resíduos sucessivos com dois termos, no presente estudo, o modelo de Midilli modificado foi selecionado para descrever a cinética de secagem de frutos de café com teor de água inicial médio de  $0,5 \text{ kg.kg}^{-1}(\text{bs})$ , em função da temperatura de bulbo seco e temperatura do ponto de orvalho do ar de secagem.

Na Figura 2 é apresentada a comparação entre valores observados e estimados da razão de umidade pelo modelo de Midilli modificado e na Figura 3, o comportamento da razão de umidade dos frutos de café em função do tempo, durante a secagem em camada fina, nas diferentes condições de secagem utilizadas no experimento, bem como a comparação entre os valores observados e os valores estimados de razão de umidade pelo modelo de Midilli modificado. Observa-se, nessas figuras, a elevada concordância entre os valores de razão de umidade observados experimentalmente e os valores estimados pelo modelo de Midilli modificado, para todas as condições estudadas, o que confirma o ajuste satisfatório desse modelo para descrever a cinética de secagem dos frutos de café, nas condições estudadas.

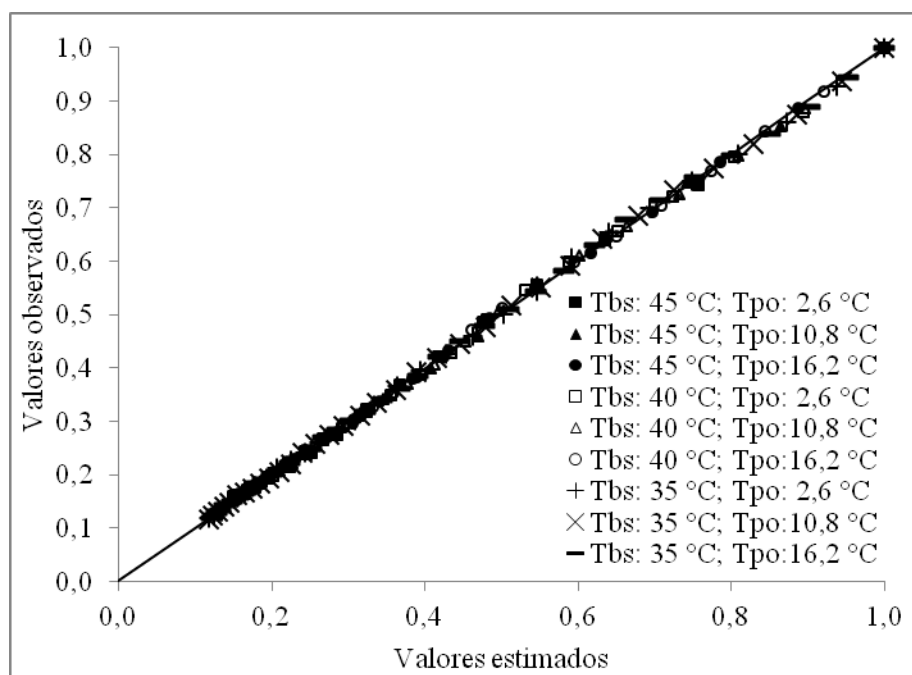


Figura 2 Valores de razão de umidade (adimensional) observados e estimados pelo modelo de Midilli modificado para a secagem de frutos de café. UFLA, Lavras, MG, 2011

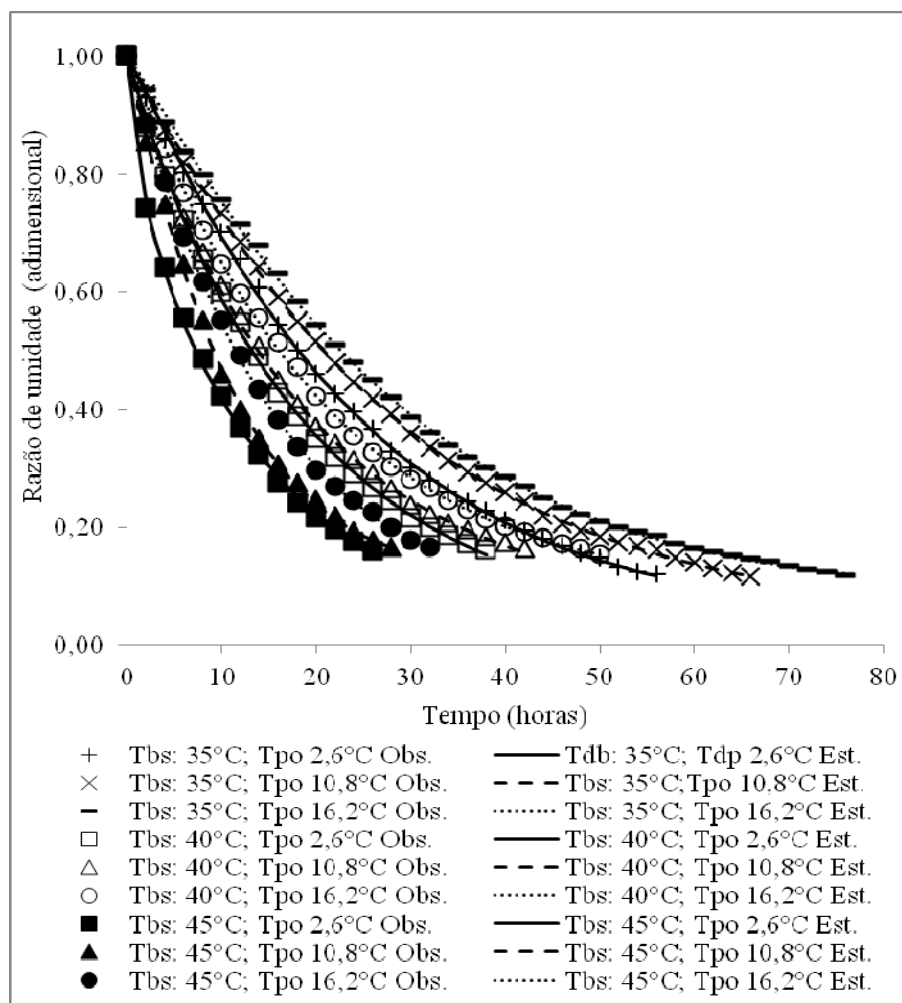


Figura 3 Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli modificado para a secagem de frutos de café, em função do tempo. UFLA, Lavras, MG, 2011

em que:

Tbs = temperatura de bulbo seco;

Tpo = temperatura de ponto de orvalho;

Obs. = valores de RU observados; Est. = valores de RU estimados pelo modelo de Midilli modificado.

Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes do modelo de Midilli modificado ajustados aos dados observados da cinética de secagem em dos frutos de café, nas condições consideradas nesse experimento.

Tabela 4 Coeficientes do modelo de Midilli modificado ajustados aos dados observados da cinética de secagem em dos frutos de café. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Tpo (°C)	UR (%)	Modelo de Midilli modificado (GHAZANFARI et al., 2006) $RU = \exp(-kt^c) + bt$		
			k	c	b
35	16,2	32,7	0,0227	1,1131	0,0008
35	10,8	23,0	0,0281	1,0660	0,0005
35	2,6	13,1	0,0311	1,0800	0,0005
40	16,2	25,0	0,0420	1,0286	0,0012
40	10,8	17,5	0,0569	0,9626	0,0008
40	2,6	10,0	0,0576	0,9693	0,0003
45	16,2	19,2	0,0600	1,0153	0,0010
45	10,8	13,5	0,0738	1,0407	0,0026
45	2,6	7,7	0,1698	0,6873	-0,0021

Pode-se observar, pelos dados da Tabela 4, que a magnitude da constante de secagem “k”, que representa o efeito das condições externas de secagem, aumentou com o aumento da temperatura, e para uma mesma temperatura essa constante aumentou com a redução da temperatura de ponto de orvalho e, conseqüentemente, com a redução da umidade relativa. Esses resultados indicam que a taxa de secagem se eleva com o aumento da temperatura, principalmente, e também, em menor escala, com a redução da temperatura de ponto de orvalho e da umidade relativa (Figura 3). Com relação aos coeficientes “c” e “b” do modelo de Midilli modificado, não se observou uma tendência definida dos seus valores em função da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem.

Ainda na Figura 3 pode-se observar que a secagem do café nas condições desse experimento ocorreu inteiramente sob o período de taxa de



secagem decrescente. No café, o período de taxa de secagem constante pode ser observado nas primeiras horas de secagem do café verde e cereja, com teor de água inicial muito elevado. No entanto, neste experimento, o café foi submetido à pré-secagem ao sol até atingir o teor de água de  $0,5 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs) e, conseqüentemente, a secagem mecânica dos frutos ocorreu integralmente durante o período de taxa decrescente. Durante esse período, as resistências às transferências de água e energia encontram-se essencialmente no interior dos frutos, tornando a taxa de evaporação superficial acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície do produto (BROOKER; BAKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios do tempo de meia resposta e dos coeficientes de difusão efetivos obtidos para a secagem de frutos de café, para as diferentes combinações de temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho utilizadas nesse experimento.

Tabela 5 Valores do tempo de meia resposta (TMR) e do coeficiente de difusão efetivo ( $D_{eff}$ ) dos frutos de café, em função das combinações temperatura de bulbo seco (Tbs) e temperatura de ponto de orvalho (Tpo) do ar de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Tpo (°C)	UR (%)	$D_{eff} \times 10^{11} (\text{m}^2.\text{s}^{-1})$	TMR (min)
35	16,2	32,7	1,460	1364,0
35	10,8	23,0	1,586	1242,9
35	2,6	13,1	1,810	1077,8
40	16,2	25,0	1,927	1000,3
40	10,8	17,5	2,214	866,1
40	2,6	10,0	2,350	808,8
45	16,2	19,2	2,517	701,8
45	10,8	13,5	3,338	575,7
45	2,6	7,7	3,993	495,6
CV			2,39%	1,41%

A análise de variância (Apêndice B) mostrou que a temperatura do ar de secagem e a temperatura de ponto de orvalho e, conseqüentemente, a umidade relativa do ar tiveram efeito significativo tanto no tempo de meia resposta

quanto no coeficiente de difusividade efetivo ( $P < 0,0001$ ). O aumento da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando diretamente a resistência do fluido ao escoamento; a diminuição da viscosidade facilita a difusão das moléculas de água nos capilares do produto (CORRÊA et al., 2010). Outro fator que pode ser atribuído a esse aumento do coeficiente de difusão efetivo é que, com o aumento da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para uma difusão mais rápida (GONELI et al., 2009). Ainda na Tabela 5, observa-se que, além do efeito da temperatura no coeficiente de difusão, a redução da temperatura do ponto de orvalho para uma mesma temperatura proporcionou o aumento do coeficiente de difusão efetivo. No que se refere ao efeito da umidade relativa, os resultados do atual trabalho estão de acordo com os obtidos por Ondier, Siebenmorgen e Mauromoustakos (2010), que encontraram efeitos significativos da redução da umidade relativa no tempo de secagem de arroz.

Os valores de coeficiente de difusão efetivo obtidos para os frutos de café submetidos à secagem em camada fina, para as combinações de temperatura e umidade relativa consideradas neste experimento, estão de acordo com os valores obtidos em outros trabalhos realizados com produtos agrícolas que, segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), apresentam-se na faixa de  $10^{-9}$  a  $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Corrêa et al. (2010) estudaram a cinética de secagem de frutos de café para as temperaturas de 35 °C, 45 v e 55 °C e obtiveram coeficientes de difusão efetivos de  $2,99 \times 10^{-11}$ ,  $2,39 \times 10^{-11}$  e  $5,98 \times 10^{-11}$ , respectivamente.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo com relação à temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (Equação 13) (CORRÊA et al., 2010; GELY; SANTALLA, 2007; GONELI et al., 2009; KASHANINEJAD et al., 2007; MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Na Figura 4 são apresentados os valores de  $\ln(D_{\text{eff}})$  em função do inverso da temperatura absoluta ( $1.K^{-1}$ ) para os frutos de café.

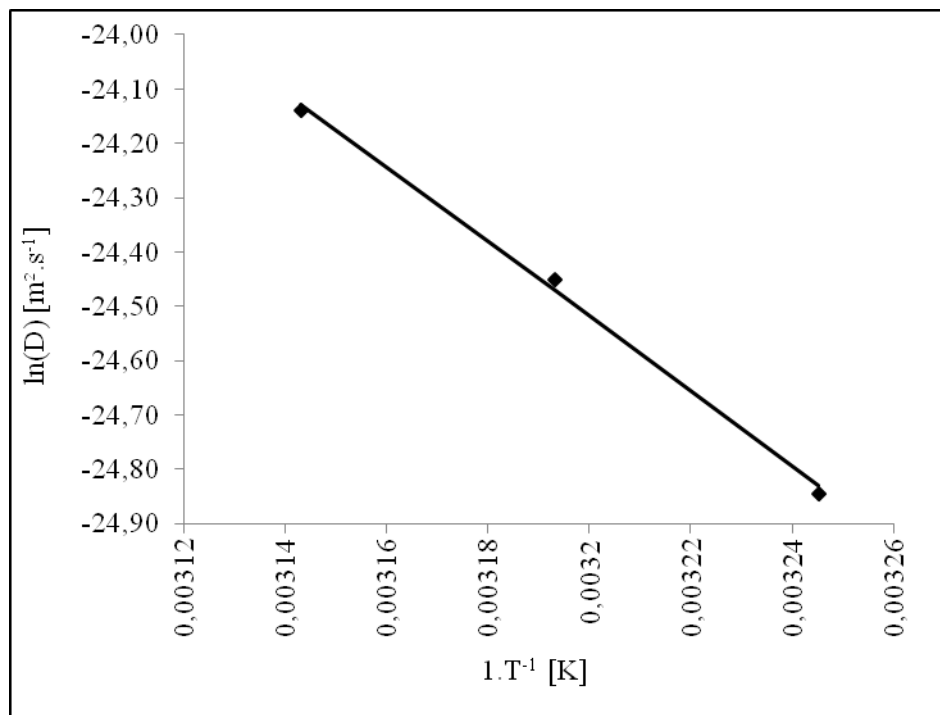


Figura 4 Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar de secagem dos frutos de café. UFLA, Lavras, MG, 2011

A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação  $E_a/R$ , enquanto a sua interseção com o eixo da ordenadas indica o valor de  $D_0$ . Na Equação 14, são apresentados os coeficientes das equações ajustadas para o coeficiente de difusão efetivo dos frutos de café, calculados de acordo com a Equação 14.

$$D_{\text{eff}} = 0,078411 \exp\left(-\frac{6866,99}{T_a}\right)$$

(14)

A partir da Equação 14, a energia de ativação ( $E_a$ ) calculada para a difusão líquida dos frutos de café é de  $57,09 \text{ kJ.mol}^{-1}$ . Esse valor está dentro da faixa de energia de ativação para produtos agrícolas que, segundo Zogzas, Maroulis e Marinos-Kouris (1996), está entre  $12,7$  e  $110 \text{ kJ.mol}^{-1}$ . Goneli et al. (2009) encontraram valores de energia de ativação de  $55,40 \text{ kJ.mol}^{-1}$  para cafés em pergaminho.

#### 4 CONCLUSÕES

Dentre os modelos testados neste experimento, os modelos de Midilli modificado e de resíduos sucessivos com dois termos são os que melhor se ajustam aos dados experimentais do processo de secagem de frutos de café (*Coffea arabica* L.), cultivar Mundo Novo, com ar de secagem com temperaturas de bulbo seco entre 35 °C e 45 °C e temperaturas de ponto de orvalho entre 2,6 °C e 16,2 °C.

O aumento da temperatura de bulbo seco do ar de secagem aumenta a taxa de secagem dos frutos de café e, conseqüentemente, reduz o tempo de secagem dos frutos de café.

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.

A secagem mecânica de frutos de café com teor de água inicial de 0,5 kg.kg<sup>-1</sup> (bs) ocorre no período de taxa decrescente de secagem.

O coeficiente de difusividade efetivo de frutos de café Mundo Novo, com teor de água inicial de 0,5 (bs), submetidos à secagem com ar aquecido com temperatura de bulbo seco entre 35 °C e 45 °C e temperatura de ponto de orvalho entre 2,6 °C e 16,2 °C varia entre  $1,460 \times 10^{-11}$  a  $3,993 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> e aumenta significativamente com o aumento da temperatura de bulbo seco e a redução da temperatura de ponto de orvalho.

A energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem de frutos de café, descrita pela equação de Arrhenius, para as condições de secagem consideradas nesse experimento, é de 57,09 kJ.mol<sup>-1</sup>.

## REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 349-353, set./dez. 1999.

ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M. Modelagem matemática e simulação aplicados na secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 301-347.

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

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, 2010.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: J. Wiley, 1998. 712 p.

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.

GELY, M. C.; SANTALLA, E. M. Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium Quinoa willd.*) seeds: effect of air temperature and initial moisture content of seeds. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 3, p. 1029-1033, Feb. 2007.

GHAZANFARI, A. et al. Thin-layer drying of flax fiber: II., modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. **Drying Technology**, New York, v. 24, n. 12, p. 1637-1642, Apr. 2006.

GLENN, T. L. **Dynamic analysis of grain drying system**. 1978. Thesis (Ph.D.) - Ohio State University, Ann Arbor, 1978.

GONELI, 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.

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

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, Aug. 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, Feb. 2007.

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, Mar. 1996.

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, Feb. 2005.

OLIVEIRA, P. D. **Microscopia eletrônica de varredura e aspectos fisiológicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

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

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

TAVEIRA, J. H. S. **Aspectos fisiológicos e bioquímicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2009. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

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.

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.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v. 14, n. 10, p. 2225-2253, May 1996.



### **CAPÍTULO 3**

**Efeitos imediatos e latentes da temperatura e da taxa de secagem na  
qualidade do café natural**

## RESUMO

O processamento do café por via seca é o método mais utilizado no Brasil. No entanto, a ausência de cuidados e o manejo inadequado do café natural durante a pós-colheita, muitas vezes, causam significativos prejuízos para a sua qualidade. Poucos estudos descrevem os efeitos das interações entre a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem na produção de cafés naturais especiais. Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar os efeitos da temperatura e da taxa de secagem na qualidade do café natural. Frutos maduros de café (*Coffea arabica* L. cv. Mundo Novo) foram colhidos e classificados manualmente. Em seguida, foram secados ao sol em leito suspenso, até atingirem teor de água de aproximadamente  $0,5 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs) (30 - 35% bu) e, então, submetidos à secagem mecânica. Foram utilizadas três temperaturas de bulbo seco (35 °C, 40 °C e 45 °C) e três taxas de secagem para cada temperatura de bulbo seco, obtidas pela combinação entre as temperaturas de bulbo seco e três temperaturas de ponto de orvalho (2,6 °C, 10,8 °C e 16,2 °C). Os efeitos imediatos e latentes dos tratamentos sobre a qualidade do café foram estudados pelas análises de acidez titulável total, açúcares totais, açúcares redutores e não-redutores, condutividade elétrica, lixiviação de potássio, perfil de ácidos graxos livres e análise sensorial. Os dados observados permitiram concluir que: a temperatura de 35°C é recomendada para a produção de cafés naturais especiais; a temperatura de 45°C não é recomendada para a produção de cafés naturais especiais; a taxa de secagem interfere na qualidade do café natural; a elevação da taxa de secagem, para as temperaturas de 35 °C e 40 °C tem efeito negativo sobre qualidade do café natural; a qualidade do café natural é influenciada, principalmente, pelos danos térmicos na secagem com ar aquecido a 45 °C e cafés naturais submetidos à secagem com temperatura do ar de 35 °C e baixas taxas de secagem apresentaram melhor qualidade, em comparação com os cafés secados ao sol em leito suspenso.

Palavras-chave: Umidade relativa do ar. Temperatura de ponto de orvalho. Dano térmico.

## ABSTRACT

The coffee processing by the dry method is the most used in Brazil. However, the lack of care and inadequate management of natural coffee during post-harvest, often cause significant damage to their quality. Few studies describe the effects of interactions between temperature and relative humidity of the drying air in the production of specialty natural coffees. This work was carried out with the objective to study the effects of temperature and drying rate on the quality of natural coffee. The ripe fruits of coffee (*Coffea arabica* L. cv. Mundo Novo) were harvested and selected manually. Then, the selected ripe berries were sun dried in a suspended bed, until they reach a moisture content of approximately  $0.5 \text{ kg.kg}^{-1}$  (db) (30 - 35% wb) and then, dried with heated air. Three dry bulb temperatures were used (35, 40 and 45 °C) and three drying rates for each dry bulb temperature, obtained by the combination between the dry bulb temperatures and three dew point temperatures (2.6, 10.8 and 16.2 °C). The immediate and latent effects of treatments on the quality of coffee were studied by analysis of total titratable acidity, total sugars, reducing and non-reducing sugars, electrical conductivity, leaching of potassium, free fatty acid profile and sensory analysis. The observed data showed that: the temperature of 35 °C is recommended for the production of specialty natural coffees, the temperature of 45 °C is not recommended for the production of specialty natural coffees, the drying rate affects in the quality of natural coffee, raising the rate of drying at temperatures of 35 °C and 40 °C has a negative effect on the quality of natural coffee, natural coffee quality is influenced mainly by the thermal damage in dry air heated to 45 °C and natural coffees submitted to drying air temperature of 35 °C and low drying rates showed better quality in comparison with the coffee sun dried on a suspended bed.

Keywords: Relative humidity. Dew point temperature. Thermal damage.

## 1 INTRODUÇÃO

O processamento do café por via seca é o método mais utilizado no Brasil. Em geral, cafés naturais apresentam atributos sensoriais que os distinguem dos cafés produzidos pela via úmida, como menor acidez e maior corpo e doçura, sendo ingrediente essencial para ligas de café expresso (ILLY; VIANI, 1995; PUERTA-QUINTERO, 1996).

No entanto, o processamento pela via seca é, normalmente, associado a cafés de pior qualidade, quando comparados com cafés processados pela via úmida, como os cafés lavados da Colômbia e da América Central. Esse é um dos motivos pelos quais o Brasil ainda possui uma imagem internacional de fornecedor de grande quantidade de cafés comuns e de baixo preço. Diante disso, torna-se fundamental a realização de pesquisas científicas e tecnológicas no país, buscando o desenvolvimento de novas tecnologias de pós-colheita que proporcionem a produção de cafés naturais de melhor qualidade.

A baixa qualidade do café natural, muitas vezes, está ligada à ausência de cuidados na colheita e pós-colheita. No entanto, a colheita seletiva ou com pequenas quantidades de frutos verdes e a separação hidráulica de frutos sobremaduros, brocados, chochos, entre outros, aliadas a um adequado método de secagem, seguidas por um eficiente beneficiamento, podem proporcionar a produção de cafés naturais de excelente qualidade (BORÉM, 2008).

A presença da casca e da mucilagem com elevado teor de açúcares nos cafés naturais reduz a taxa de secagem e aumenta os riscos de ocorrerem fermentações indesejáveis, comprometendo a qualidade do café. Essa lentidão da secagem aumenta também a necessidade de área de terreiros e volume de secadores, além de demandar o uso intensivo de mão de obra, aumentando os custos do processamento do café.

Devido ao maior tempo necessário para a secagem do café natural em relação aos cafés em pergaminho quando submetidos às mesmas condições de secagem, tem sido recomendado, na prática, o uso de temperaturas da massa de café de 40 °C e 45 °C, respectivamente, para cafés em pergaminho e café natural. No entanto, em pesquisas recentes demonstrou-se que cafés naturais são mais sensíveis aos danos causados por temperaturas elevadas do que cafés em pergaminho e que perdem qualidade quando são submetidos a temperaturas maiores que 40 °C (OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009).

Acredita-se que a secagem do café combinando-se baixa temperatura e baixa umidade relativa do ar proporciona o aumento da taxa de secagem do café natural reduzindo-se seu tempo de secagem e, com isso, o risco da ocorrência de fermentações e desenvolvimento de microrganismos, além de se evitar danos térmicos. Entretanto, o efeito isolado da taxa de secagem, para uma mesma temperatura, nos aspectos químicos, fisiológicos e sensoriais do café, ainda é desconhecido.

Este trabalho foi realizado com os objetivos de avaliar os efeitos imediatos e latentes da temperatura do ar e da taxa de secagem nas características sensoriais, fisiológicas, químicas e no perfil de ácidos graxos livres do café natural, e comparar a qualidade do café natural submetido aos diferentes tratamentos de secagem mecânica com o café natural secado ao sol em leito suspenso.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Descrição da matéria-prima**

Utilizaram-se como matéria-prima, neste experimento, frutos de café maduros (cereja) da espécie *Coffea arabica* L., cv. Mundo Novo, colhidos na Fazenda Santa Mariana, localizada no município de Carmo da Cachoeira, MG (Latitude: 21°27'45"S; Longitude: 45°19'17,8"W; Altitude: 1100 m) e processados conforme descrito no capítulo II.

### **2.2 Delineamento experimental e análise estatística**

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado. Foram estudados os efeitos da temperatura e da taxa de secagem na qualidade do café natural. A taxa de secagem é uma variável dependente da temperatura de bulbo seco e da temperatura de ponto de orvalho. Foram estudados três níveis de temperatura de bulbo seco (35, 40 e  $45 \pm 1^\circ\text{C}$ ) e três níveis de taxa de secagem dentro de cada nível de temperatura em função de diferentes temperaturas de ponto de orvalho (2,6, 10,8 e  $16,2 \pm 0,5^\circ\text{C}$ ). Assim, a taxa de secagem foi considerada como fator hierárquico à temperatura de bulbo seco. As taxas de secagem em função da temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho são apresentadas na Tabela 6. Como testemunha foi utilizada a secagem completa do café ao sol em leite suspenso, constituindo o fator adicional. Foram realizadas quatro repetições para cada tratamento.

Uma vez que os fatores temperatura de bulbo seco e taxa de secagem não puderam ser mantidos constantes durante todo período de secagem, apresentando variações, respectivamente, de  $1^\circ\text{C}$  e 3%, foram considerados como fatores qualitativos.

Os dados obtidos das análises químicas, sensorial e fisiológicas do café foram submetidos à análise de variância utilizando-se o programa computacional Sisvar 4.0, segundo Ferreira (2000). Quando foram observadas diferenças significativas em função das temperaturas de bulbo seco e taxa de secagem, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Os cafés submetidos à secagem mecânica foram comparados com os cafés secados ao sol (fator adicional/testemunha), pelo teste de Dunnett, a 5% de significância.

### **2.3 Descrição dos secadores e do processo de secagem**

Os frutos foram colhidos com teor de água médio de  $1,9 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs) (65% bu). Uma parte foi secada em ao sol em leito suspenso até atingir o teor de água entre 30% e 35% (bu) e tiveram a secagem completada em secadores mecânicos. Como testemunha foi utilizada a secagem completa do café em leito suspenso.

Logo depois da seleção manual dos frutos maduros, o café foi espalhado nos terreiros suspensos em camadas com espessuras equivalentes a um fruto (cerca de 1,5 cm) e foram revolvidos cerca de 12 vezes ao dia. No início do terceiro dia, a espessura da camada foi aumentada para cerca de 3 cm. No fim do quinto dia, o café atingiu teor de água de  $0,5 \pm 0,05 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs) (30% a 35% bu). No início do sexto dia, parte do café foi levada para secadores mecânicos, onde foram secados até atingirem o teor de água de  $0,125 \pm 0,005 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs) (11 $\pm$  0,5% bu). Parte do café permaneceu no terreiro, constituindo-se na testemunha. Este café teve a espessura da camada aumentada para cerca de 5 cm e foi revolvido a cada 30 minutos, permanecendo com essa espessura até atingir o teor de água de  $0,14 \pm 0,005 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs), por cerca de 13 dias.

Todos os dias, após às 15h00, os terreiros suspensos contendo os cafés foram armazenados em local coberto, para evitar a exposição dos frutos ao orvalho da noite. Depois do quinto dia de pré-secagem, os cafés submetidos à secagem completa ao sol em leito suspenso (testemunha), além de serem armazenados em local coberto, foram amontoados e cobertos com pano. Na manhã seguinte, a partir de 9h00, os cafés eram novamente expostos ao sol.

Na secagem mecânica, o café foi submetido à secagem intermitente, intercalando-se 14 horas de secagem (8h00 até 22h00), com intervalos de 10 horas de repouso (22h00 até 08h00 do dia seguinte). A velocidade do ar de secagem foi mantida constante em  $0,33 \text{ m.s}^{-1}$ , correspondendo ao fluxo de  $20\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos frutos, o acompanhamento da secagem do produto foi realizado pelo método gravimétrico. As bandejas contendo as amostras foram retiradas do secador e pesadas, a cada duas horas, em uma balança analítica com resolução de 0,01 g, até os frutos atingirem o teor de água de  $0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs), o que correspondeu ao teor de água do café beneficiado de  $11\pm 0,5\%$  (bu). Com os resultados obtidos foram elaboradas as curvas de secagem e calculadas as taxas de secagem, conforme as equações 1 e 2.

$$U_t = \frac{Ma_i - (Mt_i - Mt_t)}{mms}$$

(1)

em que

$U_t$  = teor de água no tempo t ( $\text{kg.kg}^{-1}$  (bs));

$Ma_i$  = massa de água inicial (kg);

$Mt_i$  = massa total inicial (kg);

$Mt_t$  = massa total no tempo t (kg);



mms = massa de matéria seca (kg).

$$\text{Tx. Sec.} = \frac{U_{\text{ant}} - U_{\text{at}}}{\Delta t} \quad (2)$$

em que

Tx. Sec. = taxa de secagem ( $\text{g. kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ );

$U_{\text{ant}}$  = teor de água no tempo anterior ( $\text{g. kg}^{-1}$  (bs));

$U_{\text{at}}$  = teor de água atual ( $\text{g. kg}^{-1}$  (bs));

$\Delta t$  = intervalo de tempo entre as pesagens (horas);

Para minimizar possíveis diferenças de temperatura e fluxo de ar entre as bandejas de fundo perfurado, fez-se um rodízio de 90° na posição das bandejas a cada hora.

O teor de água do café beneficiado no início e no final da secagem mecânica foi determinado pelo método padrão ISO 6673 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2003).

O sistema de condicionamento de ar e o secador utilizados no experimento estão descritos no capítulo II.

Após a secagem, o café foi embalado em sacos de papel kraft pardo unifolhado e foram inseridos em sacos plásticos de polietileno transparente. As amostras foram armazenadas em câmara com ambiente controlado, à temperatura de 10 °C e umidade relativa de 50%.

#### **2.4 Caracterização da qualidade do café natural**

Com o objetivo de se avaliar os efeitos imediatos e latentes dos tratamentos de secagem na qualidade do café, foram realizadas análises

químicas, fisiológicas e sensoriais em duas épocas distintas: logo após a secagem e sete meses após a secagem. As análises foram realizadas em amostras de grãos classificados em peneira 16 acima, sem a presença de grãos mochos e defeituosos, para a uniformização da amostra e, sobretudo, a minimização de interferências que não fossem relacionadas aos tratamentos estudados.

#### **2.4.1 Análise sensorial**

A análise sensorial foi realizada no Pólo de Tecnologia em Qualidade do Café da Universidade Federal de Lavras, por juízes certificados de cafés especiais (SCAA *certified cupping judges*).

Foi utilizado o protocolo de análise sensorial da Associação Americana de Cafés Especiais (SCAA), de acordo com a metodologia proposta por Lingle (2001) para avaliação sensorial de cafés especiais. Nesse método, os atributos são agrupados em duas categorias, sendo uma subjetiva, representada pela fragrância/aroma, sabor, sabor residual, acidez, corpo, equilíbrio e impressão global, que são pontuados segundo sua qualidade em uma escala de 6 a 10 pontos, com intervalos de 0,25 pontos; e outra objetiva, representada pela uniformidade, doçura e xícara limpa (ausência de defeitos). Os atributos objetivos são pontuados em uma escala de 0 a 10 pontos, sendo atribuídos 2 pontos para cada xícara que apresentar normalidade quanto a uniformidade, doçura e xícara limpa, avaliando-se 5 xícaras por amostra. A nota final é obtida pela soma das notas de cada atributo.

Foi utilizado o ponto de torra moderadamente leve determinado visualmente pela coloração dos grãos, correspondente a 58 e 63 pontos, respectivamente, para grãos inteiros e grãos moídos, com tolerância de  $\pm 1$  ponto, conforme o sistema de classificação de cor, por meio de discos padronizados (SCAA/*Agtron Roast Color Classification System*). Foram torrados 100 g de

grãos de cada amostra. Durante a torração, fatores que afetam o ponto e a curva de torra, como temperatura e tempo de torra, foram monitorados, respeitando-se a faixa de tempo de torra entre 8 e 12 minutos. Todas as amostras foram torradas com antecedência mínima de 8 horas e máxima de 24 horas antes da degustação.

Em cada avaliação sensorial foram degustadas cinco xícaras de café representativas de cada amostra, realizando-se uma sessão de análise sensorial para cada repetição, totalizando quatro repetições para cada tratamento.

#### **2.4.2 Análises químicas**

As análises de açúcares totais, redutores e não redutores, acidez titulável total e sólidos solúveis totais foram realizadas no Laboratório de Qualidade do Café Dr. Alcides Carvalho, da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), em Lavras, MG.

Os açúcares totais e redutores foram extraídos pelo método de Lane-Enyon, citado pela Association of Official Analytical Chemists - AOAC (2011) e determinado pela técnica de Somogy, adaptada por Nelson (1944). Os açúcares não-redutores foram determinados pela diferença entre os açúcares totais e os redutores.

A acidez titulável total foi determinada por titulação com NaOH 0,1N, adaptando-se à metodologia citada pela AOAC (2011). Foram pesados 2 g da amostra de café moído e adicionados 50 mL de água destilada, agitando-se por uma hora. Em seguida, realizou-se a filtragem em papel de filtro e retiraram-se 5 mL da solução filtrada, colocando-a em um Erlenmeyer, com cerca de 50 mL de água destilada. Acrescentaram-se três gotas de fenolftaleína e, em seguida, titulou-se até a viragem com NaOH 0,1N. O resultado foi expresso em mL de NaOH 0,1N, por 100 g de amostra.

### **2.4.3 Condutividade elétrica e lixiviação de potássio**

As análises de condutividade elétrica foram realizadas no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas, no Departamento de Engenharia e as análises de lixiviação de potássio foram realizadas no Laboratório de Fertilidade de Solos e Nutrição de Plantas no Departamento de Ciência do Solo, ambos na Universidade Federal de Lavras.

A condutividade elétrica dos grãos crus foi determinada pela metodologia proposta por Loeffler, Tekrony e Egli (1988). Foram utilizadas quatro repetições de 50 grãos de cada parcela, as quais foram pesadas com precisão de 0,001 g e imersas em 75 mL de água destilada no interior de copos plásticos de 180 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 os dados obtidos, foi calculada a condutividade elétrica, expressando-se o resultado em  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  de grãos.

A lixiviação de íons de potássio foi realizada nos grãos crus, segundo metodologia proposta por Prete (1992). 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, expressando-se o resultado em ppm.

### **2.4.4 Perfil de ácidos graxos livres**

A análise e a determinação do perfil de ácidos graxos livres do café natural foram realizadas no Laboratório de Cromatografia do Departamento de

Química da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em Belo Horizonte, MG.

#### **2.4.4.1 Extração dos ácidos graxos livres**

Em um tubo de microcentrífuga contendo aproximadamente 65 mg de café moído foram adicionados 400 µl de uma solução aquosa de hidróxido de sódio 0,5N e submetido a banho ultrassônico, por 10 minutos, a 40°C. Após centrifugação a 6200rpm por 30 segundos, uma alíquota de 200 µl do sobrenadante foi transferida para outro tubo de microcentrífuga. Adicionaram-se, então, 400 µl de ácido clorídrico a 20%, uma ponta de espátula de NaCl e 600 µl de acetato de etila. Após agitação em vórtex por 10 segundos e repouso por 5 minutos, uma alíquota de 300 µl da camada orgânica foi retirada, colocada em tubos de microcentrífuga e seca por evaporação, obtendo-se, assim, os ácidos graxos livres.

#### **2.4.4.2 Metilação dos ácidos graxos livres**

Os ácidos graxos livres foram metilados com 100 µl BF<sub>3</sub> metanol (14%) contendo 1,0 mg/ml de laurato de metila (C12:0) usado como padrão interno (CHRISTIE, 1989). O tubo foi, então, aquecido, durante 10 minutos, em banho de água a 80°C e, em seguida, analisado por Cromatografia Gasosa.

#### **2.4.4.3 Cromatografia gasosa**

As análises foram realizadas em um cromatógrafo a gás HP5890 equipado com detector por ionização de chamas. Utilizou-se uma coluna HP-INNoWax (HP) 15 m x 0,25 mm com gradiente de temperatura: 120 °C a 220 °C

com taxa de aquecimento de 10 °C/min; injetor (split de 1/50) a 230 °C e detector a 230 °C. Hidrogênio foi utilizado como gás de arraste (2 ml/min) e volume de injeção de 1 µl. A identificação dos picos foi feita por comparação com padrões de ácidos graxos metilados SUPELCO 37.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a complexidade do fenômeno estudado e a necessidade de se realizar uma análise mais ampla e conclusiva dos resultados, optou-se, primeiramente, por apresentar os resultados para, em seguida, discuti-los de forma conjunta e compreensiva.

Durante o período de secagem dos frutos ao sol em leitos suspensos, a temperatura ambiente variou entre 10,4 °C e 25,7 °C. A temperatura e a umidade relativa médias no período foram, respectivamente, de 16,1 °C e 69,6%.

Na Tabela 1 são apresentados os teores de água do café (inicia e final), os tempos de secagem e as taxas de secagem médias e máximas em função da temperatura de bulbo seco e da temperatura do ponto de orvalho do ar de secagem.

Tabela 1 Teores de água, tempo de secagem, taxa de secagem média e máxima do café natural, em função da temperatura de bulbo seco e temperatura do ponto de orvalho do ar de secagem. UFLA, Lavras, 2011

Tbs (°C)	Tpo (°C)	UR (%)	Teor de água (bs) (kg kg <sup>-1</sup> )		Tempo de secagem (horas)	Taxa de secagem (g kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	
			Inicial	Final		Média	Máxima
35	16,2	32,7	0,497	0,141	76	4,68	11,34
35	10,8	23,0	0,513	0,142	66	5,61	13,35
35	2,6	13,1	0,502	0,142	56	6,41	14,59
40	16,2	25,0	0,473	0,146	50	6,57	15,89
40	10,8	17,5	0,456	0,145	42	7,38	21,22
40	2,6	10,0	0,471	0,147	38	8,51	23,14
45	16,2	19,2	0,484	0,144	30	10,60	23,19
45	10,8	13,5	0,484	0,146	28	12,13	29,82
45	2,6	7,7	0,488	0,146	26	13,27	53,12

Observa-se, na Tabela 1, que, conforme discutido no capítulo II, o aumento da temperatura de bulbo seco e a redução da temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem, para a uma mesma temperatura de bulbo seco,

causam redução do tempo de secagem e aumentam as taxas de secagem médias e máximas.

A taxa de secagem média foi calculada pela razão entre a perda de massa total durante o período de secagem e o tempo total de secagem. A taxa de secagem máxima foi observada nas primeiras duas horas de secagem, quando perda de massa no por unidade de tempo foi máxima, como pode ser observado na Figura 1, na qual são apresentadas as taxas secagem do café em função das temperaturas de bulbo seco e temperaturas do ponto de orvalho do ar de secagem.

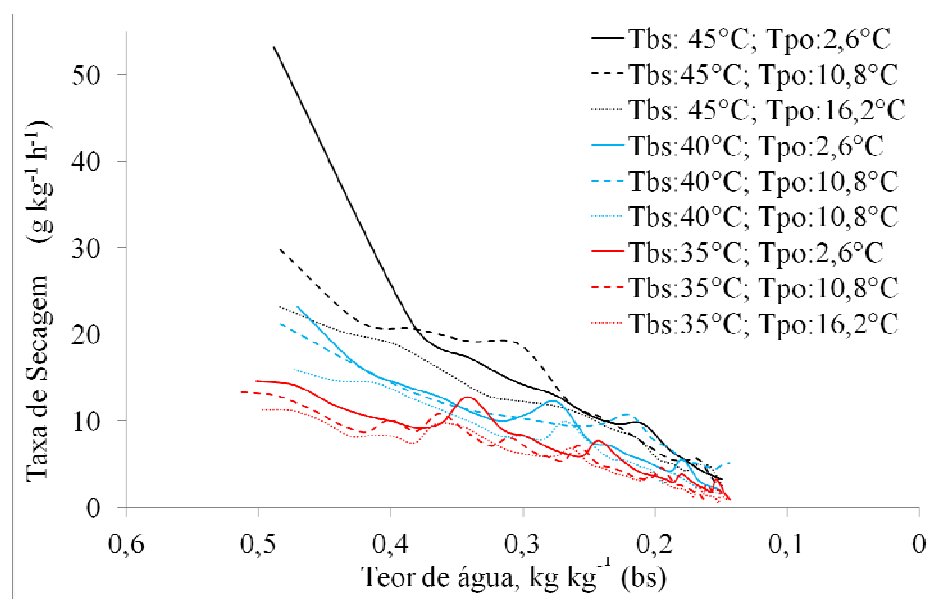


Figura 1 Taxa de secagem de frutos de café, em relação ao teor de água, em função da temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Observa-se que, de maneira geral, quanto maior a temperatura de bulbo seco e menor a temperatura do ponto de orvalho, para uma mesma temperatura, maior é a taxa de redução de água dos frutos de café. Verifica-se, ainda, que o



efeito dos tratamentos sobre as taxas de secagem é mais pronunciado no início do processo, ou seja, quando os frutos apresentam maiores teores de água. No final do processo de secagem, quando os cafés apresentam menores teores de água, verificam-se valores de taxa de secagem aproximados, para todos os tratamentos, indicados pela sobreposição das curvas.

Diante disso, pode-se inferir que possíveis alterações químicas, fisiológicas e sensoriais causadas por elevadas taxas de redução de água possam ocorrer já no início do processo de secagem, quando o café apresenta teor de água de, aproximadamente,  $0,5 \text{ kg kg}^{-1}$  (bs) (33% bu) e as taxas de secagem são máximas.

Saath et al. (2010), estudando os feitos da temperatura de secagem nos aspectos ultraestruturais de grãos de café, observaram que, durante a secagem do café natural a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , o citoplasma contraiu-se gradativamente, com pequenas oscilações no seu conteúdo, até atingir o teor de água de  $0,123 \text{ kg kg}^{-1}$  (bs) (11% bu), mantendo a integridade das células do endosperma. Por outro lado, na secagem a  $60^\circ\text{C}$ , o citoplasma contraiu-se de forma gradual até o teor de água  $0,43 \text{ kg kg}^{-1}$  (bs) (30% bu), mantendo a integridade das células. Entretanto, de  $0,43$  a  $0,25 \text{ kg kg}^{-1}$  (bs) (30% a 20% bu) de teor de água, o volume celular expandiu-se. Em seguida, a célula contraiu-se rapidamente até atingir o teor de água de  $0,123 \text{ kg kg}^{-1}$  (bs) (11% bu), comprometendo a integridade da membrana citoplasmática, resultando no extravasamento do citoplasma.

Os efeitos imediatos e latentes da temperatura e da taxa de secagem na qualidade do café natural foram avaliados, respectivamente, logo após a secagem e depois de sete meses de armazenamento, pelas análises de acidez titulável total (ATT), açúcares totais (AT), açúcares não redutores (ANR), açúcares redutores (AR), condutividade elétrica (CE), lixiviação de potássio, perfil de ácidos graxos livres e análise sensorial.

A análise de variância (Apêndices D, E, F e G) indicou que, independente do momento da análise, antes ou depois do armazenamento, os valores de acidez titulável total, açúcares totais e açúcares não-redutores e os teores dos ácidos graxos livres palmítico (C16:0), esteárico (C18:0), oleico (C18:1), linoleico (C18:2) e ácidos graxos livres totais (Totais) não apresentaram diferenças significativas em função da temperatura e da taxa de secagem dos frutos e que o café submetido à secagem mecânica não se diferenciou do café submetido à secagem completa ao sol. Os valores médios desses compostos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Valores médios de acidez titulável total (ATT), açúcares totais (AT), açúcares não-redutores (ANR), ácidos graxos livres palmítico (C16:0), esteárico (C18:0), oleico (C18:1), linoleico (C18:2) e ácidos graxos livres totais (AGLT) do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e secado completamente em ao sol, analisado logo após a secagem e após sete meses de armazenamento. UFLA, Lavras, MG, 2011

Análise	Logo após a secagem	Após sete meses de armazenamento
	Média	Média
ATT (NaOH 0,1N.100g <sup>-1</sup> )	233,25 <sup>ns</sup>	166,08 <sup>ns</sup>
AT (%)	7,58 <sup>ns</sup>	6,34 <sup>ns</sup>
ANR (%)	6,87 <sup>ns</sup>	5,65 <sup>ns</sup>
C 16:0 (%)	0,789 <sup>ns</sup>	0,869 <sup>ns</sup>
C 18:0 (%)	0,621 <sup>ns</sup>	0,653 <sup>ns</sup>
C 18:1 (%)	0,102 <sup>ns</sup>	0,102 <sup>ns</sup>
C 18:2 (%)	0,116 <sup>ns</sup>	0,114 <sup>ns</sup>
AGLT (%)	1,630 <sup>ns</sup>	1,738 <sup>ns</sup>

em que: <sup>ns</sup> não apresentam diferenças significativas (P>0,05), pelo teste F, em função da temperatura e da taxa de secagem.

Na Figura 2 é apresentado um cromatograma exemplo, que representa o perfil de ácidos graxos livres do café natural submetido a diferentes temperaturas e taxas de secagem.

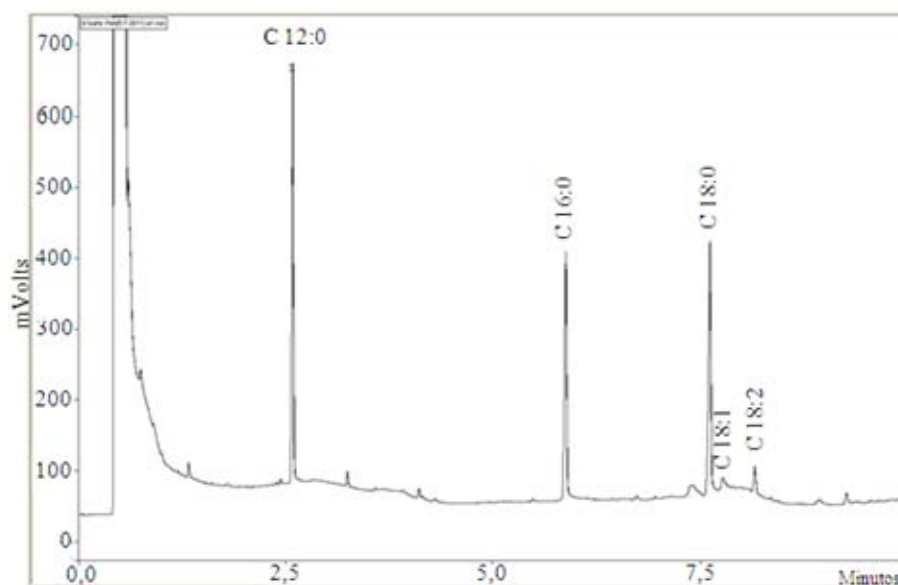


Figura 2 Cromatograma exemplo do perfil de ácidos graxos livres do café natural. UFLA, Lavras, MG, 2011

em que:

C 12:0 – laurato de metila (padrão interno);

C16:0 – Ac. palmítico; C18:0 – Ac. esteárico;

C18:1 – Ác. oleico; C18:2 – Ac. linoleico.

Condições adversas na pós-colheita, como o uso de temperaturas e taxas de secagem elevadas e condições inadequadas de armazenamento, podem causar mudanças expressivas nas principais reservas dos grãos, alterando as características sensoriais do café. Uma das primeiras modificações associadas à deterioração de sementes, em geral, é o aumento de ácidos graxos livres, produzidos a partir da hidrólise dos triacilgliceróis pelas lípases (SOARES,

2003). Os ácidos graxos livres podem ser oxidados na presença de oxigênio, dando origem a outros compostos como os aldeídos voláteis que são associados a sabores e aromas desagradáveis da bebida. Reduções significativas no conteúdo dos ácidos graxos insaturados linoleico (C18:2) e linolênico (C18:3) são observadas em grãos rançosos, enquanto os teores do maior ácido saturado, o ácido esteárico (C18:0), permanecem praticamente inalterados (VIDAL, 2001).

Esperava-se que maiores temperaturas e maiores taxas de secagem causassem danos ao café e, conseqüentemente, o aumento do teor de ácidos graxos livres. No entanto, não foram observadas diferenças significativas no perfil de ácidos graxos livres do café natural em função da temperatura e da taxa de secagem antes e depois do armazenamento. Assim, para as condições estudadas no presente trabalho, o perfil de ácidos graxos livres não contribuiu para a compreensão das alterações que ocorreram na qualidade do café.

A acidez titulável total é um indicativo da qualidade do café. Elevados níveis de acidez titulável, geralmente, estão associados à pior qualidade da bebida por causa da ocorrência de fermentações indesejáveis e do aumento do número de defeitos (FRANCA et al., 2005). Baixas taxas de secagem, quando o café apresenta elevado teor de água, podem permitir a ocorrência de fermentações, causando o aumento da acidez titulável total. No presente trabalho não ocorreram diferenças significativas nos níveis de acidez titulável total, indicando que as temperaturas e as taxas de secagem estudadas não interferem nos resultados dessas análises.

Quando os frutos de café são submetidos à secagem lenta, ocorre o acúmulo de açúcares não redutores, como a sacarose, que podem estabilizar membranas e proteínas em sementes secas ou promover a formação de uma fase vítrea no citoplasma, mantendo a qualidade fisiológica das sementes (GUIMARÃES et al., 2002; WILLIAMS; LEOPOLD, 1995; WOLKERS et al.,

1998). No presente trabalho não foram observados efeitos imediatos e latentes no teor de açúcares totais e não redutores do café natural, em função da temperatura e da taxa de secagem. No entanto, ressalta-se que, neste trabalho, foram realizadas análises de açúcares não-redutores totais, porém, a análise fracionada de açúcares poderá apresentar diferenças significativas nos teores de alguns açúcares, como a sacarose.

A análise de variância (Apêndices F, G, H e I) indicou que os valores médios de açúcares redutores, condutividade elétrica, lixiviação de potássio e da análise sensorial foram influenciados pela temperatura e pela taxa de secagem e que ocorreram diferenças significativas entre os cafés secados completamente ao sol e cafés submetidos à secagem mecânica.

Nas Tabelas 3 e 4 estão apresentados os dados das análises de condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural secado completamente ao sol (testemunha) e dos cafés submetidos à secagem com diferentes temperaturas e taxas de secagem.

Tabela 3 Condutividade elétrica do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e seco completamente ao sol, analisado logo após a secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tratamento			CE ( $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$ )
Tbs ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tpo ( $^{\circ}\text{C}$ )	Taxa de secagem máxima ( $\text{g água} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )	
35	16,2	11,34	53,37*
35	10,8	13,35	53,53*
35	2,6	14,59	61,77
40	16,2	15,89	56,74
40	10,8	21,22	66,21
40	2,6	23,14	64,62
45	16,2	23,19	78,61*
45	10,8	29,82	63,79
45	2,6	53,12	76,41*
Terreiro			65,10

\*média difere estatisticamente ( $p>0,05$ ), pelo teste de Dunnett, em relação ao café seco completamente em terreiro

Tabela 4 Condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e seco completamente em terreiro, analisado após sete meses de armazenamento. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tratamento			CE ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )	LK (ppm)
Tbs ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tpo ( $^{\circ}\text{C}$ )	Taxa de secagem máxima (g água $\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )		
35	16,2	11,34	62,12	18,63
35	10,8	13,35	61,83	17,95
35	2,6	14,59	77,75	24,53
40	16,2	15,89	62,92	19,07
40	10,8	21,22	88,34*	26,77*
40	2,6	23,14	81,36*	24,68*
45	16,2	23,19	85,71*	26,27*
45	10,8	29,82	75,04	23,35
45	2,6	53,12	85,23**	25,74*
Terreiro			67,06	20,88

\*média difere estatisticamente ( $p>0,05$ ), pelo teste de Dunnett, em relação ao café seco completamente em terreiro

Observa-se, pelos dados da Tabela 8 que, quando o café natural foi submetido à análise de condutividade elétrica logo após a secagem, os tratamentos submetidos às menores taxas de secagem (11,34 e 13,35 g água. $\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) e a menor temperatura (35 $^{\circ}\text{C}$ ) apresentaram valores de condutividade elétrica significativamente menores, quando comparados com os cafés submetidos à secagem completa ao sol. Já os cafés submetidos à temperatura de 45  $^{\circ}\text{C}$  e taxas de secagem de 23,19 e 53,12 g água  $\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  apresentaram valores de condutividade elétrica maiores do que cafés secos completamente ao sol.

Após sete meses de armazenamento (Tabela 9), os cafés submetidos às temperaturas de secagem de 40  $^{\circ}\text{C}$  e 45 $^{\circ}\text{C}$  e taxas de secagem acima de 21 g água. $\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  apresentaram valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio significativamente maiores, quando comparados aos do café seco ao sol.

Nas Tabelas 5 e 6 apresentam-se os valores de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio em função da temperatura de secagem, logo após a secagem e após sete meses de armazenamento, respectivamente.

Tabela 5 Valores médios de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Temperatura (°C)	Açúcares redutores (%)	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Lixiviação de potássio (ppm)
35	0,468 a	56,22 a	17,62 a
40	0,604 b	61,18 b	18,77 a
45	0,491 ab	72,93 c	21,50 b

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey.

Tabela 6 Valores médios de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Temperatura (°C)	Açúcares redutores (%)	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Lixiviação de potássio (ppm)
35	0,353 a	67,23 a	20,36 a
40	0,395 ab	77,54 b	23,51 b
45	0,415 b	81,99 b	25,12 b

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey.

Observa-se que, independentemente do momento da análise, após a secagem ou depois de sete meses de armazenamento, os cafés secos à temperatura de 35 °C apresentam valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio significativamente menores em comparação com os dos cafés secos à temperatura de 45 °C. Os cafés submetidos à temperatura de secagem de 40 °C

apresentaram valores intermediários, indicando a tendência do aumento da condutividade elétrica e lixiviação de potássio com o aumento da temperatura.

No que se refere à análise de açúcares redutores realizada logo após a secagem, não foi possível observar tendência definida em função da temperatura de secagem. Por outro lado, após sete meses de armazenamento, os teores de açúcares redutores apresentaram a mesma tendência dos dados de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, ou seja, os teores desses compostos aumentaram com o aumento da temperatura de secagem. Os cafés submetidos à secagem com temperatura do ar de 35°C apresentaram valores de açúcares redutores significativamente menores em comparação com os cafés secados à temperatura de 45 °C, enquanto os cafés secos com ar aquecido a 40 °C apresentaram valores intermediários, não diferindo estatisticamente dos demais.

Nas Tabelas 7 e 8 estão apresentados os resultados das análises de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio, em função da taxa de secagem máxima, para cada nível de temperatura, antes e depois do armazenamento.

Tabela 7 Teores médios de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, logo após a secagem, em função da taxa de redução de água, dentro de cada nível de temperatura. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Taxa de secagem (g água.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	Açúcares redutores (%)	Condutividade elétrica (μS.cm <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup> )
35	11,34	0,428 a	53,36 a
	13,35	0,428 a	53,53 a
	14,59	0,548 a	61,77 b
40	15,89	0,443 a	56,74 a
	21,22	0,713 b	66,21 b
	23,14	0,657 b	64,62 b
45	23,19	0,535 a	78,61 b
	29,82	0,462 a	63,79 a
	53,12	0,475 a	76,41 b

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si (P>0,05), pelo teste de Tukey.



Tabela 8 Teores médios de açúcares redutores, condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da taxa de redução de água, dentro de cada nível de temperatura. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Taxa de secagem (g água.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	Açúcares redutores (%)	Condutividade elétrica (μS.cm <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup> )	Lixiviação de potássio (ppm)
35	11,34	0,383 a	62,12 a	18,63 a
	13,35	0,294 a	61,82 a	17,94 a
	14,59	0,381 a	77,75 b	24,53 b
40	15,89	0,385 a	62,92 a	19,07 a
	21,22	0,441 a	88,33 b	26,77 b
	23,14	0,359 a	81,36 b	24,68 b
45	23,19	0,458 a	85,23 a	26,27 a
	29,82	0,353 b	75,04 a	23,34 a
	53,12	0,435 ab	85,23 a	25,74 a

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si (P>0,05), pelo teste de Tukey.

O teor de açúcares redutores foi pouco influenciado pelo efeito isolado da taxa de secagem, para cada nível de temperatura. Quando as análises foram realizadas logo após a secagem, foram observados efeitos significativos da taxa de secagem apenas quando se utilizou a temperatura de 40 °C. Para essa temperatura, quando o café foi submetido à menor taxa de secagem (15,89 g água kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), foram observados teores de açúcares redutores significativamente menores, em comparação com os cafés submetidos às demais taxas de secagem, que não se diferenciaram entre si. Quando as análises foram realizadas após sete meses de armazenamento, observou-se que os cafés submetidos à temperatura de 45 °C e à taxa de secagem intermediária (29,82 g água.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>) apresentaram teores de açúcares redutores estatisticamente inferiores, quando comparados com os cafés submetidos à taxa de secagem de 23,19 g água kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Já os cafés submetidos à taxa de secagem de 53,12 g água kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> não apresentaram diferenças significativas em relação aos demais. Esses resultados não apresentam tendência consistente em função da taxa de secagem, não sendo

possível estabelecer uma relação entre o teor de açúcares redutores e a taxa de secagem do café natural.

Observa-se que, para as temperaturas de secagem de 35 °C e 40 °C a elevação das taxas de secagem está associada com o aumento dos valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio. Os cafés submetidos às menores taxas de secagem apresentam valores de dessas análises significativamente menores, quando comparados com os cafés submetidos às maiores taxas de secagem. As taxas de secagem intermediárias resultam em valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio também intermediários, sendo que, por vezes, não se diferenciam em relação às maiores taxas e, por outras, não se diferenciam das menores taxas de secagem.

Quando os cafés foram secos à temperatura de 45 °C, os efeitos da taxa de secagem sobre os valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio foram menos evidentes. Para essa temperatura, infere-se que os danos térmicos se sobrepuseram aos danos causados por elevadas taxas de secagem, minimizando seus efeitos.

A análise de variância das notas da análise sensorial do café (Apêndice H), realizada logo após a secagem, indicou que os atributos finalização, equilíbrio e impressão global não foram afetados pela temperatura de secagem, mas foram afetados pela taxa de secagem, dentro de cada nível de temperatura. Os demais atributos e a nota total foram afetados tanto pela temperatura quanto pela taxa de secagem. Após o armazenamento, as notas da análise sensorial do café não foram afetadas pela temperatura. A taxa de secagem apresentou efeitos significativos sobre a nota total e sobre todos os atributos, exceto o corpo.

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentadas as comparações entre as notas dos atributos e da nota total da análise sensorial dos cafés secados ao sol e cafés submetidos às diferentes combinações de temperatura e taxa de secagem, antes e após o armazenamento.

Tabela 9 Aspectos sensoriais do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e secado completamente em terreiro, analisado logo após a secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tratamento		Fragrância	Acidez	Corpo	Equilíbrio	Impressão global	Total
Tbs (°C)	TS.Max (g água.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )						
35	11,34	7,94*	7,69*	7,69*	7,56*	7,69*	83,94*
35	13,35	7,88*	7,50	7,63	7,38	7,44	82,88
35	14,59	7,44	7,13	7,31	7,13	7,19	80,38
40	15,89	7,75	7,50	7,50	7,44	7,56	82,69
40	21,22	7,56	7,25	7,38	7,19	7,19	81,00
40	23,14	7,81	7,50	7,50	7,25	7,50	82,31
45	23,19	7,13	7,06	7,13	7,00	7,00	79,25
45	29,82	7,75	7,44	7,69*	7,50	7,56	83,00
45	53,12	7,19	7,00	7,19	6,94	6,94	79,06
Terreiro		7,31	7,13	7,31	7,12	7,06	80,25

\*médias diferem estatisticamente ( $p>0,05$ ), pelo teste de Dunnett, em relação ao café secado completamente em terreiro; TS. Max. – Taxa de secagem máxima.

Tabela 10 Aspectos sensoriais do café natural submetido à secagem mecânica com diferentes temperaturas e taxas de secagem e seco completamente em terreiro, analisado após sete meses de armazenamento. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tratamento		Fragrância	Sabor	Acidez	Impressão global	Total
Tbs (°C)	TS. Max. (g água.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )					
35	11,34	7,46	7,54*	7,37	7,42*	81,79*
35	13,35	7,58*	7,25	7,33	7,13	80,67
35	14,59	7,17	6,84	7,09	6,79	78,79
40	15,89	7,67*	7,46	7,50*	7,38	81,75
40	21,22	7,29	6,84	7,13	6,92	79,04
40	23,14	7,29	6,88	7,17	6,83	78,84
45	23,19	7,08	6,79	7,17	6,88	78,67
45	29,82	7,54	7,42	7,33	7,42*	81,42
45	53,12	6,92	6,67	6,88	6,59	77,50
Terreiro		7,00	6,75	7,00	6,79	78,50

\*média diferem estatisticamente ( $p>0,05$ ), pelo teste de Dunnett, em relação ao café seco completamente em terreiro; TS. Max. – Taxa de secagem máxima.

Observa-se, pelos dados das Tabelas 9 e 10, que, de maneira geral, os cafés secos à temperatura de 35 °C e taxa de secagem de 11,34 g.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> apresentam notas significativamente maiores, quando comparados com o café seco completamente em terreiro.

Na Tabela 11 são apresentados os efeitos da temperatura de secagem sobre os aspectos sensoriais do café natural, quando as análises foram realizadas logo após a secagem. Após sete meses de armazenamento, não foram observadas diferenças significativas nos atributos sensoriais do café devido ao efeito isolado da temperatura. Foram observados apenas os efeitos das diferentes taxas de secagem dentro de cada nível de temperatura.

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentados os efeitos da taxa de secagem dentro de cada nível de temperatura nas características sensoriais do café natural analisados, respectivamente, logo após a secagem e após o armazenamento.

Tabela 11 Notas médias de fragrância, sabor, acidez, corpo e nota total do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Temperatura °C	Fragrância	Sabor	Acidez	Corpo	Total
35	7,75 a	7,58 a	7,43 a	7,54 a	82,40 a
40	7,71 a	7,52 a	7,42 a	7,45 ab	82,00 a
45	7,35 b	7,23 b	7,17 b	7,33 b	80,44 b

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey.

Tabela 12 Notas médias de cada atributo e nota total da análise sensorial do café natural, logo após a secagem, em função da taxa de secagem, dentro de cada nível de temperatura. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Taxa de secagem (g água.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	Fragrância	Sabor	Acidez	Corpo	Finalização	Equilíbrio	Impressão global	Total
35	11,34	7,94 a	7,87 a	7,69 a	7,68 a	7,50 a	7,56 a	7,68 a	83,94 a
	13,35	7,87 ab	7,69 ab	7,50 ab	7,62 a	7,37 ab	7,37 ab	7,44 a	82,87 ab
	14,59	7,44 b	7,19 b	7,12 b	7,31 b	7,00 b	7,12 b	7,18 a	80,37 b
40	15,89	7,75 a	7,56 a	7,50 a	7,50 a	7,37 a	7,43 a	7,56 a	82,68 a
	21,22	7,56 a	7,37 a	7,25 a	7,37 a	7,06 a	7,19 a	7,18 a	81,00 a
	23,14	7,81 a	7,62 a	7,50 a	7,50 a	7,12 a	7,25 a	7,50 a	82,31 a
45	23,19	7,12 a	7,06 ab	7,06 ab	7,12 a	6,87 a	7,00 a	7,00 a	79,25 a
	29,82	7,75 b	7,62 a	7,44 a	7,68 b	7,43 b	7,50 b	7,56 b	83,00 b
	53,12	7,19 a	7,00 b	7,00 b	7,18 a	6,81 a	6,93 a	6,94 a	79,06 a

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey.

Tabela 13 Notas médias de cada atributo e nota total da análise sensorial do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da taxa de secagem, dentro de cada nível de temperatura. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Taxa de secagem (g água.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	Fragrância	Sabor	Acidez	Corpo	Finalização	Equilíbrio	Impressão global	Total
35	11,34	7,46 a	7,54 a	7,37 a	7,41 a	7,29 a	7,29 a	7,41 a	81,79 a
	13,35	7,58 a	7,25 ab	7,33 a	7,20 a	7,12 a	7,04 ab	7,12 ab	80,67 ab
	14,59	7,16 a	6,83 b	7,08 a	7,25 a	6,83 a	6,83 b	6,79 b	78,79 b
40	15,89	7,66 a	7,45 a	7,50 a	7,33 a	7,21 a	7,20 a	7,35 a	81,74 a
	21,22	7,29 a	6,83 a	7,12 b	7,16 a	6,83 a	6,87 a	6,91 a	79,04 ab
	23,14	7,29 a	6,87 a	7,16 b	7,12 a	6,71 a	6,83 a	6,83 a	78,83 b
45	23,19	7,08 ab	6,79 ab	7,16 ab	7,25 a	6,75 ab	6,75 a	6,87 ab	78,66 ab
	29,82	7,54 a	7,41 a	7,33 a	7,29 a	7,20 a	7,20 b	7,41 a	81,41 a
	53,12	6,91 b	6,66 b	6,87 b	7,12 a	6,62 b	6,70 a	6,58 b	77,50 b

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey.

Observa-se, na Tabela 11 que, quando a análise sensorial dos cafés foi realizada logo após a secagem, os cafés submetidos à temperatura de secagem de 35 °C e 40 °C apresentaram notas de fragrância, sabor, acidez e corpo e nota total significativamente maiores, quando comparados com os cafés submetidos à temperatura de secagem de 45 °C.

Nas Tabelas 12 e 13 observa-se que, para os cafés secos à temperatura de 35°C, tanto antes quanto após o armazenamento, as notas obtidas pelos cafés expostos à menor taxa de secagem (11,34 g água.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>) foram significativamente maiores, quando comparados àqueles submetidos à maior taxa de secagem (14,59 g água.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>). A taxa de secagem média (13,35 g água.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>) proporcionou notas totais intermediárias, que não diferiram estatisticamente das demais.

Quando os cafés foram submetidos à temperatura de 40°C, não foram observados efeitos significativos da taxa de secagem antes do armazenamento. Porém, após sete meses de armazenamento, o mesmo efeito da taxa de secagem observado para a temperatura de 35°C também foi observado para a temperatura de 40 °C, ou seja, a menor taxa de secagem proporcionou maiores notas, quando comparada com a maior taxa de secagem e a taxa de secagem intermediária proporcionou notas intermediárias, que não diferiram das demais.

Na secagem a 45°C, não foram observadas diferenças significativas entre os cafés submetidos à menor e à maior taxa de secagem, tanto antes quanto depois do armazenamento. Para a taxa de secagem intermediária (29,82 g água.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>), observaram-se, antes do armazenamento, notas significativamente maiores em comparação com os cafés submetidos às demais taxas de secagem. Após o armazenamento, as notas foram significativamente maiores em relação ao café submetido à maior taxa de secagem, porém, não se diferenciaram das notas do café submetido à menor taxa de secagem.

Elevadas temperaturas e taxas de secagem podem causar a redução da qualidade fisiológica de sementes, devido à desestruturação e, conseqüentemente, à perda da permeabilidade seletiva do sistema de membranas celulares do endosperma do café. Essas alterações podem ser indicadas pelo aumento dos valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio que têm sido utilizados em várias pesquisas como indicadores da integridade de membranas e qualidade do café (CORADI et al., 2007; ISQUIERDO, 2008; KRZYZANOWSKY; FRANÇA NETO; HENNING, 1991; MARQUES et al., 2008; OLIVEIRA, 2010; PRETE, 1992; TAVEIRA, 2009).

Nesse trabalho, independente da época em que as análises foram realizadas, antes ou após o armazenamento, os valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio dos cafés apresentaram clara tendência de aumento com a elevação da temperatura. Os cafés submetidos à secagem com a temperatura de 35 °C apresentaram valores menores de condutividade elétrica em comparação com os cafés secos à temperatura de 45 °C. Já os cafés secos à temperatura de 40°C apresentaram valores intermediários. Esses resultados comprovam os efeitos negativos das temperaturas elevadas para a produção de cafés naturais especiais.

Observou-se, ainda, que, para as temperaturas de secagem de 35 °C e 40°C, maiores taxas de secagem causam o aumento dos valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, indicando maiores níveis de danos ao sistema de membranas celulares dos grãos de café. Para a temperatura de 45 °C, o efeito danoso da taxa de secagem é sobreposto pelo efeito do dano térmico e não apresenta tendência clara e conclusiva. Para essa temperatura, tanto a elevada taxa de secagem quanto o maior tempo de exposição a essa temperatura quando o café é submetido à menor taxa de secagem causam danos fisiológicos ao café.



Os resultados da análise sensorial do café apresentam a mesma tendência indicada pelos testes de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, ou seja, o aumento da temperatura é prejudicial à qualidade do café e o aumento da taxa de secagem afeta negativamente a qualidade do café e seu efeito depende da temperatura. Para as temperaturas de 35 °C e 40 °C, os efeitos negativos da taxa de secagem na qualidade do café são mais pronunciados. Para a temperatura de 45 °C, esses efeitos são sobrepostos pelos efeitos dos danos térmicos, tornando o efeito da taxa de secagem pouco evidente. A análise individual de cada atributo sensorial indica a mesma tendência das notas totais, em função da temperatura e da taxa de secagem.

Esses resultados estão de acordo com vários trabalhos que observaram baixos valores de condutividade elétrica associados a cafés de melhor qualidade sensorial (CORADI et al., 2007; ISQUIERDO, 2008; MARQUES et al., 2008; OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009). A perda da permeabilidade seletiva das membranas celulares permite que componentes químicos, antes compartimentalizados, entrem em contato com enzimas hidrolíticas e oxidativas, alterando a composição química dos grãos e, conseqüentemente, o sabor e o aroma da bebida do café (MARQUES et al., 2008).

Esses resultados contrariam a hipótese inicial. Esperava-se que o aumento da taxa de secagem com o uso de temperaturas baixas proporcionaria a produção de cafés naturais especiais com menor tempo de secagem e menores riscos de fermentações e danos térmicos. No entanto, observou-se que elevadas taxas de secagem são prejudiciais à qualidade do café, mesmo quando são utilizadas baixas temperaturas. A rápida desidratação do café causa danos à estrutura celular do endosperma, desencadeando uma série de reações químicas e bioquímicas que interferem negativamente na qualidade sensorial da bebida. Para temperaturas de secagem mais elevadas, o efeito negativo da taxa de

secagem é sobreposto pelo efeito do dano térmico e não apresenta tendência clara e conclusiva.

Comparando-se a qualidade de bebida dos cafés submetidos à secagem mecânica e dos cafés secos completamente em terreiro, observa-se que tanto antes quanto depois do armazenamento, os cafés submetidos à secagem à temperatura de 35 °C e taxas de secagem de 11,34 g água.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> apresentaram notas superiores, em comparação com os cafés secados em terreiro. Os demais tratamentos não se diferenciaram do terreiro. Além disso, os cafés submetidos à secagem à temperatura de 35 °C e taxa de secagem de 11,34 g água.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> apresentaram notas de 83,94 e 81,79, logo após a secagem e após sete meses de armazenamento, respectivamente. Cafés com notas globais entre 80 e 84 pontos, conforme a escala de classificação da SCAA, são classificados como cafés especiais e podem alcançar valores de mercado de até 50% acima do café *commodity*. Esses resultados indicam que esse tratamento é recomendado para a secagem do café natural, quando o objetivo é a produção de cafés naturais especiais.

#### 4 CONCLUSÕES

A temperatura de 35 °C é recomendada para a produção de cafés naturais especiais.

A temperatura de 45°C não é recomendada para a produção de cafés naturais especiais.

Cafés naturais submetidos à secagem à temperatura de 35 °C apresentam melhor qualidade quando comparados a cafés naturais secos à temperatura de 45 °C.

A taxa de secagem interfere na qualidade do café natural.

A elevação da taxa de secagem, para as temperaturas de 35 °C e 40 °C, tem efeito negativo sobre qualidade do café natural.

A qualidade do café natural é influenciada, principalmente, pelos danos térmicos na secagem com ar aquecido a 45°C.

Cafés naturais submetidos à secagem com temperatura do ar de 35 °C e taxas de secagem de 11,34 g água.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> apresentaram melhor qualidade, em comparação com os cafés secados em terreiro

## REFERÊNCIAS

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. Washington, 2011. 1018 p.

BORÉM, F. M. Processamento do café. In: \_\_\_\_\_. **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 127-158.

CHRISTIE, W. W. **Gas chromatography and lipids, a practical guide**. Ayr: The Oily, 1989. 184 p.

CORADI, P. C. et al. Effect of drying and storage conditions on the quality of natural and washed coffee. **Coffe Science**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 38-47, Jan./June 2007.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA UFSCAR, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FRANCA, A. S. et al. Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. **Food Chemistry**, Oxford, v. 90, n. 1/2, p. 89-94, Mar./Apr. 2005.

GUIMARÃES, R. M. et al. Tolerância à dessecação em sementes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 1, p. 128-139, jan./fev. 2002.

ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso coffee: the chemistry of quality**. London: 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. **Secagem e qualidade do café cereja desmucilado submetido a diferentes períodos de repouso**. 2008. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

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

LINGLE, T. R. **The coffee cupper's handbook**: systematic guide to the sensory evaluation of coffee's flavor. 3<sup>rd</sup> ed. Long Beach: Specialty Coffee Association of America, 2001. 66 p.

LOEFFLER, T. M.; TEKRONY, D. M.; EGLI, D. B. The bulk conductivity test as an indicator of soybean quality. **Journal of Seed Technology**, Lansing, v. 12, n. 1, p. 37-53, Mar. 1988.

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

NELSON, N. A photometric adaptation of Somogy method for the determination of glucose. **Journal of Biological Chemists**, Baltimore, v. 153, n. 1, p. 75-84, Apr. 1944.

OLIVEIRA, P. D. **Aspectos ultraestruturais e fisiológicos associados à qualidade da bebida de café arábica submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

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.

PUERTA-QUINTERO, G. I. Evaluación de la calidade del café colombiano procesado por via seca. **Cenicafé**, San José, v. 47, n. 2, p. 85-90, 1996.

SAATH, R. et al. Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 196-203, jan./fev. 2010.

SOARES, T. A. **Análise da acidez graxa como índice de qualidade em grãos de soja.** 2003. 74 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

TAVEIRA, J. H. S. **Aspectos fisiológicos e bioquímicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem.** 2009. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

VIDAL, H. M. **Composição lipídica e a qualidade do café (*Coffea arabica* L.) durante armazenamento.** 2001. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

WILLIAMS, R. J.; LEOPOLD, A. C. Changes in glass transition temperatures in germinating pea seeds. **Seed Science Research**, Oxon, v. 5, n. 1, p. 117-120, 1995.

WOLKERS, W. F. et al. Fourier transform infrared microscopy detects changes in protein secondary structure associated with desiccation tolerance in developing maize embryos. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 3, p. 1169-1177, Mar. 1998.

## **CAPÍTULO 4**

**Efeitos imediatos e latentes da pré-secagem em terreiro, em combinação  
com a temperatura do ar de secagem na qualidade do café natural**

## RESUMO

A ausência de cuidados e o manejo inadequado do café natural durante a colheita e pós-colheita, muitas vezes, causam significativos prejuízos à sua qualidade. No início da secagem do café natural ao sol, os frutos maduros (cereja) possuem elevado teor de água, cerca de  $1,9 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs) (65% bu), favorecendo a ocorrência de fermentações, se forem submetidos a um manejo inadequado ou a condições ambientais desfavoráveis. A secagem completa do café natural em secadores possibilita rápida desidratação dos frutos, reduzindo drasticamente o risco da ocorrência de fermentações. Porém, o uso de temperaturas elevadas no início da secagem, quando os frutos apresentam elevados teores de água, pode causar danos que depreciem a qualidade do café. Esse trabalho foi realizado com o objetivo de se estudar os efeitos da temperatura de secagem (35, 40 e 45 °C) e do manejo da secagem, com pré-secagem ao sol em leito suspenso e secagem completa em secador, na qualidade do café natural. Frutos maduros de café (*Coffea arabica* L. cv. Mundo Novo) foram colhidos e selecionados manualmente. Uma parcela foi distribuída, imediatamente, em leito suspenso até atingir o teor de água de aproximadamente  $0,5 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs) (30 - 35% bu) e, em seguida, submetido à secagem mecânica até atingir o teor de água de  $0,125 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs) (11% bu). Outra parcela foi levada, imediatamente, para secadores mecânicos e foram secas até o teor de água de  $0,125 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs). Como testemunha foi utilizada a secagem completa do café ao sol em leito suspenso até o teor de água de  $0,125 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs). Os efeitos imediatos e latentes dos tratamentos sobre a qualidade do café foram avaliados pelas análises de acidez titulável total, açúcares totais, redutores e não-redutores, condutividade elétrica, lixiviação de potássio e análise sensorial. Os dados observados permitiram concluir que: temperaturas de secagem superiores a 40 °C são prejudiciais à qualidade do café natural e a secagem completa em secadores mecânicos com temperaturas máximas do ar de 40°C não prejudica a qualidade do café natural.

Palavras-chave: Dano térmico. Teor de água. Qualidade de bebida. Composição química.



## ABSTRACT

The lack of care and inadequate management of natural coffee during harvest and post-harvest, often cause significant damage to their quality. At the beginning of sun drying of natural coffee, the ripe fruit have high moisture content, about  $1.9 \text{ kg.kg}^{-1}$  (db) (65% wb), favoring the occurrence of fermentation, if subjected to an improper management or unfavorable environmental conditions. The complete drying of natural coffee in dryers enables rapid dehydration of fruits, reducing dramatically the risk of the fermentation occurrence. However, the use of high temperatures at the beginning of drying, when the fruits have large moisture contents may cause damage that depreciate the quality of coffee. This work was carried out with the objective to study the effects of drying temperature (35, 40 and 45 °C) and of management of dry, with pre-drying on a suspended yard or complete drying in a mechanical dryer, on the quality of natural coffee. The ripe coffee (*Coffea arabica* L. cv. Mundo Novo) were harvested and selected manually. A portion was distributed immediately on a suspended bed until the moisture content reach approximately  $0.5 \text{ kg.kg}^{-1}$  (db) (30 - 35% wb) and then subjected to mechanical drying until reach the moisture content of  $0.125 \text{ kg.kg}^{-1}$  (db) (11% wb). Another portion was taken immediately to mechanical dryers and was dried until the moisture content of  $0.125 \text{ kg.kg}^{-1}$  (db). The complete coffee sun drying on a suspended bed until the moisture content of  $0.125 \text{ kg.kg}^{-1}$  (db), was used as a control. The immediate and latent effects of treatments on the coffee quality were evaluated by analysis of total titratable acidity, total sugars, reducing and non-reducing sugars, electrical conductivity, potassium leaching and sensory analysis. The observed data showed that: drying temperatures above 40 °C are harmful to the quality of natural coffee and complete drying in mechanical dryers with maximum air temperatures of 40 °C did not affect the quality of natural coffee.

Keywords: Thermal damage. Water content. Quality of beverage. Chemical composition.

## 1 INTRODUÇÃO

A ausência de cuidados e o manejo inadequado do café natural durante a colheita e pós-colheita, como presença de frutos imaturos e sobremaduros e a ocorrência de fermentações e desenvolvimento de microrganismos, causam significativos prejuízos para a sua qualidade. No início da operação de secagem do café natural em terreiro, os frutos maduros (cereja) possuem elevado teor de água, cerca de  $1,9 \text{ kg.kg}^{-1}$  (bs) (65% bu). Apesar de ser facilmente retirada quando os frutos são expostos ao sol, a presença de água livre favorece a ocorrência de fermentação e o desenvolvimento de microrganismos, principalmente na parte inferior em contato com o terreiro. Além disso, os frutos maduros, nos primeiros dias de secagem, descascam-se facilmente por causa da compressão durante a movimentação, desuniformizando o processo de secagem. Assim, para se garantir a secagem contínua, uniforme e sem fermentações e, ainda, minimizando a remoção da casca, recomenda-se, nos primeiros dias, espalhar o café no terreiro em camadas finas com espessura equivalente à de um fruto expondo-os integralmente à radiação solar e sem revolvimento dos frutos (BORÉM, 2008).

No entanto, a evolução tecnológica ocorrida na cafeicultura nos últimos anos, principalmente na mecanização da colheita do café, não foi acompanhada pelas tecnologias de secagem e, tampouco, pelas estruturas de secagem de muitas propriedades. Esses fatos influenciam o manejo da secagem do café, pois, muitas vezes, a área disponível de terreiros e o volume de secadores são menores do que o necessário para secar o volume de café colhido diariamente. Em função disso, o café é espalhado no terreiro em camadas mais espessas do que o recomendado e, na secagem mecânica, com o objetivo de se acelerar o processo de secagem aumentando a capacidade de processamento, são utilizadas temperaturas do ar acima do recomendado, causando prejuízos à qualidade do

café, tanto pela ocorrência de fermentações no terreiro como por danos térmicos nos secadores.

A secagem completa do café natural em secadores possibilita rápida desidratação dos frutos, reduzindo drasticamente o risco da ocorrência de fermentações. Além disso, essa técnica é uma alternativa para as regiões nas quais a condição climática impossibilita a secagem de cafés naturais em terreiro, devido ao elevado tempo necessário para que ocorra a secagem e o elevado risco de ocorrência de fermentações e desenvolvimento de microrganismos.

Porém, o uso da temperatura de 45 °C, tradicionalmente recomendada para a secagem de café natural no início da secagem, quando os frutos apresentam elevados teores de água, pode causar danos que depreciam a qualidade do café (OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009). No entanto, a secagem com ar ultrasseco e com temperaturas moderadas, na faixa de 35 °C, pode proporcionar a desidratação rápida dos frutos, evitando-se o risco da ocorrência de fermentações e desenvolvimento de microrganismos e sem causar danos térmicos, e, dessa forma, produzir cafés naturais de excelente qualidade.

Este trabalho foi realizado com os objetivos de avaliar os efeitos imediatos e latentes da temperatura do ar de secagem na qualidade do café natural; comparar os efeitos imediatos e latentes da secagem completa em secador e da pré-secagem em terreiro com complementação da secagem em secadores, na qualidade do café e comparar a qualidade do café natural submetido à secagem mecânica total ou parcial com a qualidade café natural secado totalmente em terreiro.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Obtenção e descrição da matéria-prima**

A colheita e a seleção dos frutos estão descritos no capítulo II.

### **2.2 Descrição dos secadores e do processo de secagem**

Os frutos foram colhidos com teor de água médio de 65% (bu). Uma parte foi seca em terreiro suspenso até atingir o teor de água entre 30% e 35% (bu) e tiveram a secagem completada em secadores mecânicos, seguindo a metodologia descrita no capítulo III. Outra parte foi submetida à secagem completa em secador, sem pré-secagem em terreiro. Como testemunha foi utilizada a secagem completa do café em terreiro, conforme metodologia descrita no capítulo III.

Os secadores e o processo de secagem mecânica utilizados neste experimento estão descritos no capítulo II. Os cafés submetidos à secagem completa em secadores foram secos ininterruptamente, ou seja, sem o período de repouso noturno, até atingir teores de água inferiores a 35% (bu). Após esse período, a secagem foi interrompida às 22h00 e reiniciada às 8h00 do dia seguinte, até o café atingir o teor de água de  $11 \pm 0,5\%$  (bu).

### **2.3 Delineamento experimental e análise estatística**

O experimento foi desenvolvido em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Foram estudados os efeitos da temperatura do ar de secagem, da pré-secagem em terreiro e da interação entre esses fatores na qualidade do café natural, em esquema fatorial  $3 \times 2+1$ , sendo três temperaturas de secagem

(35 °C, 40 °C e 45 °C) e dois manejos da secagem (pré-secagem em terreiro até teor de água entre 30% e 35% e complementação da secagem em secadores e secagem completa em secadores), mais um fator adicional (testemunha) constituído pela secagem completa em terreiro. Foram realizadas quatro repetições por tratamento.

A temperatura de ponto de orvalho do ar durante a secagem mecânica foi mantida em 2,6 °C, por meio do sistema de condicionamento do ar descrito no capítulo II. Dessa forma, as umidades relativas do ar de secagem para as temperaturas de 35 °C, 40 °C e 45 °C foram, respectivamente, de 13,1%, 10,0% e 7,7%. Essas umidades relativas são extremamente baixas e permitem elevadas taxas de redução de água dos frutos, no início do processo de secagem, mesmo quando são utilizadas baixas temperaturas de secagem, reduzindo os riscos da ocorrência de fermentações.

Uma vez que o sistema de secagem não fornece temperaturas constantes durante todo período de secagem, apresentando variação de  $\pm 1$  °C, o fator temperatura foi considerado qualitativo.

Os dados obtidos das análises químicas, sensorial e fisiológicas do café foram submetidos à análise de variância utilizando-se o programa computacional Sisvar 4.0, segundo Ferreira (2000). Quando foram observadas diferenças significativas em função das temperaturas de secagem, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância e, quando foram observadas diferenças significativas em função da pré-secagem em terreiro, as médias foram comparadas pelo teste F, a 5% de significância.

Os cafés submetidos à secagem mecânica foram comparados com os cafés secados completamente em terreiro (fator adicional/testemunha) pelo teste de Dunnett, a 5% de significância.

#### **2.4 Determinação das taxas de secagem**

Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos frutos, o acompanhamento da secagem do produto foi realizado pelo método gravimétrico, conforme descrito no capítulo III.

#### **2.5 Caracterização da qualidade do café natural**

Com o objetivo de se avaliar os efeitos imediatos e latentes dos tratamentos de secagem na qualidade do café, foram realizadas, além da análise sensorial, as análises de açúcares totais, redutores e não redutores, acidez titulável total, sólidos solúveis totais, condutividade elétrica, lixiviação de potássio, em duas épocas distintas: dois e sete meses após a secagem. As análises foram realizadas em amostras de grãos classificados em peneira 16 acima, sem a presença de grãos mocas e defeituosos, visando à uniformização e, sobretudo, à minimização de interferências que não fossem relacionadas aos tratamentos estudados. As metodologias utilizadas estão descritas no capítulo III.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os tempos de secagem, os teores de água no início e no final da secagem mecânica e as taxas de secagem médias e máximas, em função da temperatura do ar de secagem e do período de pré-secagem em terreiro.

Tabela 1 Tempo de secagem, taxa de secagem média e máxima do café natural em função da temperatura do ar de secagem e da pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, 2011

Tbs (°C)	Manejo da secagem	Tempo de secagem (horas)	Teor de água (kg .kg <sup>-1</sup> bs)		Taxa de secagem (g água.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	
			Inicial	Final	Média	Máxima
35	CPS	56	0,502	0,142	6,42	14,59
40	CPS	38	0,471	0,147	8,52	23,14
45	CPS	26	0,488	0,146	13,27	53,12
35	SPS	104	1,882	0,143	16,72	97,31
40	SPS	78	1,890	0,145	22,37	106,08
45	SPS	52	2,021	0,132	36,33	145,36

CPS: com pré-secagem em terreiro; SPS: sem pré-secagem em terreiro

Na Figura 1 estão apresentadas as taxas de redução de água em função das temperaturas do ar de secagem para os frutos de café submetidos à secagem completa em secador (Figura 2A) e para frutos submetidos à secagem em secadores após ter atingido teor de água de 35% (bu) em terreiro (Figura 2B).

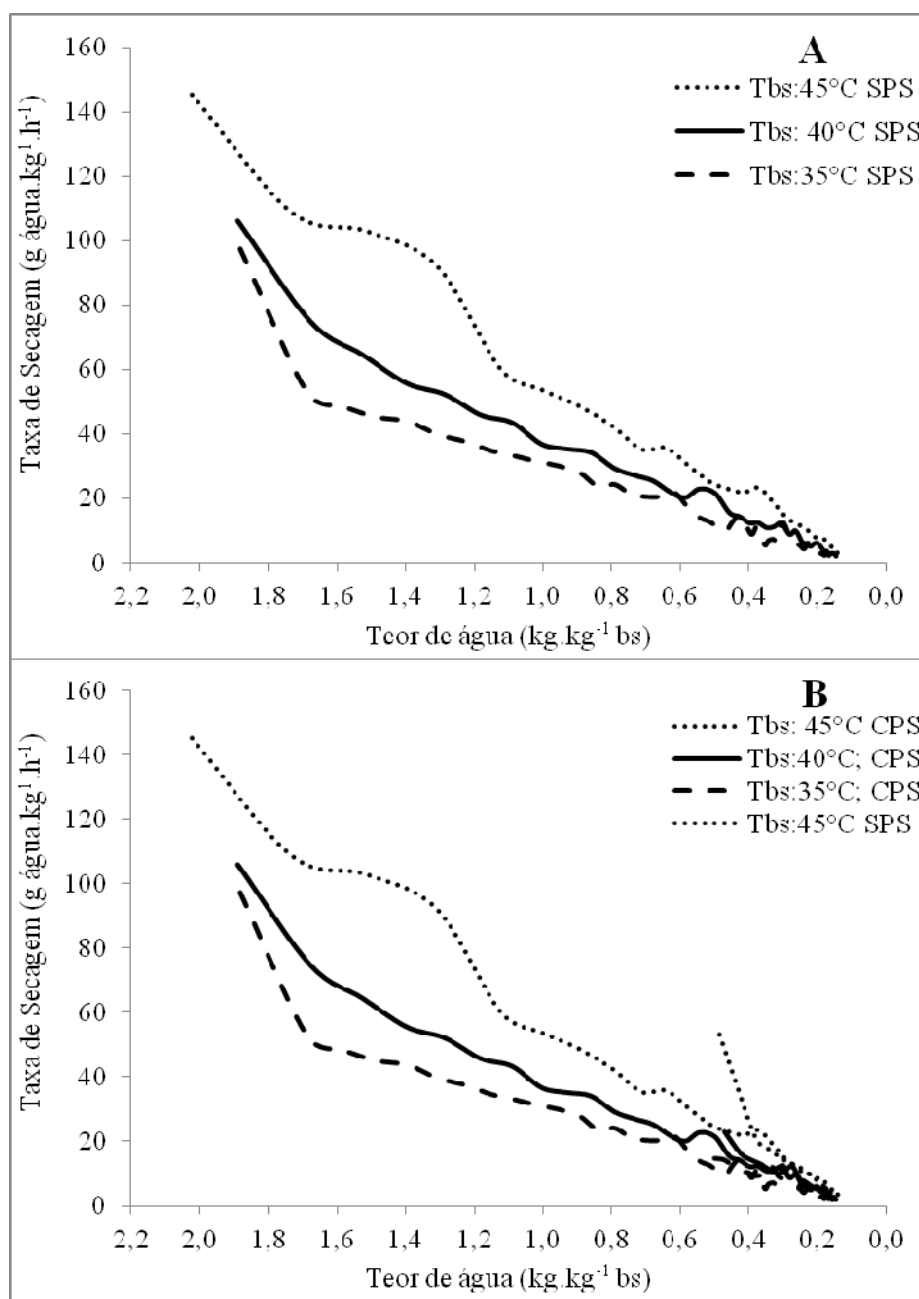


Figura 1 Taxa de redução de água de frutos de café em função da temperatura do ar de secagem. (A) sem pré-secagem em terreiro; (B) com pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011



Observa-se que o café submetido à secagem completa em secadores apresenta taxas de secagem bem maiores, quando comparado aos cafés submetidos à pré-secagem em terreiro. Essa diferença ocorre devido ao elevado teor de água do café no início da secagem mecânica, quando esse não é submetido à pré-secagem em terreiro.

Observa-se ainda, na Figura 1, que a elevação da temperatura aumenta as taxas de secagem tanto dos cafés submetidos à secagem completa em secadores quanto nos cafés submetidos à pré-secagem em terreiro com complementação da secagem em secadores. Além disso, observa-se que essas diferenças são maiores no início da secagem e, conforme os frutos ficam mais secos, as diferenças diminuem consideravelmente.

A análise de variância (Apêndice J) não indicou diferenças significativas entre os valores médios de açúcares totais e não-redutores, lixiviação de potássio e acidez titulável total entre os cafés submetidos à secagem em terreiro (testemunha) e os cafés submetidos à secagem mecânica, quando essas análises foram realizadas logo após a secagem. Para as análises de condutividade elétrica e açúcares redutores, a análise de variância indicou que pelo menos um dos tratamentos apresentou diferenças significativas, quando comparado com a secagem em terreiro.

Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios de açúcares redutores (AR) e condutividade elétrica (CE) dos cafés naturais, analisados logo após a secagem, com pré-secagem (CPS) e sem pré-secagem (SPS).

Tabela 2 Valores médios de açúcares redutores (AR) e condutividade elétrica (CE) do café natural, antes do armazenamento, para cada tratamento de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Manejo da secagem	AR (%)	CE ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )
35	CPS	0,428	61,77
40	CPS	0,657	60,62
45	CPS	0,475	76,41*
35	SPS	0,324*	57,16
40	SPS	0,370	58,64
45	SPS	0,448	79,41*
Terreiro		0,625	65,10

\*médias diferem estatisticamente ( $p>0,05$ ), pelo teste de Dunnett, em relação ao café seco completamente em terreiro. SPS – sem pré-secagem em terreiro; CPS – com pré-secagem em terreiro.

Após sete meses de armazenamento, a análise de variância indicou que, os cafés submetidos à secagem em terreiro não apresentam diferenças significativas em relação aos cafés submetidos à secagem mecânica para os teores de açúcares totais e não-redutores.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de acidez titulável total (ATT), açúcares redutores (AR), condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos cafés naturais secados completamente em terreiro e dos cafés naturais submetidos à secagem mecânica com as temperaturas de 35 °C, 40 °C e 45 °C, com ou sem pré-secagem em terreiro, após sete meses de armazenamento.

Tabela 3 Valores médios de acidez titulável total (ATT), açúcares redutores (AR), condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, após sete meses de armazenamento, para cada tratamento de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Manejo	ATT (NaOH 0,1N.100g <sup>-1</sup> )	AR (%)	CE (μS.cm <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup> )	LK (ppm)
35	CPS	158,75	0,381	77,75	24,53
40	CPS	168,75	0,359	81,36*	24,68
45	CPS	167,50	0,435	85,23*	25,74*
35	SPS	157,50	0,226*	54,17*	16,61
40	SPS	145,00*	0,204*	65,14	20,17
45	SPS	147,50*	0,329	95,23*	28,46*
Terreiro		173,33	0,376	67,06	20,88

\*médias diferem estatisticamente ( $p>0,05$ ), pelo teste de Dunnett, em relação ao café seco completamente em terreiro; SPS – sem pré-secagem em terreiro; CPS – com pré-secagem em terreiro.

Observa-se, nas Tabelas 2 e 3, que os cafés submetidos à temperatura de secagem de 45 °C, com e sem pré-secagem em terreiro, apresentam valores de condutividade elétrica maiores em relação aos cafés secados completamente em terreiro, antes e após o armazenamento. Já os valores de lixiviação de potássio não apresentam diferenças significativas logo após a secagem. Porém, após sete meses de armazenamento, os cafés secados à temperatura de 45 °C apresentam valores, significativamente maiores, quando comparados com os cafés secados em terreiro. Os cafés submetidos à secagem completa em secadores com a temperatura de 35°C apresentam teores de açúcares redutores significativamente menores aos cafés secos completamente em terreiro, antes e após o armazenamento. Após o armazenamento, observa-se, ainda, que os cafés submetidos à secagem completa em secadores com temperatura do ar de 35°C apresentam valores de condutividade elétrica significativamente inferiores aos cafés secados em terreiro e que os cafés submetidos à secagem completa em secadores, sem pré-secagem em terreiro, com temperaturas do ar de 40 °C e 45 °C apresentam menores valores de acidez titulável total, quando comparados com cafés secados completamente em terreiros.

Considerando-se apenas os cafés submetidos à secagem mecânica, a análise de variância indicou que os teores de açúcares totais e não-redutores não são influenciados pela temperatura de secagem e pelo período de pré-secagem.

Os valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, logo após a secagem, não são influenciados pela pré-secagem em terreiro (Apêndice J). Na Tabela 4 são apresentados os efeitos da temperatura de secagem nos valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, do café natural, antes do armazenamento.

Tabela 4 Valores de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Temperatura °C	CE $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$	LK ppm
35	59,46 a	18,91 a
40	59,62 a	18,40 a
45	77,91 b	23,28 b

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey.

Na Tabela 5, apresenta-se o desdobramento do efeito da interação entre a temperatura de secagem e o período de pré-secagem, nos valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio do café natural, após sete meses de armazenamento.

Tabela 5 Teores médios de condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura de secagem e do período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	CE ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )		LK (ppm)	
	CPS	SPS	CPS	SPS
35	77,75 aA	54,17 aB	24,53 aA	16,61 aB
40	81,36 aA	65,14 aB	24,68 aA	20,16 aB
45	85,23 aB	95,22 bA	25,74 aA	28,46 bA

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais, dentro da linha, não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste F.

Verifica-se que, antes do armazenamento (Tabela 4), independente do manejo da secagem, com ou sem pré-secagem em terreiro, os valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio dos cafês submetidos à temperatura de secagem de 45°C foram significativamente maiores comparativamente aos cafês secados com as temperaturas de 35 °C e 40°C.

Após sete meses de armazenamento (Tabela 5), observa-se que, para as temperaturas de secagem de 35 °C e 40 °C, os valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio dos cafês submetidos à secagem completa em secadores foram significativamente menores aos valores obtidos pelos cafês submetidos à pré-secagem em terreiro e complementação da secagem em secadores mecânicos. No entanto, esse efeito foi inverso quando se usou temperatura de secagem de 45°C. Nesse caso, a secagem completa em secadores resultou em maiores valores de condutividade elétrica.

Quando o café foi analisado logo após a secagem, a análise de variância (Apêndice J) indicou que a temperatura de secagem não teve efeito significativo no teor de açúcares redutores, observando-se efeito somente do uso ou não da pré-secagem em terreiros.

Na Tabela 6, apresenta-se o efeito da pré-secagem em terreiro no teor de açúcares redutores do café natural, logo após a secagem.

Tabela 6 Teores médios de açúcares redutores do café natural, logo após a secagem, em função da pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011

Manejo da secagem	Açúcares redutores (%)
CPS	0,520b
SPS	0,381a

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de F.

Na Tabela 7 estão apresentados os teores médios de açúcares redutores do café natural em função da temperatura de secagem e da pré-secagem em terreiro, quando as análises foram realizadas sete meses após a secagem.

Tabela 7 Teores médios açúcares redutores, após sete meses de armazenamento, em função temperatura de secagem e do período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tratamento		Açúcares redutores (%)
Temperatura (°C)	35	0,303 a
	40	0,281 a
	45	0,382 b
Manejo da secagem	CPS	0,392 b
	SPS	0,252 a

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey, para temperatura e, pelo teste F, para pré-secagem.

Observa-se que os teores médios de açúcares redutores do café natural, antes e depois do armazenamento, são maiores quando os cafés são submetidos à pré-secagem em terreiro, independente da temperatura de secagem. Esses resultados estão de acordo com Marques et al. (2008) que observaram uma elevação nos teores de açúcares redutores do café com o aumento do período de pré-secagem de um para três dias.

Antes do armazenamento não foram observados efeitos significativos da temperatura de secagem nos valores de açúcares redutores. Entretanto, após sete meses de armazenamento, observou-se que os cafés secados à temperatura de 45°C, independente do período de pré-secagem, apresentaram teores de açúcares redutores significativamente maiores em relação aos cafés secos com temperaturas do ar de 35 °C e 40 °C, que não diferiram entre si. No entanto, frequentemente, são encontrados relatos, na literatura, que associam a redução dos teores de açúcares redutores ao aumento da temperatura e/ou da taxa de secagem (BORÉM et al., 2006; BORÉM; MARQUES; ALVES, 2008; MARQUES et al., 2008).

Uma hipótese para o aumento do teor de açúcares redutores em função da elevação da temperatura é a produção desses compostos a partir da hidrólise de açúcares não-redutores. Embora neste experimento não tenham sido observadas diferenças significativa no teor de açúcares não-redutores, uma pequena redução no seu teor pode causar uma aumento significativo nos teores de açúcares redutores.

Nas Tabelas 8 e 9, apresentam-se o desdobramento do efeito da interação entre a temperatura de secagem e o período de pré-secagem, nos valores médios de acidez titulável total (ATT) do café natural, logo após a secagem e após sete meses de armazenamento, respectivamente.

Tabela 8 Teores médios de acidez titulável total (ATT) do café natural, logo após a secagem, em função temperatura de secagem e do período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	ATT (NaOH 0,1N.100g <sup>-1</sup> )	
	CPS	SPS
35	230,0 aA	210,0 aA
40	245,0 aA	215,0 aB
45	235,0 aA	228,8 aA

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si (P>0,05), pelo teste de Tukey. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais dentro da linha não diferem entre si (P>0,05), pelo teste F.

Tabela 9 Teores médios de acidez titulável total (ATT) do café natural, após sete meses de armazenamento, em função temperatura de secagem e do período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	ATT (NaOH 0,1N.100g <sup>-1</sup> )	
	CPS	SPS
35	158,7 aA	157,5 aA
40	168,7 aA	145,0 aB
45	167,5 aA	147,5 aB

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais dentro da linha não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste F.

Observa-se que tanto antes quanto após o armazenamento não foram observados efeitos significativos da temperatura de secagem nos valores médios de acidez titulável total do café natural. Em relação à pré-secagem em terreiro, observa-se que, para a temperatura de 40 °C, antes e depois do armazenamento, e para a temperatura de secagem de 45 °C, após o armazenamento, os menores valores médios de acidez titulável total são observados para os cafés submetidos à secagem completa em secador. Além disso, os cafés submetidos à secagem completa em secadores com as temperaturas de 40 °C e 45 °C apresentam valores de acidez titulável total inferiores, quando comparados com os cafés secados completamente em terreiro (Tabela 3).

As fermentações ocorrem, geralmente, logo após a colheita até cerca de dois dias após a distribuição do café no terreiro, quando esse possui elevados teor e atividade de água. Os cafés submetidos à secagem completa em secadores com temperaturas do ar de 45 °C e 40 °C apresentaram as maiores taxas de secagem (Tabela 1). Com isso, a atividade de água e, conseqüentemente, os riscos de ocorrerem fermentações, foram reduzidos rapidamente. No entanto, neste experimento, não foi possível se estabelecer uma relação entre os valores de acidez titulável total e a qualidade sensorial do café natural.



A análise de variância (Apêndices L e M) indicou que, tanto antes quanto depois do armazenamento, as notas da análise sensorial do café natural são influenciadas pela temperatura de secagem. No que se refere ao manejo da secagem, com ou sem pré-secagem em terreiro, foram observados efeitos significativos nas notas sensoriais do café, antes do armazenamento. No entanto, após o armazenamento os efeitos desse fator não foram observados.

Nas Tabelas 10 e 11 apresentam-se as notas dos atributos sensoriais dos cafés naturais secos completamente em terreiro e dos cafés naturais submetidos à secagem mecânica com as temperaturas de 35 °C, 40 °C e 45 °C, com ou sem pré-secagem em terreiro.

Tabela 10 Notas médias da análise sensorial do café natural, logo após a secagem, para cada tratamento de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Manejo da secagem	Fragrância	Acidez	Corpo	Finalização	Impressão global	Total
35	CPS	7,44	7,13	7,31	7,00	7,19	80,38
40	CPS	7,81*	7,50	7,50	7,13	7,50	82,31
45	CPS	7,19	7,00	7,19	6,81	6,94	79,06
35	SPS	7,81*	7,50	7,56*	7,44*	7,63*	83,06*
40	SPS	7,88*	7,63*	7,56*	7,50*	7,56*	83,19*
45	SPS	7,38	7,19	7,38	7,00	7,19	80,25
Terreiro		7,31	7,13	7,31	7,00	7,06	80,25

\*média diferem estatisticamente ( $p>0,05$ ), pelo teste de Dunnett, em relação ao café secado completamente em terreiro.

Tabela 11 Notas médias da análise sensorial do café natural, após sete meses de armazenamento, para cada tratamento de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tbs (°C)	Manejo da secagem	Acidez	Finalização	Equilíbrio	Total
35	CPS	7,08	6,83	6,83	78,79
40	CPS	7,17	6,71	6,83	78,83
45	CPS	6,88	6,63	6,71	77,50
35	SPS	7,00	6,83	6,92	78,96
40	SPS	7,08	6,71	6,83	78,92

45	SPS	6,42*	6,21*	6,25*	74,79*
Terreiro		7,00	6,79	6,92	78,50

\*média diferem estatisticamente ( $p>0,05$ ), pelo teste de Dunnett, em relação ao café secado completamente em terreiro.

Observa-se, nos contrastes entre as notas sensoriais obtidas pelo café seco completamente em terreiro e os demais tratamentos de secagem, que, logo após a secagem, os cafés submetidos à secagem completa em secadores mecânicos com temperaturas do ar de 35 °C e 40 °C apresentaram maiores notas em relação aos cafés secados completamente em terreiro e os demais tratamentos não se diferenciaram estatisticamente da testemunha (Tabela 10).

Após sete meses de armazenamento (Tabela 11), observou-se a redução das notas sensoriais para todos os tratamentos, tendo as notas dos cafés submetidos à secagem completa em secadores com temperaturas do ar de 35 °C e 40 °C se aproximado das notas obtidas pelos cafés secos em terreiro, não se diferenciando estatisticamente. Já o café submetido à secagem completa em secador à temperatura de 45°C sofreu maior perda da qualidade sensorial após o armazenamento e, conseqüentemente, apresentou notas sensoriais menores em relação aos cafés secos completamente em terreiro. Esses resultados indicam que, embora a qualidade sensorial do café seco a 45 °C não tenha sido diferente daquela obtida em terreiro logo após a secagem, houve uma diminuição drástica de qualidade após o período de armazenamento. Isso confirma o efeito latente, deletério, da temperatura de secagem de 45 °C sobre a qualidade sensorial do café natural.

As análises de variância (Apêndices L e M) não indicaram efeitos significativos da interação entre temperatura de secagem e manejo da secagem, com ou sem pré-secagem em terreiro, na qualidade sensorial do café natural. Foram observados apenas os efeitos isolados da temperatura e do manejo da secagem.

Nas Tabelas 12 e 13 estão apresentados os efeitos das temperaturas de secagem na qualidade sensorial do café natural, respectivamente, antes e após o armazenamento.

Tabela 12 Notas médias da análise sensorial do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Temp. °C	Fragr.	Sabor	Acidez	Corpo	Finaliz.	Equil.	Impressão global	Total
35	7,62 a	7,43 ab	7,31 ab	7,43 ab	7,21 a	7,28 a	7,40 a	81,71 a
40	7,84 a	7,59 a	7,56 a	7,53 a	7,31 a	7,37 a	7,53 a	82,70 a
45	7,28 b	7,06 b	7,09 b	7,28 b	6,90 b	6,96 b	7,06 b	79,65 b

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey.

Tabela 13 Notas médias da análise sensorial do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Temp. °C	Fragr.	Sabor	Acidez	Finaliz.	Equil.	Impressão global	Total
35	7,14 a	6,90 a	7,04 a	6,83 a	6,87 a	6,85 a	78,87 a
40	7,29 a	6,91 a	7,13 a	6,70 ab	6,83 a	6,83 a	78,41 a
45	6,75 b	6,41 b	6,64 b	6,41 b	6,48 b	6,42 b	76,14 b

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P>0,05$ ), pelo teste de Tukey.

Observa-se, nas Tabelas 12 e 13, que, antes e após o armazenamento, os cafés submetidos à secagem mecânica à temperatura de 45°C apresentam notas dos atributos e notas totais da análise sensorial significativamente inferiores, quando comparados aos cafés secos com as temperaturas de 35 °C e 40°C, que não diferenciam entre si.

Os resultados observados nesse experimento estão de acordo com os relatados por Oliveira (2010) e Taveira (2009), que observaram prejuízos significativos na qualidade sensorial e fisiológica do café natural quando se

utilizaram temperaturas de secagem superiores a 40 °C, contrariando as recomendações tradicionais que sugerem o uso da temperatura de 45 °C para a secagem desse tipo de café. Embora essas recomendações possam ser aplicadas para a produção de café *commodity*, quando o objetivo é a produção de cafés naturais especiais, o uso de temperaturas de secagem acima de 40°C não é recomendado.

Verifica-se que, logo após a secagem, os cafés secos com as temperaturas de 35 °C e 40 °C apresentaram notas globais entre 80 e 84 pontos conforme a escala de classificação da SCAA, sendo classificados como cafés especiais. Por outro lado, os cafés submetidos à temperatura de secagem de 45°C, mesmo antes do armazenamento, apresentaram notas sensoriais inferiores a 80 pontos, sendo classificados como cafés de qualidade boa normal, porém, não são classificados como cafés especiais. Esses resultados confirmam que a temperatura de 45 °C não é recomendada para a secagem de cafés especiais.

A perda na qualidade sensorial do café submetido à temperatura de secagem de 45 °C está associada aos danos fisiológicos sofridos pelos grãos quando expostos a essa temperatura, indicada pelo aumento dos valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio.

Elevadas temperaturas e taxas de secagem causam redução da qualidade fisiológica de sementes, devido à desestruturação e, conseqüentemente, à perda da permeabilidade seletiva do sistema de membranas celulares do endosperma do café, provocando uma rápida deterioração dos grãos. Isso porque, uma vez rompida a membrana celular, ocorre maior contato entre as enzimas e os compostos químicos presentes intra e extracelularmente no grão, provocando, dessa forma, reações químicas e bioquímicas que modificam a composição original do café e, em conseqüência, as características sensoriais da bebida (BORÉM; MARQUES; ALVES, 2008).

Na Tabela 14 estão apresentadas os efeitos do manejo da secagem, com ou sem pré-secagem em terreiro, nas características sensoriais do café natural, antes do armazenamento.

Tabela 14 Notas médias da análise sensorial do café natural, logo após a secagem, em função do período de pré-secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

Manejo da Secagem	Fragrância	Acidez	Corpo	Finalização	Equilíbrio	Impressão global	Total
CPS	7,48 a	7,21 a	7,33 a	6,98 a	7,10 a	7,20 a	80,58a
SPS	7,69 b	7,44 b	7,50 b	7,31 b	7,31 b	7,46 b	82,17b

Médias seguidas por letras minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ( $P > 0,05$ ), pelo teste de F.

Após sete meses de armazenamento, não foram observados efeitos significativos do manejo da secagem, com ou sem pré-secagem em terreiro, na qualidade sensorial do café natural (Apêndice M). Por outro lado, logo após a secagem (Tabela 14), os cafés naturais submetidos à secagem completa em secadores mecânicos, independente da temperatura, apresentaram nota total e notas dos atributos maiores em comparação com os cafés submetidos à pré-secagem em terreiro. No entanto, quando os tratamentos são comparados individualmente com o café seco completamente em terreiro, verifica-se que cafés submetidos à temperatura de 45 °C, sem pré-secagem em terreiro, apresentam notas significativamente inferiores, em comparação ao café seco em terreiro.

Esses resultados são confirmados pelos valores de condutividade elétrica, que indicam melhor qualidade do café seco completamente em secadores mecânicos, quando se utilizam as temperaturas de 35 °C e 40°C. No entanto, quando se utiliza a temperatura de 45°C, os cafés submetidos à secagem completa em secadores apresentam maiores valores de condutividade elétrica,

em comparação aos cafés submetidos à pré-secagem em terreiro, indicando a ocorrência de danos no sistema de membranas celulares.

Guimarães et al. (2002) afirmam que baixas taxas de secagem, sobretudo no início do processo, favorecem os mecanismos de defesa da semente contra os danos provocados pela dessecação. Por outro lado, na secagem de café natural, a presença do exocarpo e do mesocarpo rico em açúcares e com elevado teor de água funcionam como uma barreira à remoção de água da semente, tornando a secagem demasiadamente lenta, aumentando os riscos do desenvolvimento de microrganismo e da ocorrência de fermentações e reações químicas e bioquímicas deletérias à qualidade de bebida. Dessa forma, as maiores taxas de secagem no início do processo, proporcionadas pela secagem completa em secadores mecânicos, reduz rapidamente a atividade de água e, conseqüentemente, os riscos da ocorrência dessas reações indesejáveis. Entretanto, nesta fase, devem ser evitadas temperaturas superiores a 40°C, devido à ocorrência de danos térmicos.

#### **4 CONCLUSÕES**

A temperatura de 45°C não é recomendada para a produção de cafés naturais especiais.

A secagem completa em secadores mecânicos com temperaturas do ar máximas de 40°C não prejudica a qualidade do café natural.

## REFERÊNCIAS

- BORÉM, F. M. Processamento do café. In: \_\_\_\_\_. **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 127-158.
- 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, abr./jun. 2006.
- BORÉM, F. M.; MARQUES, E. R.; ALVES, E. Ultrastructural analysis damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. **Biosystems Engineering**, London, v. 99, n. 1, p. 62-66, Mar. 2008.
- FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA UFSCAR, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.
- GUIMARÃES, R. M. et al. Tolerância à dessecação em sementes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 1, p. 128-139, jan./fev. 2002.
- MARQUES, E. R. et al. Eficácia do teste de acidez graxa na avaliação da qualidade do café arábica (*Coffea arabica* L.) submetidos a diferentes períodos de temperatura e pré-secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1557-1562, set./out. 2008.
- OLIVEIRA, P. D. **Microscopia eletrônica de varredura e aspectos fisiológicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.



**TAVEIRA, J. H. S. Aspectos fisiológicos e bioquímicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem.** 2009. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Cálculos da aproximação da camada de frutos de 10 cm para camada fina.

Para a aplicação dos modelos matemáticos (capítulo 2), foi feita uma aproximação da camada de frutos utilizada no experimento (10 cm) para camada fina e os resultados foram satisfatórios.

Foram calculadas as temperaturas finais do ar e do produto, pelo modelo proposto por Thompson et al. (1968 citados por ANDRADE; BORÉM, 2008).

As temperaturas finais do ar ( $T_f$ ) e do produto ( $T_{ge}$ ) foram determinadas por meio de um balanço de energia que leva em conta a redução do teor de água dos grãos. Considerou-se que a temperatura do grão é igual à do ar que o envolve.

Quando a diferença entre  $T_f$  calculada para a espessura de frutos utilizada no experimento (10 cm) e  $T_f$  calculada para a espessura de 2 cm foi menor que 5%, considerou-se a aproximação satisfatória.

$T_f$  foi calculada pela equação 1. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

$$T_f = \frac{(0,24 + 0,45W_0)T_e - (W_f - W_0)(588 + h_{lv} - T_e) + cp.R(1 + U)T_e}{0,24 + 0,45W_f + cp.R(1 + U)}$$

em que:  $W_0$  é a razão de mistura do ar na entrada da camada ( $\text{kg.kg}^{-1}$ );  $W_f$  é a razão de mistura do ar na saída da camada de grãos ( $\text{kg.kg}^{-1}$ );  $T_e$  é a temperatura do ar em equilíbrio com o grão;  $h_{lv}$  é o calor latente de vaporização da água no grão ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ );  $cp$  é o calor específico ( $\text{kcal kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R$  é a razão entre a

massa de matéria seca da camada e massa de ar seco que passa no intervalo  $dt$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e  $U$  é o teor de água do produto no tempo  $t$  (decimal bs)

Tabela 1A Temperatura final para secagem de frutos de café com espessuras de 10 e 2 cm. UFLA, Lavras, MG, 2011

Tratamento		$T_f$		Diferença
Tbs ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tpo ( $^{\circ}\text{C}$ )	2 cm	10 cm	(%)
35	16,2	34,9817	34,9120	0,199
35	10,8	34,9812	34,9095	0,205
35	2,6	34,9803	34,9054	0,214
40	16,2	39,9730	39,8698	0,258
40	10,8	39,9723	39,8713	0,253
40	2,6	39,9712	39,8614	0,275
45	16,2	44,9633	44,8230	0,312
45	10,8	44,9629	44,8213	0,315
45	2,6	44,9620	44,8167	0,323

Tpo: temperatura de ponto de orvalho; Tbs: temperatura de bulbo seco;  $T_f$ : temperatura final.

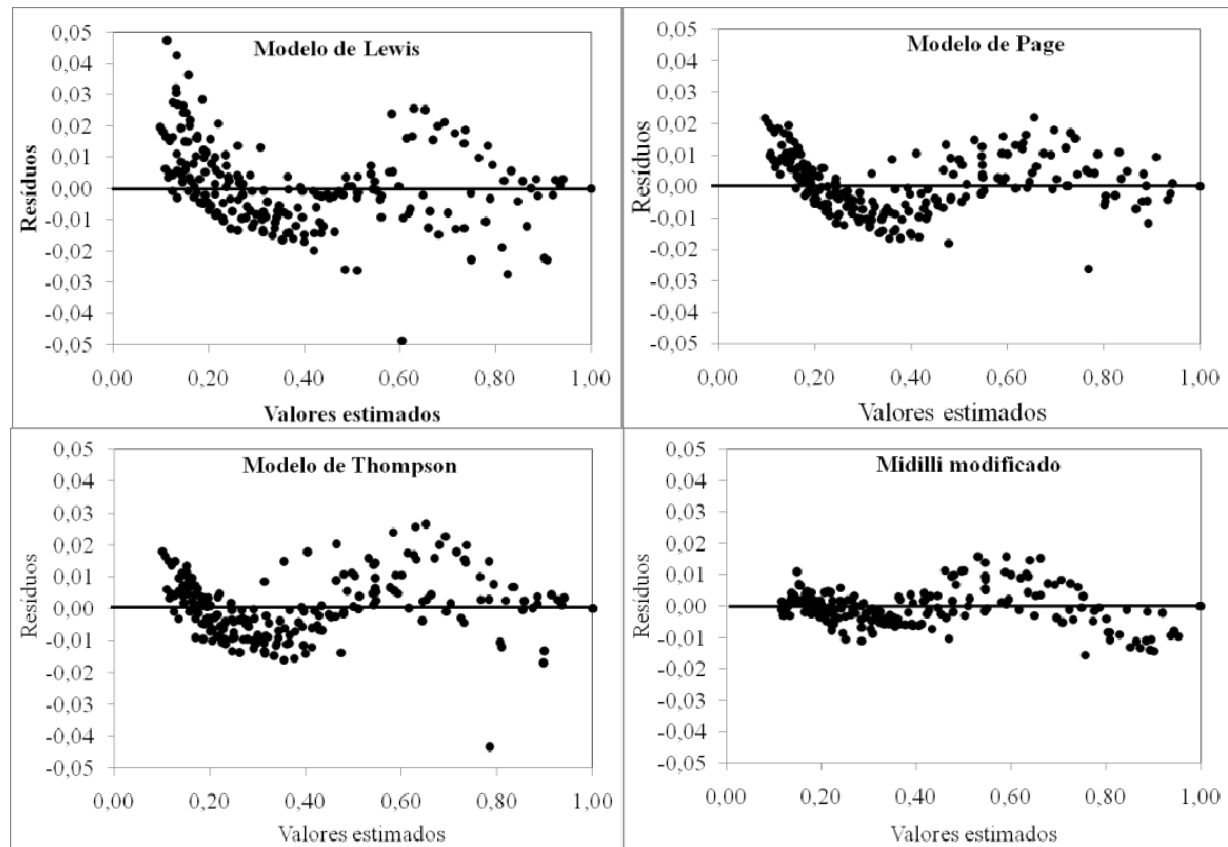
## APÊNDICE B – Tabela 2 A

Tabela 2A Análise de variância do coeficiente de difusividade efetivo ( $Deff$ ) e do tempo de meia resposta em função de diferentes combinações de temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	FC	
		$Deff \times 10^{-11} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	Tempo de meia resposta (horas)
Tbs	2	2727,39*	7561,37*
Tpo	2	539,70*	971,16*
Tbs x Tpo	4	129,88*	24,28*
CV (%)		2,39	1,41

\*significativo pelo teste F, a 5% de probabilidade.

APÊNDICE C – Figura 1 A



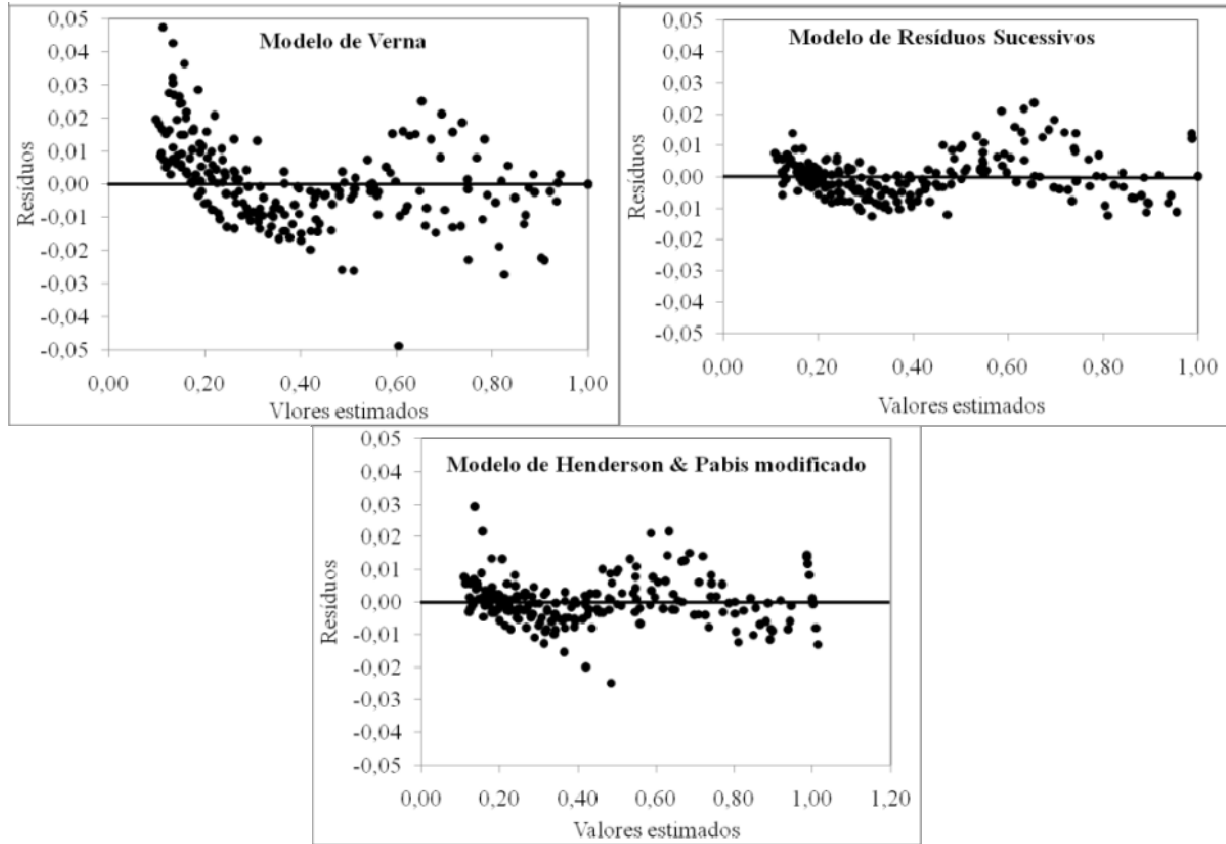


Figura 1A Distribuição dos resíduos para cada modelo matemático ajustado em função dos valores estimados de razão de umidade. UFLA, Lavras, MG, 2011

147

**APÊNDICE D – Tabela 3 A**

Tabela 3A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) do perfil de ácidos graxos do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura e da taxa de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc				
		C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	Total
Tbs	2	0,063	0,820	3,059	1,902	0,145
TS. Max. (Tbs)	6	1,232	0,986	1,854	0,563	1,192
Fat. Vs. Test	1	0,049	0,343	0,0708	1,277	0,048
CV (%)		37,30	19,58	40,86	54,77	28,84
Média		0,789	0,621	0,102	0,116	1,630

\*significativo pelo teste F, a 5% de probabilidade.

148

## APÊNDICE E – Tabela 4 A

Tabela 4A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) do perfil de ácidos graxos do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura e da taxa de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc				
		C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	Total
Tbs	2	0,535	0,006	0,407	0,248	0,293
TS. Max (Tbs)	6	1,750	1,281	1,740	0,679	1,624
Fat. Vs. Test.	1	0,035	0,244	0,005	1,847	0,185
CV (%)		35,18	22,64	43,95	53,66	29,63
Média		0,869	0,653	0,102	0,114	1,738

\*significativo pelo teste F, a 5% de probabilidade.

**APÊNDICE F – Tabela 5 A**

Tabela 5A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) dos níveis de acidez titulável total (ATT), açúcares totais (AT), açúcares não-redutores (ANR), açúcares redutores (AR), condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura e da taxa de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc					
		ATT (NaOH 0,1N.100g <sup>-1</sup> )	AT (%)	ANR (%)	AR (%)	CE (μS.cm <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup> )	LK (ppm)
Tbs	2	2,599	0,137	0,122	4,965*	46,624*	9,802*
TS. Max (Tbs)	6	0,545	0,149	0,226	2,757*	7,714*	1,474
Trat. x Terreiro	1	0,75	0,926	1,154	3,157	0,540	1,994
CV (%)		7,95	16,69	17,10	20,79	6,68	11,21
Média		233,25	7,581	6,868	0,531	63,61	19,46

\*diferença significativa (p>0,05), pelo teste F.



**APÊNDICE G – Tabela 6 A**

Tabela 6A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) dos níveis de acidez titulável total (ATT), açúcares totais (AT), açúcares não-redutores (ANR), açúcares redutores (AR), condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura e da taxa de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc					
		ATT (NaOH 0,1N.100g <sup>-1</sup> )	AT (%)	ANR (%)	AR (%)	CE (μS.cm <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup> )	LK (ppm)
Tbs	2	1,832	0,549	0,684	4,083*	15,262*	15,515*
TS. Max (Tbs)	6	0,685	0,534	0,383	3,335*	8,630*	9,264*
Fat. Vs. Test.	1	1,212	0,165	0,198	0,162	5,990*	3,532
CV (%)		8,36	8,61	9,19	13,71	8,34	9,36
Média		166,08	6,34	5,65	0,386	74,73	22,79

\*diferença significativa (p>0,05), pelo teste F.

**APÊNDICE H** – Tabela 7 A

Tabela 7A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) das notas de cada atributo e nota total da análise sensorial do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura e da taxa de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc							
		Fragrância	Sabor	Acidez	Corpo	Finalização	Equilíbrio	Impressão global	Total
Tbs	2	8,244*	3,368*	5,541*	4,750*	2,535	3,118	2,855	5,542*
TS. Max (Tbs)	6	4,059*	2,741*	4,306*	6,750*	3,814*	4,855*	3,091*	5,205*
Fat. Vs. Terreiro	1	4,535*	0,482	3,107*	2,333	1,527	1,515	3,031	2,891
CV (%)		3,44	4,83	3,07	2,19	3,73	2,95	4,14	1,86
Média		7,57	7,43	7,32	7,43	7,15	7,25	7,31	81,47

\*diferença significativa ( $p > 0,05$ ), pelo teste F.



**APÊNDICE I – Tabela 8 A**

Tabela 8A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) das notas de cada atributo e nota total da análise sensorial do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura e da taxa de secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc							
		Frag.	Sabor	Acidez	Corpo	Finalização	Equilíbrio	Impressão global	Total
Tbs	2	2,954	1,321	2,413	0,868	1,961	1,302	0,703	1,615
TS. Max (Tbs)	6	3,704*	3,763*	4,968*	1,597	6,528*	3,608*	4,863*	4,299*
Fat. Vs. Test.	1	5,425*	2,765	5,057*	0,010	1,239	0,175	2,344	2,394
CV (%)		3,72	5,30	2,59	2,17	3,97	3,56	4,32	2,04
Média		7,30	7,04	7,20	7,24	6,94	6,97	7,01	79,69

\*diferença significativa ( $p > 0,05$ ), pelo teste F.

**APÊNDICE J – Tabela 9 A**

Tabela 9A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) para os valores médios de acidez titulável total (ATT), açúcares totais (AT), açúcares não-redutores (ANR), açúcares redutores (AR), condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura e período de pré-secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc					
		ATT	AT	ANR	AR	CE	LK
Tbs	2	1,606	0,089	0,085	1,880	29,160*	16,747*
Pré-secagem	1	1,113	2,447	2,060	5,692*	0,279	0,036
Tbs vs. PS	2	7,306*	0,231	0,346	1,733	0,970	0,140
Trat. x Terreiro	1	0,087	0,262	0,536	5,619*	0,040	0,509
CV (%)		6,89	14,66	14,71	18,63	8,05	9,22
Média		227,77	7,25	6,595	0,475	65,58	20,30

\*diferença significativa ( $p > 0,05$ ), pelo teste F.

**APÊNDICE K** – Tabela 10 A

Tabela 10 A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) para os valores médios de acidez titulável total (ATT), açúcares totais (AT), açúcares não-redutores (ANR), açúcares redutores (AR), condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura e período de pré-secagem. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc					
		ATT	AT	ANR	AR	CE	LK
Tbs	2	0,041	0,035	0,178	16,601*	28,628*	17,113*
Pré-secagem	1	17,835*	2,549	1,120	85,597*	13,660*	11,888*
Tbs vs. PS	2	3,839*	0,099	0,099	1,216	14,376*	11,145*
Trat. x Terreiro	1	5,982*	1,288	0,937	3,682	1,553	1,177
CV (%)		7,07	9,62	10,07	11,13	8,58	9,94
Média		159,76	6,14	5,522	0,330	75,13	23,01

\*diferença significativa ( $p > 0,05$ ), pelo teste F.

**APÊNDICE L – Tabela 11 A**

Tabela 11A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) para as notas médias dos atributos sensoriais e nota total do café natural, logo após a secagem, em função da temperatura de secagem e período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc							
		Fragrância	Sabor	Acidez	Corpo	Finalização	Equilíbrio	Impressão global	Total
Tbs	2	20,583*	6,543*	9,941*	3,675*	7,190*	9,929*	9,696*	12,429*
Pré-Secagem	1	8,333*	2,314	7,118*	4,800*	13,241*	7,143*	7,714*	9,417*
Tbs vs. PS	2	1,583	1,800	0,765	0,525	0,672	0,929	1,446	1,176
Trat. x Terreiro	1	7,191*	0,094	2,865	1,162	1,484	0,592	5,045*	2,585
CV (%)		2,48	4,26	2,97	2,42	3,11	2,79	3,06	1,60
Média		7,54	7,35	7,29	7,40	7,12	7,20	77,29	81,21

\*diferença significativa ( $p > 0,05$ ), pelo teste F.

**APÊNDICE M – Tabela 12 A**

Tabela 12 A Resumo da análise de variância e resultado do teste F (5%) para as notas médias dos atributos sensoriais e nota total do café natural, após sete meses de armazenamento, em função da temperatura de secagem e período de pré-secagem em terreiro. UFLA, Lavras, MG, 2011

FV	GL	Fc							
		Fragrância	Sabor	Acidez	Corpo	Finalização	Equilíbrio	Impressão global	Total
Tbs	2	6,590*	6,247*	9,118*	2,866	5,043*	7,505*	5,195*	4,360*
Pré-Secagem	1	0,950	0,556	4,115	0,600	1,623	1,865	0,311	1,941
Tbs vs. PS	2	0,690	2,349	1,615	1,367	1,594	3,368	1,211	1,085
Trat. x Terreiro	1	0,099	0,000	0,111	1,296	0,711	1,334	0,223	0,219
CV (%)		4,38	4,69	3,45	2,37	3,84	3,30	4,28	2,04
Média		7,05	6,74	6,95	7,15	6,67	6,75	6,71	78,04

\*diferença significativa ( $p > 0,05$ ), pelo teste F.