

Modelagem matemática da cinética de secagem do café (*Coffea arabica* L.) processado de diferentes formas com uso de enzimas e levedura.

Drying kinetics mathematical modeling of coffee (*Coffea arabica* L.) processed in different ways and with the use of enzymes and yeast.

Modelado matemático de la cinética de secado del café (*Coffea arabica* L.) procesado en diferentes formas y con el uso de enzimas y levaduras.

Recebido: 08/05/2020 | Revisado: 30/05/2020 | Aceito: 03/06/2020 | Publicado: 16/06/2020

Murilo Ferraz Tosta

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2897-7978>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail mutosta@hotmail.com

Luis Gustavo Amaral Salvio

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9259-9780>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: luis.gustavo.salvio@gmail.com

Jefferson Luiz Gomes Corrêa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-6927>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: jefferson@ufla.br

Ednilton Tavares de Andrade

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8448-8781>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: ednilton@ufla.br

Resumo

Dentre todas as etapas na produção do café (*Coffea arabica* L.), a pós-colheita é que pode impactar significativamente o custo final e a qualidade do produto. Dentre as etapas dessa fase, a secagem é uma das que exigem maior cuidado. A busca por novas tecnologias para otimizar este processo vem crescendo de forma exponencial, dentre elas, destaca-se o uso de enzimas e leveduras, podendo garantir uma secagem mais segura e ainda melhorar a qualidade da bebida. O objetivo do estudo foi avaliar o comportamento da secagem de cafés sem alterar a temperatura, fluxo de ar e apenas alterando o processamento (natural e

descascado) dos grãos com a utilização da enzima Pectinex® Ultra SPL e a levedura CA11 para observar a ocorrência de alguma mudança na cinética de secagem após o processamento e realizando a modelagem da cinética de secagem e analisando qual modelo consegue prever com maior fidelidade a secagem dos cafés. O modelo de VALCAM foi o melhor modelo para descrever a cinética de secagem, com o maior valor de coeficiente de determinação ($R^2 > 99,73\%$), menor valor de desvio relativo médio ($P < 4.43$) e desvio padrão da estimativa ($SE < 0.055$). Para os cafés processados via úmida os coeficientes de determinação (R^2) foram variados entre os modelos estudados. O modelo de VALCAM foi o único que apresentou os valores ideais para descrever o fenômeno de secagem com coeficientes de determinação (R^2) de 99.63%, erro médio relativo (P) de 3.37 e desvio padrão da estimativa (SE) de 0.0542.

Palavras-chave: Secagem do café; Processamento; Microrganismos.

Abstract

Among all stages in the coffee production (*Coffea arabica* L.), post-harvest can significantly impact the final cost and product quality. Among the stages of this phase, drying is one's that requires most care. The search for new technologies to optimize this process has been growing exponentially, a example is the use of enzymes and yeasts, which can guarantee a safer drying and even improve the quality of the beverage. The objective of the study was to evaluate the drying behavior of coffee without changing the temperature, air flow, only changing the processing (natural and pulped natural) of the beans using the enzyme Pectinex® Ultra SPL and the yeast CA11 to observe the occurrence of some change in the drying kinetics after processing and modeling the drying kinetics, analyzing which model can more accurately predict the coffee drying. The VALCAM model was the best model to describe drying kinetics, with the highest value of determination coefficient ($R^2 > 99.73\%$), lowest mean relative deviation value ($P < 4.43$) and standard deviation of the estimate ($SE < 0.055$). For wet processed coffees, the determination coefficients (R^2) were varied between the models studied. The VALCAM model was the only one that presented the ideal values to describe the drying phenomenon with determination coefficients (R^2) of 99.63%, relative average error (P) of 3.37 and standard deviation of the estimate (SE) of 0.0542.

Keywords: Coffee drying; Processing; Microorganisms.

Resumen

Entre todas las etapas de la producción de café (*Coffea arabica* L.), la poscosecha puede afectar significativamente el costo final y la calidad del producto. Entre las etapas de esta fase, el secado es uno que requiere mayor cuidado. La búsqueda de nuevas tecnologías para optimizar este proceso ha crecido exponencialmente, entre ellas destaca el uso de enzimas y levaduras, que pueden garantizar un secado más seguro e incluso mejorar la calidad de la bebida. El objetivo del estudio fue evaluar el comportamiento de secado del café sin cambiar la temperatura, el flujo de aire y simplemente cambiando el procesamiento (natural y pelado) de los granos con el uso de la enzima Pectinex® Ultra SPL y la levadura CA11 para observar la aparición de algún cambio en la cinética de secado después de procesar y modelar la cinética de secado y analizar qué modelo puede predecir con mayor precisión el secado del café. El modelo VALCAM fue el mejor modelo para describir la cinética de secado, con el valor más alto del coeficiente de determinación ($R^2 > 99.73\%$), el valor de desviación relativa media más bajo ($P < 4.43$) y la desviación estándar de la estimación ($SE < 0,055$). Para los cafés procesados en húmedo, los coeficientes de determinación (R^2) variaron entre los modelos estudiados. El modelo VALCAM fue el único que presentó los valores ideales para describir el fenómeno de secado con coeficientes de determinación (R^2) de 99.63%, error promedio relativo (P) de 3.37 y desviación estándar de la estimación (SE) de 0.0542.

Palabras clave: Secado de café; Procesamiento; Microorganismos.

1. Introdução

A crescente exigência por qualidade e a redução de custos de produção estão levando produtores e pesquisadores a buscarem novas tecnologias para a cafeicultura. No entanto, as inovações tecnológicas na pós-colheita não tiveram o mesmo avanço que no campo, sendo a secagem um dos principais gargalos da cadeia de produção de café (Borém, 2014).

Dentre as etapas da pós-colheita, a secagem é a de maior relevância. Pode afetar a qualidade sensorial do café, sendo necessário o manejo correto, para evitar ou reduzir danos aos grãos que são essenciais para a preservação do sabor e aroma (Alves *et al.*, 2017; Borém, 2014; Isquierdo *et al.*, 2013; Livramento *et al.*, 2017; Saath, 2014)

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 seguro dos grãos.

Os grãos de café são colhidos com alto teor de água, variando de 50% a 65% em base umida (bu.), e por isso devem ser imediatamente processados e secos após a colheita (Alves *et al.*, 2017; Borém, 2014; Isquierdo *et al.*, 2013; Siqueira *et al.*, 2016). Baixas temperaturas e alta umidade relativa do ar resultam em taxas de secagem reduzidas e tempos de secagem prolongados. As temperaturas e as taxas de secagem altas reduzem a qualidade do produto (Kleinwächter & Selmar, 2010; Livramento *et al.*, 2017; Ondier; Siebenmorgen; Mauromoustakos, 2010; Saath *et al.*, 2010)

Altas temperaturas do ar de secagem estão associadas a danos do conteúdo celular (enzimas, proteínas, aminoácidos, carboidratos, lipídios etc.) que são os principais compostos para a formação de sabor a aroma da bebida, que também resultam em perda de qualidade fisiológicas, físico-químicas e conseqüentemente sensorial. (Borém, 2014; Isquierdo *et al.*, 2013; Taveira *et al.*, 2015). Ocorrendo a perturbação celular, essas reações tornam-se irreversíveis, resultando em um produto de menor qualidade ao término do processo (Coradi & Borém, 2009; Coradi *et al.*, 2016).

A utilização de enzimas e leveduras em plantas e frutos, que contêm quantidades elevadas de celulose, hemicelulose e pectina tem melhorado o processo de produção e conservação (Gouvêa *et al.*, 2017).

A fermentação permite o desenvolvimento de microrganismos que produzem enzimas como poligalacturonases e pectina-liases que são necessárias para despolimerizar e hidrolisar a pectina existente na mucilagem (Agate & Bhat, 1966). Tais enzimas podem ser adicionadas durante ou podem ser liberadas por microrganismos durante o processo fermentativo.

Além da utilização de enzimas, as leveduras têm seu destaque por auxiliar na produção e manutenção de vários produtos. As leveduras são utilizadas para otimizar o processo de fermentação, que irá degradar vários compostos devido a produção de enzimas. A seleção de microrganismo é uma boa ferramenta, podendo melhorar a qualidade organoléptica, reduzir o tempo de processamento e padronizar a qualidade do café (Evangelista *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2017)

Diversos estudos indicam a importância da modelagem matemática de sistemas e processos físicos no café, permitindo assim que variações em parâmetros possam ser avaliadas de forma eficaz e reduzindo os custos de projetos (Andrade *et al.*, 2013.; Pereira *et al.*, 1993). Além de exigir menos recurso e tempo do que se necessitaria em investigações experimentais, permitir analisar sistemas com os quais experimentalmente seriam impossibilitados e uma excelente ferramenta para complementar estudos experimentais com informações mais detalhadas (Borém, 2014).

Contudo, sabendo-se que a secagem é caracterizada por um processo lento e em muitos casos oneroso, pesquisas focadas na diminuição do tempo gasto com a secagem são importantes. O objetivo principal deste presente estudo foi avaliar qual o melhor modelo matemático de cinética de secagem que consiga prever com maior fidelidade a secagem dos cafés processados de diferentes formas (natural e descascado) e com a utilização da enzima Pectinex® Ultra SPL e a levedura CA11 (*Saccharomyces cerevisiae*), devido à escassez de estudos sobre a temática.

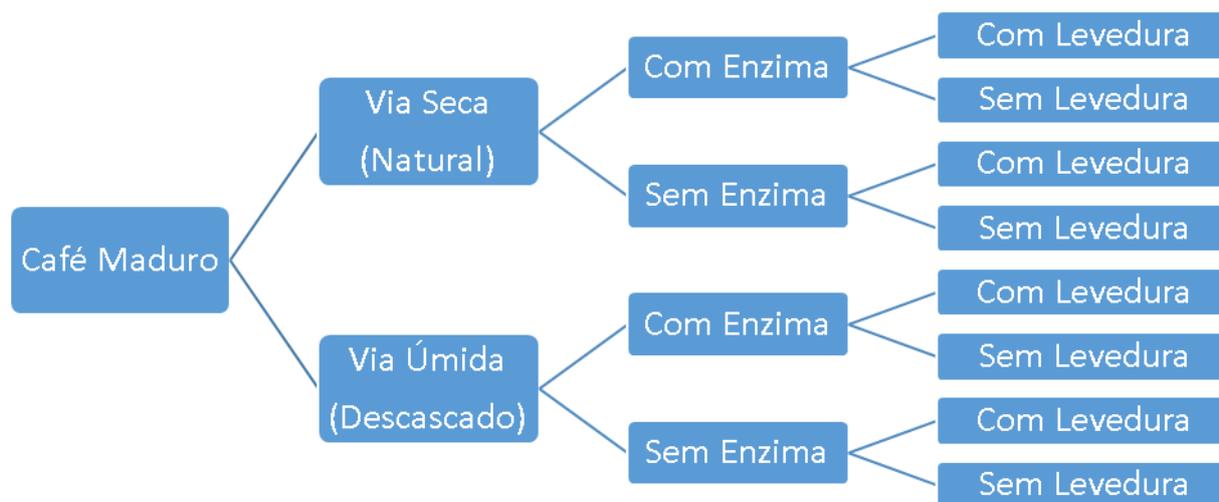
2. Metodologia

O experimento foi conduzido no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas (LPPA) no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras (UFLA). O material utilizado para a realização do estudo foram frutos maduros de café (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí vermelho). Após a colheita, realizou-se a separação hidráulica para a remoção de frutos de menor massa específica, seguido de seleção manual para retirada de frutos imaturos e sobremaduros.

Parte do café foi processado pela via úmida (cereja descascado), tendo o exocarpo (casca) removido mecanicamente, por meio de descascador e apresentando o teor de água de 1.08 bs. O segundo lote foi processado pela via seca (natural), mantendo todas as estruturas do fruto, com teor de água de 2.67 bs.

Os cafés foram dispostos em recipientes plásticos de 15 litros, divididos em cafés naturais (via seca) e cafés descascados (via úmida). Cada tipo de processamento foi dividido em dois lotes, um com enzima e outro sem enzima. Em seguida, as soluções foram retiradas dos baldes e adicionado uma nova solução contendo água mais levedura, contendo tratamentos com levedura e sem levedura (Figura 1).

Figura 1 - Delineamento experimental dos pré-tratamentos de secagem.



Fonte: Autores

A enzima utilizada foi a Pectinex® Ultra SP-L (Novozymes, NLA) seguindo as recomendações do fabricante na dosagem de 3 mL da enzima para cada 10 litros de água para o processamento via seca, deixando-se o café nesta solução por 4 (quatro) horas. Para o processamento via úmida, foi utilizado 1 mL da enzima para cada 10 litros de água, deixando o café na solução por 12 (doze) horas.

Foi utilizado uma relação de 1:1, ou seja, para cada 1 (um) litro de frutos de café colocado no recipiente plástico foi adicionado 1 (um) litro de solução (água mais enzima).

A levedura utilizada foi a CA 11 liofilizada, diluída na proporção de 0,001 kg de levedura para cada litro de água. Foi utilizado a relação 1:1, ou seja, para cada 1 (um) litro de café, utilizou-se 1 (um) litro de solução (água mais levedura). O café permaneceu nesta solução por 12 (doze) horas, posteriormente foi retirado da solução, lavado e colocado para secagem.

A secagem foi realizada por convecção forçada em um secador convectivo de camada fixa, compostos por seis bandejas perfuradas quadradas, cada uma com 0,35 m de largura e uma profundidade de 0,4 m. As bandejas eram acondicionadas sobre um plenum para garantir a uniformidade do fluxo de ar.

O fluxo de ar no secador foi monitorado ao longo do processo de secagem usando um anemômetro e para todos os tratamentos a velocidade do ar de secagem foi mantida constante em $0,33 \text{ m.s}^{-1}$, correspondendo ao fluxo de $20 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$. A temperatura do ar de secagem

utilizada foi $38\pm 2^{\circ}\text{C}$, até que os grãos atingissem o teor de $0,14 \text{ kg.kg}^{-1}$ (bs), o que corresponde ao teor de água do café beneficiado de $11\pm 0,5\%$ (bu).

O ajuste da temperatura foi realizado por meio de um controlador eletrônico e, o monitoramento, realizado com o auxílio de termômetros de mercúrio colocados no interior da massa de café. Para minimizar possíveis diferenças de temperatura e fluxo de ar fez-se um rodízio na posição das bandejas a cada hora.

O teor de água inicial do café foi determinado em estufa à $105\pm 3^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas, em três repetições (Brasil, 2009). Já o teor de água final foi determinado pelo método de estufa, a $105\pm 1^{\circ}\text{C}$, por 16 horas, conforme o padrão internacional da ISO 6673 (ISO, 2003). Os resultados foram expressos em base seca (bs). Durante toda a secagem, o café foi pesado para posterior confecção das curvas, tempos e taxas de secagem.

Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial, o acompanhamento da secagem foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa) até atingir o teor de água desejado, utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,01 g, de acordo com a equação 1.

$$Ut = \frac{Mai - (Mti - Mtt)}{mms} \quad (1)$$

onde:

Ut = teor de água no tempo t (kg.kg^{-1} (bs));

Mai = massa de água inicial (kg);

Mti = massa total inicial (kg);

Mtt = massa total no tempo t (kg);

mms = massa de matéria seca (kg).

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

$$RU = \frac{U - Ue}{Ui - Ue} \quad (2)$$

onde:

RU: razão de umidade (adimensional);

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

Ue: teor de água de equilíbrio do produto (decimal, base seca);

Ui: teor de água inicial do produto (decimal, base seca).

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* Statistica V 5.0 (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA). A escolha do melhor modelo baseou-se nos 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 3 e 4.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (3)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{n=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (4)$$

onde:

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

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

Designação do modelo	Modelo	Equação
Dois termos	$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(5)
Henderson e Pabis modificado	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(6)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k t)$	(7)
Midilli	$RU = a \exp(-k t^n) + b t$	(8)
Newton	$RU = \exp(-k t)$	(9)
Page	$RU = \exp(-k t^n)$	(10)
Thompson	$RU = \exp\{-[a - (a^2 + 4 b t)^{0.5}] (2 b)^{-1}\}$	(11)
Verma	$RU = -a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k_1 t)$	(12)
Wang & Sing	$RU = 1 + a v_2 + b v_2^2$	(13)
Valcam	$RU = a + b t + c t^{1.5} + d t^2$	(14)
Exponencial de dois termos	$RU = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k a t)$	(15)
Aproximação da difusão	$RU = (a * (\exp(-k v_2))) + (1-a) \exp(-k b t)$	(16)

Onde:

RU = razão de umidade (adimensional);

t = tempo de secagem (h);

k, k₀ e k₁ = coeficientes de secagem (h⁻¹); e

a, b, c, d, n = constantes de ajustes dos modelos (adimensional).

Fonte : Autores

3. Resultados e Discussão

Para cada tipo de processamento, existiu uma diferença entre os tratamentos e a testemunha (Figuras 2 e 3). Os cafés naturais apresentaram cinética de secagem diferente dos cafés descascados. Isso pode ter ocorrido, pois a presença da mucilagem e a casca, formarem uma barreira mecânica para a saída da água. Quando se realiza a secagem com o fruto inteiro (natural), grande parte da energia empregada é utilizada para a remoção da água do exocarpo e da mucilagem. Isso resulta em um processo mais lento e oneroso. Devido a estas heterogeneidades, neste trabalho os dois tipos de processamento (natural e descascado) foram analisados separadamente.

À medida que os cafés tratados com levedura ou enzimas ficavam mais secos, as diferenças em relação a testemunha diminuam consideravelmente, tendendo a se igualar ou ficar mais próximas no final do processo, devido à maior necessidade de energia para a evaporação da água que se encontra mais fortemente ligada. Refletindo o comportamento da

secagem em outros estudos realizados anteriormente. (Alves *et al.*, 2017; Burmester & Eggers, 2010; Isquierdo *et al.*, 2013; Siqueira *et al.*, 2016).

Na tabela 2 são apresentados os valores dos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) dos 12 modelos empregados para descrever a cinética de secagem. Esses parâmetros foram utilizados como critério para avaliar a eficiência dos modelos para predizer o fenômeno de secagem dos frutos de café.

Existem alguns preceitos a serem seguidos para escolha do modelo. Segundo Kashaninejad *et al.* (2007) e Madamba, Driscoll e Buckle (1996), coeficientes de determinação (R^2) superiores a 95% indicam uma representação satisfatória do processo de secagem. No entanto, os mesmos autores afirmam que o coeficiente de determinação, isoladamente, não constitui um bom critério para a seleção de modelos não lineares. Draper e Smith (1998) afirmam que a capacidade de um modelo descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa (SE).

Logo, quanto menor o valor do SE, melhor o ajuste do modelo aos dados experimentais de razão de umidade (Siqueira *et al.*, 2016). Para o erro médio relativo (P) que indica o desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo (Kashaninejad *et al.* 2007) são recomendados valores inferiores a 10%, para a recomendação do modelo (Mohapatra & Rao, 2005).

Tabela 02 - Valores de coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) para os modelos utilizados para descrever a cinética de secagem do café.

Modelo		NATURAL			DESCASCADO		
		R^2 (%)	P (%)	SE	R^2 (%)	P (%)	SE
Dois termos	Tratamentos	99,54%	6,94	0,0665	94,60%	13,78	0,1681
	Testemunha	99,29%	3,94	0,1046	92,16%	18,45	0,2088
Henderson e Pabis modificado	Tratamentos	99,54%	6,94	0,0515	94,60%	13,78	0,1302
	Testemunha	99,30%	9,71	0,0896	91,97%	18,88	0,1595
Henderson e Pabis	Tratamentos	99,36%	10,82	0,1537	94,60%	13,78	0,2912
	Testemunha	99,30%	9,71	0,2004	91,97%	16,24	0,4006
Midilli	Tratamentos	99,60%	7,79	0,1217	96,40%	10,66	0,2796
	Testemunha	99,58%	6,24	0,1555	55,75%	20,79	0,9826
Newton	Tratamentos	99,34%	10,06	0,1560	93,02%	16,20	0,3295
	Testemunha	99,30%	9,88	0,2006	91,18%	21,74	0,4336
Page	Tratamentos	99,34%	9,28	0,1532	97,51%	7,32	0,2130
	Testemunha	99,40%	7,66	0,1859	91,26%	14,27	0,3952
Thompson	Tratamentos	99,37%	8,14	0,1457	93,78%	17,70	0,3277
	Testemunha	99,48%	6,67	0,1718	91,90%	11,98	0,4197
Verma	Tratamentos	99,39%	10,84	0,1063	99,38%	4,88	0,0892
	Testemunha	99,30%	10,04	0,1416	96,23%	10,08	0,2015
Wang & Sing	Tratamentos	94,18%	31,72	0,4464	99,59%	2,95	0,1067
	Testemunha	98,74%	9,39	0,2449	90,70%	11,97	0,4519
Valcam	Tratamentos	99,73%	4,43	0,0559	99,68%	3,37	0,0542
	Testemunha	99,55%	3,16	0,0866	96,33%	9,65	0,1626
Exponencial de dois termos	Tratamentos	99,33%	9,92	0,1557	92,95%	8,63	0,2780
	Testemunha	99,27%	2,80	0,1834	91,18%	12,66	0,3953
Aproximação da difusão	Tratamentos	99,36%	7,90	0,1033	97,68%	11,88	0,1518
	Testemunha	99,39%	2,79	0,1231	92,34%	12,05	0,2362

Fonte : Autores

Para os cafés naturais todos os coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 99,29% considerados aceitáveis para descrever o fenômeno de secagem. O único modelo que

teve valores de coeficientes de determinação (R^2) de 94,18% e 98,74% e não representa satisfatoriamente a cinética de secagem dos frutos de café foi o modelo de WANG & SING. Analisando o critério de erro médio relativo (P) inferior a 10%, para um ajuste aceitável, os resultados foram bem diferentes entre os modelos apresentando erros médios relativos inferiores a 10%, somente em 8 modelos. O menor valor foi obtido pelo modelo de VALCAM com valores de 4,43 e 3,16. Para o desvio padrão da estimativa (SE) os resultados obtidos foram semelhantes entre os modelos. Assim sendo o modelo de VALCAM é o melhor modelo para se descrever a cinética de secagem, com o maior valor de coeficiente de determinação ($R^2 > 99,73\%$), menor valor de desvio relativo médio ($P < 4,43$) e menor valor de desvio padrão da estimativa ($SE < 0,055$).

Para os cafés processados via úmida os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre os modelos estudados. O modelo de VALCAM foi o único que apresentou os valores ideais para descrever o fenômeno de secagem com coeficientes de determinação (R^2) de 99.63%, erro médio relativo (P) de 3.37 e desvio padrão da estimativa (SE) de 0.0542.

Portanto, para os dois tipos de processamento o modelo de VALCAM foi o melhor para descrever a cinética de secagem dos cafés, nesse experimento.

Na Tabela 03, são apresentados os coeficientes do modelo VALCAM ajustados aos dados observados da cinética de secagem em camada fina dos frutos de café, nas condições consideradas nesse experimento. Nas Figura 2 e Figura 3 são apresentados os comportamentos da razão de umidade dos cafés em função do tempo, durante a secagem em camada fina.

Tabela 3 - Modelo de VALCAM ajustado aos dados experimentais de secagem de frutos de café em camada fina.

$$\text{Modelo de Valcam RU} = a + b t + c t^{1,5} + d t^2$$

Processamento	Tratamentos	A	B	C	D
Natural	EL	1.028655	-0.118984	0.024119	-0.001414
	E	1.052994	-0.121190	0.024777	-0.001465
	L	1.099213	-0.100600	0.018106	-0.000951
	TEST.	1.090579	-0.105741	0.019644	-0.001072
CD	EL	0.992733	-0.037598	0.003199	-0.000272
	E	0.988352	-0.034021	0.001659	-0.000095
	L	1.019254	-0.055626	0.008855	-0.000729
	TEST.	1.004944	-0.046892	0.005864	-0.000477

onde:

Enzima e Levedura (EL);

Somente enzima (E);

Somente levedura (L); e

Testemunha (TEST.);

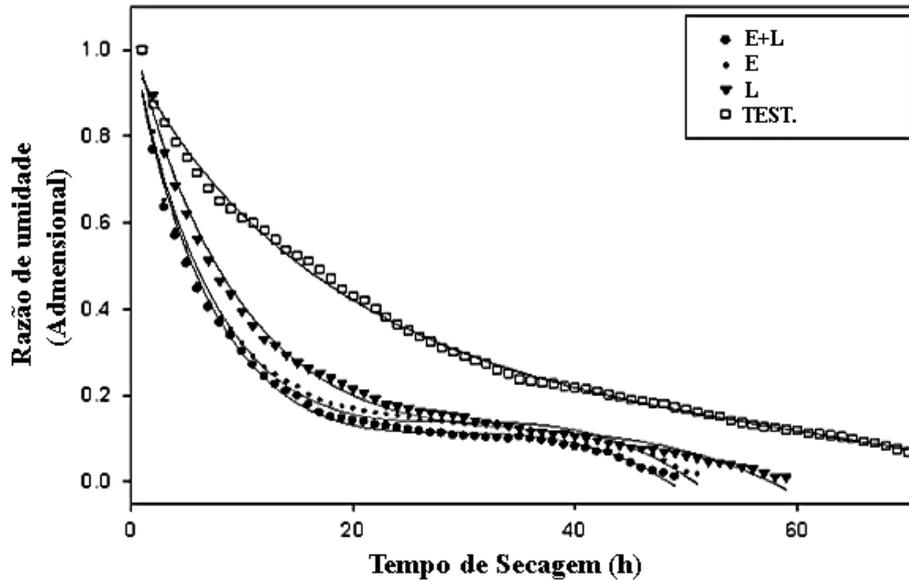
RU = Razão de Umidade (adimensional);

t = Tempo de secagem (h);

a, b, c e d = constantes de ajustes dos modelos (adimensional).

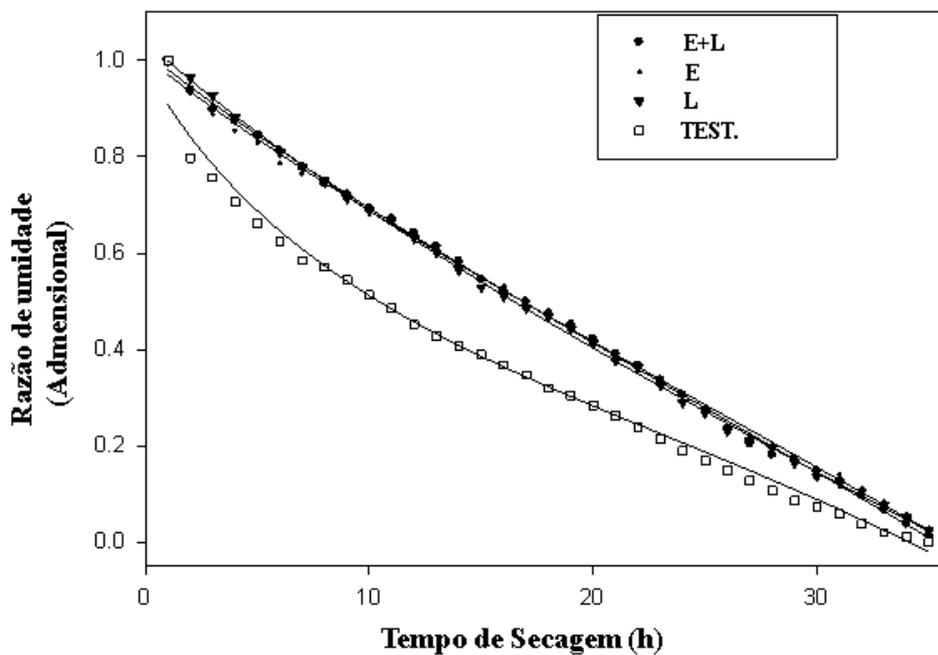
Fonte : Autores

Figura 2 - Razão de umidade observados e estimados (-) pelo modelo de Valcam para a secagem de café processados pela via seca (natural) em camada fina, em função do tempo.



Legenda: E+L= Enzima + Levedura; E= Enzima; L= Levedura; TEST.= Testemunha.
Fonte : Autores

Figura 3 - Razão de umidade observados e estimados (-) pelo modelo de Valcam para a secagem de café processados pela via úmida (descascado) em camada fina, em função do tempo.



Legenda: E+L= Enzima + Levedura; E= Enzima; L= Levedura; TEST.= Testemunha.
Fonte : Autores

O comportamento da cinética dos grãos de café processados por via úmida e via seca estimados pelo modelo VALCAM, para os pré-tratamentos de secagem resultaram em ajuste satisfatório aos valores experimentais e, portanto, representa com precisão o comportamento e descreve o fenômeno de secagem para cafés que passaram pelo tratamento com enzimas e leveduras.

Ambos os tratamentos (Enzima+Levedura; Somente Enzima; e Somente Levedura) mostraram um comportamento semelhante durante a secagem. No processamento natural todos os tratamentos obtiveram um melhor desempenho em relação a testemunha, resultando em uma redução de aproximadamente 10-20 horas no tempo de secagem, ao qual o tratamento que obteve o melhor desempenho foi o que associou inoculação de levedura com enzima (Enzima+Levedura). Já no processamento via úmida não foi possível observar um efeito dos tratamentos na diminuição do tempo de secagem.

4. Considerações Finais

A partir das condições ao qual o presente estudo foi conduzido é possível concluir que:

1. O modelo de cinética de secagem VALCAM mostrou-se com melhor ajuste em relação aos dados experimentais, mostrando uma eficiência na predição de secagem de grãos da cultivar Catuaí vermelho em ambos os tratamentos.
2. Para o processamento via seca (natural) os tratamentos obtiveram melhor desempenho nos tempos iniciais de secagem, mostrando uma boa vantagem no uso de tal tecnologia, pois diminui os riscos que estão ligados ao início da secagem, como formação de fungos e assim resultando em grãos ardidos que podem vir a prejudicar a qualidade da bebida.
3. Para a confirmação da eficácia do uso de enzimas e leveduras na diminuição do tempo de secagem mais estudos são necessários, porém para o presente estudo os tratamentos realizados no processamento via seca (natural) mostraram um melhor desempenho em relação a testemunha, validando o uso de tal tecnologia para garantir um menor tempo de secagem.

Referências

Agate, A. D., & Bhat, J. V. (1966). Role of pectinolytic yeasts in the degradation of mucilage

layer of *Coffea robusta* cherries. *Appl. Environ. Microbiol.*, 14(2), 256-260.

Alves, G. E., Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Siqueira, V. C., Cirillo, M. Â., & Pinto, A. C. F. (2017). Physiological and sensorial quality of Arabica coffee subjected to different temperatures and drying airflows. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 39(2), 225-233.

Andrade, E. T., Borém, F. M., & Hardoim, P. R. (2003). Cinética de secagem do café cereja, bóia e cereja desmucilado, em quatro diferentes tipos de terreiros. *Revista Brasileira de Armazenamento (Brasil) (Especial Café-no. 7)* p. 37-43.

Borém, F. M. (Ed.). (2014). *Handbook of Coffee Post-harvest Technology: A Comprehensive Guide to the Processing, Drying, and Storage of Coffee*. Gin Press.

Burmester, K., & Eggers, R. (2010). Heat and mass transfer during the coffee drying process. *Journal of Food Engineering*, 99(4), 430-436.

Coradi, P., & Borém, F. M. (2009). Alterações dos parâmetros físico químicos na qualidade de bebida do café natural e despulpado em função de diferentes tipos de secagem e condição de armazenamento. *Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa*, (11), 54-63.

Coradi, P. C., Fernandes, C. H., Helmich, J. C., & Goneli, A. L. (2016). Effects of drying air temperature and grain initial moisture content on soybean quality (*Glycine max* (L.) Merrill). *Engenharia Agrícola*, 36(5), 866-876.

Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis* (Vol. 326). John Wiley & Sons.

Evangelista, S. R., Silva, C. F., Cruz, M. G. P., Cordeiro, C. S., Pinheiro, A. C. M., Duarte, W. F., & Schwan, R. F. (2014). Improvement of coffee beverage quality by using selected yeasts strains during the fermentation in dry process. *Food Research International*, 61, 183-195.

Gouvêa, R. F., Leilson O. R., Soza, E. F., Penha, E. M., Matta, V. M. & Freitas, S. P. (2017). Effect of enzymatic treatment on the rheological behavior and vitamin C content of *Spondias tuberosa* (umbu) pulp. *Journal of food science and technology*. 54, 2176-2180.

Isquierdo, E. P., Borém, F. M., de Andrade, E. T., Corrêa, J. L. G., de Oliveira, P. D., & Alves, G. E. (2013). Drying kinetics and quality of natural coffee. *Transactions of the ASABE*, 56(3), 995-1001.

Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., & Tabil, L. G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of food engineering*, 78(1), 98-108.

Kleinwächter, M. & Selmar, D. (2010). "Influence of drying on the content of sugars in wet processed green Arabica coffees." *Food Chemistry* 119(2): 500-504.

Livramento, K. G., Borém, F. M., José, A. C., Santos, A. V., do Livramento, D. E., Alves, J. D., & Paiva, L. V. (2017). Proteomic analysis of coffee grains exposed to different drying process. *Food chemistry*, 221, 1874-1882.

Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of food engineering*, 29(1), 75-97.

Mohapatra, D., & Rao, P. S. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of food engineering*, 66(4), 513-518.

Ondier, G. O., Siebenmorgen, T. J., & Mauromoustakos, A. (2010). Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice. *Journal of Food Engineering*, 100(3), 545-550.

Pereira, J., Queiroz, D., & Pereira, A. (1993). Equações de secagem de café em camada fina na faixa de temperaturas de 40 a 80 C. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, 18, 19.

Pereira, G. V. M, Soccol, V. T., & Soccol, C. R. (2016). Current state of research on cocoa and coffee fermentations. *Current Opinion in Food Science*, 7, 50-57.

Ribeiro, L. S., Miguel, M. G. D. C. P., Evangelista, S. R., Martins, P. M. M., van Mullem, J., Belizario, M. H., & Schwan, R. F. (2017). Behavior of yeast inoculated during semi-dry coffee fermentation and the effect on chemical and sensorial properties of the final beverage. *Food Research International*, 92, 26-32.

Santos, R. V., Vieira, H. D., Borém, F. M. & Isquierdo, E. P. (2014). Comparative analysis of infrastructure for processing using a decision support system for the calculation of cost of phase of post-harvest coffee. *Coffee Science*, 9(4), 480-488.

Saath, R., Broetto, F., Biaggioni, M. A. M., Borém, F. M., Rosa, S. D. V. F. D., & Taveira, J. H. D. S. (2014). Activity of some isoenzymatic systems in stored coffee grains. *Ciência e Agrotecnologia*, 38(1), 15-24.

Saath, R., Borém, F. M., Alves, E., Taveira, J. H. D. S., Medice, R., & Coradi, P. C. (2010). Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. *Ciência e Agrotecnologia*, 34(1), 196-203.

Siqueira, V. C., Borém, F., Isquierdo, E., Alves, G., Ribeiro, D., Pinto, A. & Taveira, J. (2016). Drying of hulled naturally processed coffee with high moisture content and its impacts on quality. *African Journal of Agricultural Research*, Lagos, 11(31), 2903-2911.

Taveira, J. D. S., Borém, F. M., Da Rosa, S. D. V., Oliveira, P. D., Giomo, G. S., Isquierdo, E. P., & Fortunato, V. A. (2015). Post-harvest effects on beverage quality and physiological performance of coffee beans. *Embrapa Café-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Murilo Ferraz Tosta – 40%

Luís Gustavo Amaral Salvio – 30%

Jefferson Luiz Gomes Corrêa – 15%

Ednilton Tavares de Andrade – 15%