

- McClements DJ. 2007. Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47: 611–649.
- Ministerio de Agroindustria. 2016. Cadena del Arroz. Informe de coyuntura. Informe disponible online. [http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/ss\\_alimentos\\_y\\_bebidas/\\_archivos/160600\\_Informe\\_ARROZ.pdf](http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/ss_alimentos_y_bebidas/_archivos/160600_Informe_ARROZ.pdf)
- Rayner M, Timgren A, Sjö M, Dejmeek P. 2012. Quinoa starch granules: A candidate for stabilising food-grade Pickering emulsions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92: 1841–1847.
- Singh Sodhi N, Singh N. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches separated from rice cultivars grown in India. *Food Chemistry*, 80: 99–108.
- Song X, Pei Y, Qiao M, Ma F, Ren H. 2015. Preparation and characterizations of Pickering emulsions stabilized by hydrophobic starch particles. *Food Hydrocolloids*, 45: 256–263.
- Song X, Pei Y, Zhu W, Fu D, Ren H. 2014. Particle-stabilizers modified from indica rice starches differing in amylose content. *Food Chemistry*, 153: 74–80.
- Timgren A, Rayner M, Dejmeek P, Marku D, Sjö M. 2013. Emulsion stabilizing capacity of intact starch granules modified by heat treatment or octenyl succinic anhydride. *Food Science & Nutrition*, 1: 157–71.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a las empresas Litoral Citrus S.A. y Dos Hermanos S.A., por haber donado las muestras de aceite esencial de mandarina verde y de arroz para realizar la investigación. Este trabajo fue parcialmente financiado por la Universidad Nacional de Entre Ríos (proyecto PID Novel 8076) y por el CONICET.

### Secado de café pergamino por lecho fluidizado con asistencia de microondas

Reyes Chaparro J.<sup>1</sup>, Durán Barón R.<sup>3</sup>, Arballo J.R.<sup>1,2</sup>, Campañone L.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> CIDCA (CONICET-CCT La Plata y Universidad Nacional de La Plata). Calle 47 y 116, La Plata (1900), Argentina.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería (UNLP), Calle 1 y 47, La Plata (1900), Argentina.

<sup>3</sup> Universidad Popular del Cesar, Grupo Optimización Agroindustrial, sede Sabanas, bloque F. Valledupar, Colombia.

[lacampa@ing.unlp.edu.ar](mailto:lacampa@ing.unlp.edu.ar)

### RESUMEN

Tradicionalmente el secado del café pergamino húmedo en Colombia, se realiza por secado solar y aire caliente. El tiempo, temperatura, color del grano y principalmente el contenido de humedad final entre 10-12% b.h. se utilizan para establecer el punto final del proceso. Se estudiaron los cambios en las características físicas y parámetros hidrodinámicos del café pergamino húmedo en lecho fluidizado y secado por microondas, utilizando un diseño factorial 3<sup>2</sup> (velocidad del aire: 2, 4 y 6 m/s con 50, 80 y 100% de potencia del microondas) hasta alcanzar el nivel de humedad final. La fluidización se obtiene circulando aire al sector de secado a través de una placa (33 cm x 32 cm) con un tamaño de orificios de 5 mm con una distancia entre ellos de 7 mm (2116 orificios). En el sector de secado, el producto en estado fluidizado, fue irradiado mediante un magnetrón (1000 W). La mejor condición es: velocidad del aire de 4 m/s con 100% de potencia del microondas en 72 minutos, con una reducción del contenido de humedad hasta 11,3% b.h. La difusividad efectiva varió entre  $9,19 \times 10^{-12}$  y  $1,33 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. La energía de activación y factor pre-exponencial se determinó como 2,9 W/g y  $2 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s.



**Palabras clave:** Fluidización, Microondas, Café Pergamino.

## ABSTRACT

Traditionally drying of wet parchment coffee in Colombia, it is by solar drying and hot air. Time, temperature, grain color and mainly the final moisture content between 10-12% w.b. are used to set the end point of the process. The changes were studied in the physical characteristics and hydrodynamic parameters of wet parchment coffee in fluidized bed and microwave drying by using a factorial design  $3^2$  (air speed: 2, 4 and 6 m/s with 50, 80 and 100% microwave power) until reach the final moisture level. The fluidization is obtained by circulating air to the drying sector through a plate (33 cm x 32 cm) with a size of holes 5 mm with a distance between them of 7 mm (2116 holes). In the drying sector, the product in the fluidized state, was irradiated by a magnetron (1000 W). The best condition is air velocity of 4 m/s with 100% microwave power for 72 minutes, with moisture content 11.3% w.b. The effective diffusivity varied between  $9.19 \times 10^{-12}$  and  $1.33 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. The activation energy and pre-exponential factor for moisture diffusion was determined as 2.9 W/g y  $2 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s.

**Keywords:** Fluidization, Microwave, Parchment Coffee.

## INTRODUCCIÓN

El café es el líder en la industria de bebidas calientes en términos de facturación y se espera que este dominio continúe (ICO 2014). El café colombiano es catalogado por ser suave, muy aromático con un perfil de taza muy destacado y se procesa por vía húmeda. En Colombia, el caficultor se encarga de obtener el café pergamino seco que vende a las empresas, las cuales continúan con el proceso de trilla, tostado, molienda y posterior comercialización, sin embargo en los últimos años se ha incrementado la venta del café lavado, con una humedad aproximada de 52% b.h. (Pabón y Peñuela 2016). El secado es una de las operaciones unitarias más comúnmente usadas para prolongar la vida útil de los alimentos y facilitar su comercialización. En Colombia y específicamente la región del Cesar, el secado del grano se realiza por secado solar y aire caliente. El secado solar es el más utilizado y consiste en extender los granos en patios de concreto exponiéndolo al sol durante 24 a 32 horas utilizando rastrillos, sacos de fique y palas de metal para realizar un secado homogéneo hasta llegar a un porcentaje de humedad del 10 al 12 % b.h.

Existen varias técnicas de secado: silo secador (Henaó et al. 2010), secadores rotativos (Castaño et al. 2009), secador parabólico (Oliveros et al. 2008), asimismo han sido desarrollados modelos experimentales como secador por lote semiautomático de bandejas (Vargas y Garzón 2010), lecho fluidizado (López 2005) y utilizando microondas (Cunha et al. 2003).

En la actualidad ha sido demostrado que pueden combinarse dos o más técnicas de secado para lograr una mejor calidad y aumentar la vida útil (Sivakumar et al. 2016). Con la combinación de lecho fluidizado con calentamiento por microondas se pueden minimizar inconvenientes como la transferencia poco efectiva por conducción, secado no uniforme, defectos causados por sobrecalentamiento y reducir los tiempos de proceso. Estos efectos combinados pueden mitigar la venta del café lavado.

El objetivo de este trabajo fue determinar las características físicas (dimensiones, porosidad y factor de forma), parámetros hidrodinámicos (velocidad de fluidización) además estudiar la cinética de secado aplicando un modelo teórico (segunda Ley de Fick) y la obtención de los parámetros de transporte (difusividad) y su dependencia con la potencia de microondas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

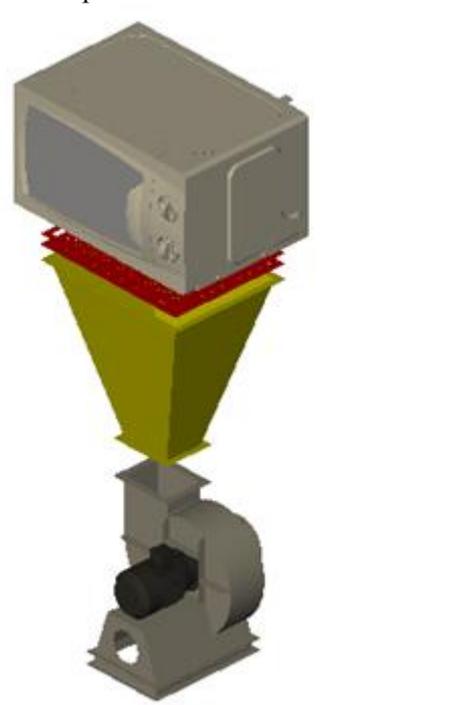
### Materia prima



Se trabajó para cada tratamiento 500 g de café pergamino del género *coffea*, especie *arábica*, variedad *castillo* obtenidas por la cooperativa comercializadora Coovalleupari en el departamento del Cesar, Colombia. Fueron clasificadas según características físicas (dimensiones, porosidad, factor forma) y el contenido inicial de humedad fue determinado por la norma NTC 2325 (2005).

**Método de secado**

En la **Fig. 1** se muestra un esquema del sistema de secado por lecho fluidizado con asistencia de microondas empleado en este trabajo. El mismo consiste en un horno de microondas doméstico (MW1050STC, Samsung Electronics Inc.) con una potencia 1000 W y frecuencia 2450 MHz. El equipo incluye un ventilador centrífugo que genera diferentes velocidades del aire para producir el efecto de fluidización. El horno tiene una placa perforada fluidizadora (33 cm x 32 cm) para distribuir el aire de forma homogénea y además sirve para depositar los granos de café. El vapor de agua proveniente del secado se elimina haciéndolo pasar a través de las aberturas en la parte superior de la pared del horno a la atmósfera exterior.



**Figura 1.** Esquema del sistema de secado lecho fluidizado-microondas.

Los experimentos se realizaron con tres niveles de potencia de microondas 500, 800, 1000 W aplicando tres velocidades de entrada de aire 2, 4, 6 m/s (**Tabla 1**).

**Tabla 1.** Condiciones para el proceso de secado.

TRATAMIENTO (T)	P (W)	Velocidad del aire (m/s)
T1	500	2,0
T2	500	4,0
T3	500	6,0
T4	800	2,0
T5	800	4,0



T6	800	6,0
T7	1000	2,0
T8	1000	4,0
T9	1000	6,0

La pérdida de humedad se registró a intervalo de 3 minutos durante el proceso de secado hasta alcanzar una humedad final comprendida entre 10 y 12% b.h.

#### Difusividad Efectiva

El mecanismo de movimiento de la humedad dentro de un sólido puede ser considerado como un proceso difusivo que domina el fenómeno de transporte. La segunda ley de Fick para la difusión (Ec. 1) ha sido utilizada para describir el proceso de secado. Crank (1975) propuso la solución analítica (Ec. 2) considerando las siguientes suposiciones para la transferencia de humedad:

1. Distribución de la humedad inicial uniforme en toda la partícula.
2. Transferencia de masa unidireccional y simétrica con respecto al centro (geometría esférica).
3. El contenido de humedad en la superficie de la partícula alcanza instantáneamente el equilibrio con la condición del aire circundante.
4. Coeficiente de difusión constante y el encogimiento despreciable.
5. Caída de presión despreciable (lechos pequeños), flujo de Darcy y permeabilidad constante.

De esta forma, se consideran válidas las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Siendo la solución analítica para una geometría esférica:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{R^2}\right) \quad (2)$$

donde MR es la relación de humedad;  $M_t$  es el contenido de humedad (Kg H<sub>2</sub>O/Kg sólido seco);  $M_0$  es el contenido de humedad inicial (Kg H<sub>2</sub>O/Kg Sólido Seco);  $M_e$  es el contenido humedad en equilibrio,  $D_{eff}$  es la difusividad efectiva (m<sup>2</sup>/s), R es el radio de la partícula (0,0059 m), t es el tiempo de secado (s).

Teniendo en cuenta el primer término de serie y aplicando logaritmo natural, la solución analítica (Ec. 2) se simplifica a la siguiente forma (Hernández et al. 2008):

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \pi^2 \frac{D_{eff} t}{R^2} \quad (3)$$

A partir de la pendiente de la recta ln (MR) vs t, se puede obtener  $D_{eff}$  del café pergamino.

#### Energía de activación

Durante el proceso de secado por microondas, se puede encontrar una relación entre la difusividad efectiva y la potencia de microondas a través de la ecuación modificada tipo Arrhenius obtenida por Dadali et al. (2007):



$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a m}{P}\right) \quad (4)$$

donde  $E_a$  es energía de activación (W/g),  $m$  es peso de la muestra (g),  $D_0$  es factor pre-exponencial ( $m^2/s$ ) y  $P$  es potencia de microondas (W).

Con el fin de obtener los coeficientes de la Ec. 4, se graficó los valores obtenidos de  $D_{eff}$  vs  $m/P$  y se obtuvieron los valores de  $E_a$  y  $D_0$ .

#### **Calidad del café pergamino seco**

Las muestras de café pergamino seco obtenidas en el presente trabajo fueron evaluadas por análisis físico y prueba de taza (análisis sensorial). La empresa y comercializadora Manosalva Naranjo S.A.S realizó dicha prueba basándose en las normas: NTC 4883-2011, 2324-1987, 3314-1992 y 3556-2002.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Caracterización del café pergamino**

Las características físicas y parámetros hidrodinámicos del café pergamino variedad *castillo* (**Tabla 2**) permiten clasificarlo como partícula tipo D (Geldart 1973). Estos resultados son similares a los reportados por Sánchez et al. (2007) y Shans y Mathew (2015).



**Tabla 2.** Características físicas del café pergamino variedad *castillo*.

Parámetros	Resultados *
Largo (cm)	1,18±0,13
Ancho (cm)	0,83±0,05
Altura (cm)	0,51±0,09
Humedad (% b.h)	50,80±1,65
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	1065,31±0,03
Esfericidad	0,67±0,05
Porosidad del lecho	0,42±0,03
Velocidad mínima de fluidización teórica (m/s)	2,00±0,02

\* Promedio ± Desviación Estándar

El contenido de humedad está dentro del rango reportado por Patiño et al. (2016), que informaron valores promedios de 53% b.h. Este es un importante indicador de riesgo para la calidad en el almacenamiento, trillado, tostado y molido (Puerta 2006).

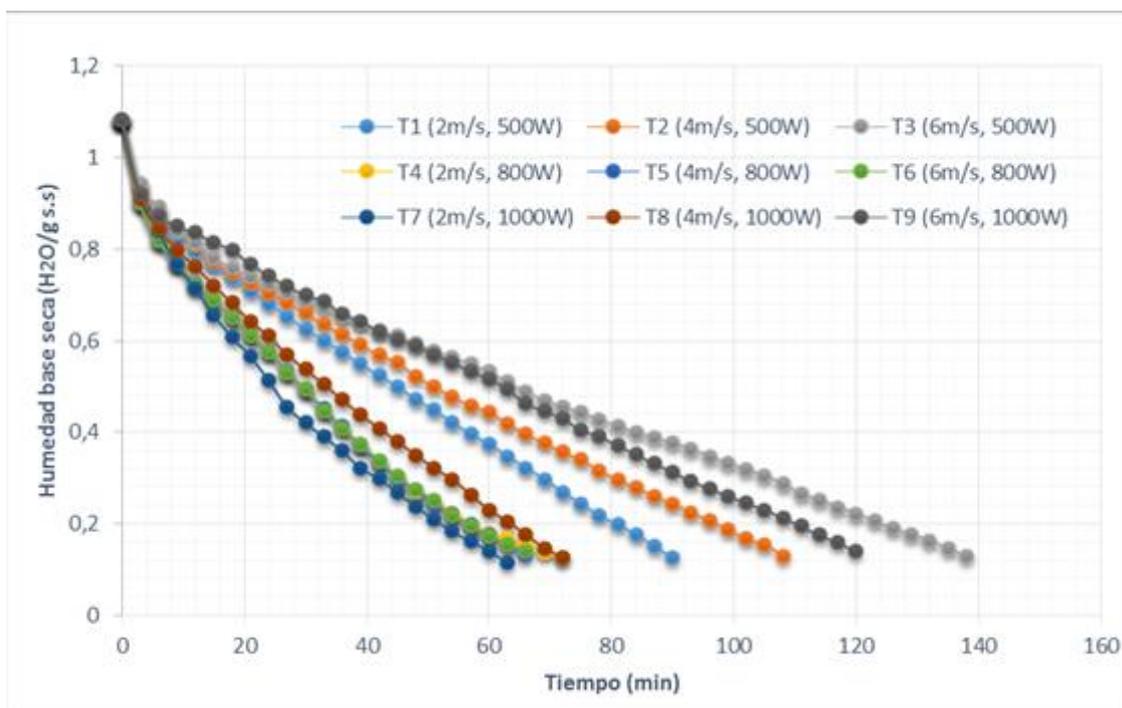
Considerando los altos valores de contenido de humedad en partículas de café pergamino, la velocidad mínima de fluidización ( $V_{mf}$ ) es un factor importante en la comprensión del comportamiento hidrodinámico de lechos fluidizados (Sivakumar et al. 2016). Los resultados experimentales muestran que la velocidad mínima de fluidización es de 2 m/s y la velocidad máxima de fluidización es de aproximadamente 6 m/s (turbulento), los cuales son similares a los reportados por Shans y Mathew (2015).

#### Curva de secado

El contenido de humedad del café pergamino variedad *castillo* se redujo de 52% b.h. hasta el rango de 10-12% b.h para las diferentes condiciones de secado evaluadas. Las curvas de secado se presentan en la **Fig. 2**. Los resultados indicaron que mientras mayor es la potencia de microondas y menor la velocidad del aire aplicada en el proceso de secado, menores son los tiempos requeridos para deshidratar el café pergamino. Esta disminución es debido a la penetración de la energía de microondas por el calor generado volumétricamente dentro de las partículas, creando una gran diferencia de presión de vapor entre el centro y la superficie, que es la característica de calentamiento empleando microondas (Datta y Anantheswaran 2001). Con respecto a la variación de la velocidad de fluidización, a partir de los resultados se puede observar que a medida que aumenta la velocidad aumenta el tiempo de secado esto puede ser debido al efecto de la distribución de las microondas dentro del horno, que presenta valores máximos en la parte inferior. Cuando las velocidades son bajas (2 m/s) los granos de café se mantienen en la parte inferior de la cavidad lo cual hace que la absorción de las microondas sea máxima. En cambio cuando las velocidades de fluidización son altas (6 m/s) los granos de café ascienden a la parte media y superior del horno ubicándose fuera de la zona de máxima absorción.

Cuando se compararon los tiempos de secado de lecho fluidizado con asistencia de microondas y otros métodos de secado reportados en literatura (López 2005, Ciro et al 2011), el tiempo de secado se redujo aproximadamente en un 20 a 40% con el empleo de la energía de microondas. Esto significa que la contribución de la energía de microondas en la fluidización es significativa.





**Figura 2.** Curvas de secado de café pergamino variedad *castillo* a diferentes velocidades y potencias.

Asimismo, la fluidización es esencial para eliminar la humedad que se acumula en la superficie de las partículas por el constante movimiento interno creado por parte de las microondas y también proporciona la uniformidad del secado entre las partículas (Sumnu et al. 2005).

#### Difusividad efectiva

Los valores determinados de la difusividad efectiva ( $D_{\text{eff}}$ ) para diferentes velocidades de aire y potencias del microondas se informan en la **Tabla 3** junto a los valores de  $R^2$ . Los valores se encuentran dentro del rango general de  $10^{-8}$ - $10^{-12}$   $\text{m}^2/\text{s}$  para diferentes productos alimenticios (Zogzas et al 1996).

**Tabla 3.** Valores de  $D_{\text{eff}}$  para los experimentos realizados.

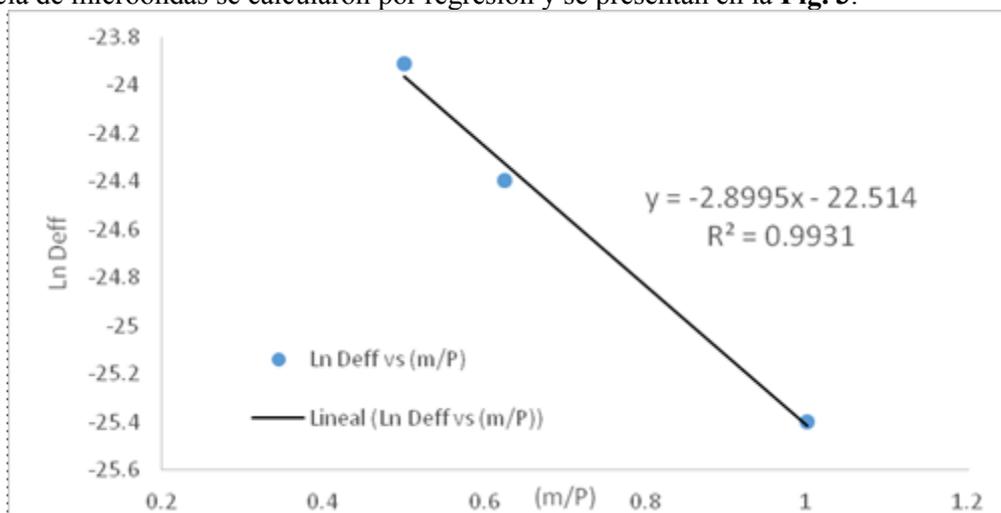
Tratamiento	P (W)	Velocidad del aire (m/s)	$D_{\text{eff}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$R^2$
1	500	2,0	$1,33 \times 10^{-11}$	0,95
2	500	4,0	$9,19 \times 10^{-12}$	0,96
3	500	6,0	$5,45 \times 10^{-12}$	0,96
4	800	2,0	$2,37 \times 10^{-11}$	0,99
5	800	4,0	$2,62 \times 10^{-11}$	0,98
6	800	6,0	$2,61 \times 10^{-11}$	0,98
7	1000	2,0	$3,05 \times 10^{-11}$	0,99
8	1000	4,0	$2,16 \times 10^{-11}$	0,96
9	1000	6,0	$7,14 \times 10^{-11}$	0,96



Como puede observarse, la  $D_{\text{eff}}$  aumenta con el aumento de la potencia de microondas, debido a una mayor absorción de energía por alimento lo cual promueve el aumento de presión en el interior del grano produciendo un aumento en la velocidad de pérdida de agua. Con respecto al efecto de la velocidad de aire, puede apreciarse que, a bajos niveles de potencia de microondas (500W), a medida que la velocidad aumenta el coeficiente de difusión efectivo disminuye; por otro lado a potencias mayores no se puede observar una tendencia clara con respecto a este parámetro.

### Energía de activación

Los valores de energía de activación ( $E_a$ ) y factor pre-exponencial ( $D_0$ ) para el secado por lecho fluidizado con asistencia de microondas se calcularon por regresión y se presentan en la **Fig. 3**.



**Figura 3.** Relación de tipo Arrhenius entre los valores de  $D_{\text{eff}}$  y la potencia de microondas.

Los valores obtenidos de  $D_0$  y  $E_a$  fueron de  $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $2,9 \text{ W/g}$ , respectivamente. El valor de  $E_a$  obtenido representa la energía requerida para iniciar la difusión de la humedad del café pergamino durante el secado, indicando que puede llevarse a cabo en forma satisfactoria con requerimientos de energía relativamente bajos (Zarein et al 2015).

Los valores obtenidos de  $E_a$  del café pergamino variedad *castillo* en secado de lecho fluidizado con asistencia de microondas son inferiores a los reportados en literatura (Sumnu et al. 2005, Dadali 2007, Ganesh et al. 2010, Zarein et al 2015). Esta reducción de la energía de activación puede atribuirse al efecto de calentamiento volumétrico por microondas, lo que aumenta la velocidad de secado y la difusividad de humedad (Khoshtaghaza et al. 2015, Arballo et al. 2014).

### Calidad del café pergamino seco

La calidad del café pergamino fue determinada por la prueba de Análisis Cuantitativo Descriptivo (QDA). La cual consiste en un análisis físico seguido de un análisis sensorial (prueba de taza). Dicha prueba fue realizada por la empresa y comercializadora Manosalva Naranjo S.A.S basándose en las normas correspondientes (Norma Técnica Colombiana –NTC- 4883-2011, 2324-1987, 3314-1992 y 3556-2002). La prueba QDA utiliza para el análisis físico una escala de 0 a 10 para describir la presencia de defectos en los granos de café, significando 0 extra bajo, 1-3 bajo, 4-6 medio, 6-9 alto y 10 extra alto. Para la prueba de taza se empleó la metodología propuesta por el Institute of Food Technologists de Estados Unidos (IFT, 1981), la cual presenta una escala de 1 a 9 donde el número 1 desagrada extremadamente y el 9 agrada extremadamente.



**Tabla 4.** Análisis Físico.

Tipos de defecto	TRATAMIENTO (T)								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Decolorado sobresecado*	1,8	2,0	1,9	3,8	3,9	3,7	4,1	1,5	1,6
Cardenillo	3,0	2,8	2,7	3,0	2,9	2,7	3,0	2,9	2,9
Decolorado ámbar o mantequilla	1,0	1,1	0,9	1,0	0,6	1,1	0,9	0,8	0,9
Negro total o parcial*	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cristalizado*	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Materia extraña	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

\* Defectos provenientes del proceso de secado.

La **Tabla 4** presenta los resultados de los análisis físicos llevados adelante para cada tratamiento, estos defectos tienen su origen en el proceso de producción (cultivo, cosecha, etc.), fermentación y secado propiamente dicho. Considerando la escala de defectos, se puede apreciar que el tratamiento 7 muestra las peores condiciones físicas evidenciadas por la alta calificación en cuanto al defecto “decolorado sobresecado”. Este defecto muestra la influencia de las altas temperaturas durante el proceso de secado, el alto valor en este tratamiento puede ser debido al poco movimiento del café dentro del horno lo cual promueve una alta transferencia de calor que hace que el grano se caliente rápidamente sobrepasando la temperatura óptima de secado de 50°C. Por otro lado, el tratamiento 8 muestra las mejores condiciones físicas con una puntuación de 1,5, este mejoramiento en las condiciones de secado puede ser debido al mayor movimiento de los granos de café promovido por una mayor velocidad de fluidización que hace que los granos de café salgan de la zona de máxima absorción de las microondas, facilitando un calentamiento más lento y una mejor distribución de la potencia dentro del grano. Cabe destacar que no se encontraron granos que presenten los defectos “negro total o parcial”, “cristalizado” y “materia extraña”.

**Tabla 5.** Análisis de prueba de taza.

Características	TRATAMIENTO (T)								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Limpieza	5,9	6,2	6,6	6,0	6,1	6,1	6,2	6,6	6,5
Dulzura	7,2	7,2	7,2	7,2	7,1	7,0	7,2	7,4	7,3
Acidez	7,1	7,1	7,2	6,0	6,5	6,0	5,2	7,3	7,1
Cuerpo	6,0	6,1	5,0	6,2	6,3	4,9	6,0	6,2	6,1
Sabor	7,2	5,0	7,1	7,1	7,3	7,2	6,1	7,3	7,0
Sabor residual	7,2	7,4	7,3	7,1	7,1	5,0	6,0	7,5	7,4
Balance	6,2	6,1	6,2	6,1	6,1	6,0	6,0	6,5	6,1
Impresión global	7,1	7,1	7,2	7,1	7,1	7,1	7,0	7,5	7,3
Totales	53,9	52,2	53,8	52,8	53,6	49,3	49,7	56,3	54,8



En la prueba de taza (**Tabla 5**) se realiza el análisis sensorial de la infusión de café. Considerando el análisis realizado, el tratamiento 8 muestra la mayor aceptabilidad en cuanto a la mayoría de las características evaluadas, mostrando los mayores valores en dulzura, sabor, acidez y sabor residual. Esta mayor aceptabilidad (impresión global 7,5) puede correlacionarse con las mejores condiciones evidenciadas en el análisis físico (**Tabla 4**) para este mismo tratamiento. Los tratamientos con menor aceptabilidad fueron el 6 y 7, mostrando bajos valores especialmente en cuanto al cuerpo, acidez y sabor residual, estos resultados también pueden correlacionarse con los obtenidos del análisis físico que da cuenta de una elevada intensidad en el proceso de secado. En resumen describe un café: muy bueno, equilibrado y balanceado (Manosalva Naranja S.A.S). Teniendo en cuenta el puntaje total y según la escala de (SCAA 2004), se ubicó como un café de carácter comercial.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, la aplicación del secado de lecho fluidizado con asistencia por microondas permitió reducir en gran medida el tiempo de secado contribuyendo con productos de adecuada calidad. La variación del contenido de humedad en el café pergamino variedad *castillo* para el secado de lecho fluidizado-microondas se modeló teóricamente usando la segunda ley de Fick y a partir de la solución analítica de Crank se obtuvieron los coeficientes de difusión efectivos, dando valores entre  $9,19 \times 10^{-12}$  y  $1,33 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. Aplicando una relación tipo Arrhenius entre el coeficiente de difusión y la potencia de microondas se encontró que la energía de activación es 2,9 W/g y el factor pre-exponencial  $2 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. La mejor aceptabilidad general fue para el tratamiento 8: velocidad del aire de 4 m/s con 100% de potencia del microondas, tiempo de proceso 72 minutos hasta alcanzar una humedad final de 11,3% b.h.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arballo JR, Campañone LA, Mascheroni RH. 2014. Modelado matemático de la transferencia de calor y materia y de la presión durante la deshidratación con microondas de alimentos como medios porosos. *Mecánica Computacional*, 33: 2147-2160.
- Castaño F, Rubio FR, Ortega MG. 2009. Modelado de secaderos rotatorios en isocorriente. *Revista Iberoamericana Automática e Informática Industrial*, 6: 32-43.
- Ciro H, Cortés M, López J. 2011. Secado de Café en Lecho Fijo con Intermitencia Térmica y Flujo de Aire Pulsado. *Revista Facultad Nacional Agronómica de Medellín*, 64: 6247-6255.
- Crank J. 1975. *The Mathematics of Diffusion*. 2<sup>a</sup> edition. Oxford: Clarendon Press.
- Cunha ML, Canto MW, Marsaioli A. 2003. Secagem de café cereja descascado por ar quente e microondas. *Revista ciência, Tecnologia Alimentos*, 23: 381-385.
- Dadalı G, Kılıc D, Ozbek B. 2007. Estimation of Effective Moisture Diffusivity of Okra for Microwave Drying. *Drying Technology*, 25: 1441-1446.
- Datta A, Anantheswaran R. 2001. *Handbook Microwave technology for Food applications*. 1<sup>a</sup> edition. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Fermín N, Galán H, García J, Bracho N. 2012. Evaluación de la calidad fisicoquímica y sensorial de tres marcas comerciales de café tostado y molido. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12: 428-438.
- Ganesh P, Regupathi I, Miranda LR, Murugesan T. 2010. Moisture Diffusivity and Energy Consumption during Microwave Drying of Plaster of Paris. *Chemical Product and Process Modeling*, 5:1-23.
- Geldart D. 1973. Types of gas Fluidization. *Powder Technology*, 7: 285-292.
- Henao JD, Soto A, Góngora MA, Cortés F. 2010. Automation of coffee dryer (type silo) of laboratory. *Revista Ingeniería y Región*, 7: 73-83.
- Hernández WN, Ruiz II, Salgado MA Rodríguez GC, García MA. 2008. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. *Journal of Food Engineering* 86: 1-9.
- Institute of Food Technologists - IFT. 1981. *Guide for testing food and beverage products*. Sensory



- Evaluation Division of the Institute of Food Technologists. *Food Technology* 35: 50-59.
- International Coffee Organization – ICO. 2014. A Review of the markets, challenges and opportunities facing the sector. London, United Kingdom.
- Khoshtaghaza MH, Darvishi H, Minaei S. 2015. Effects of Microwave - fluidized bed drying on quality, energy consumption and drying kinetics of soybean kernels. *Journal Food Scientists & Technologists*, 52: 4749-4760.
- López EA. (2005). Secado de café en lecho fluidizado. *Revista Ingenieria e Investigación*, 26: 25-29.
- Norma Técnica Colombiana - NTC 2324. 1987. Café verde. Examen olfativo y visual y determinación de materia extraña y defectos. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Norma Técnica Colombiana - NTC 2325. 2005. Café verde. Determinación de la pérdida de masa a 105°C. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Norma Técnica Colombiana - NTC 3314. 1992. Sector agropecuario. Café y sus productos. Vocabulario. Términos y definiciones. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Norma Técnica Colombiana - NTC 3566. 2002. Café verde. Preparación de muestras para uso en análisis sensorial. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Norma Técnica Colombiana - NTC 4883. 2011. Café verde. Análisis Sensorial. Café. Metodología para análisis sensorial cuantitativo descriptivo del café. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Oliveros CE, Ramírez CA, Sanz JR, Peñuela AE. 2008. Secador parabólico mejorado. *Revista Cenicafé* 51: 01-08.
- Pabón JP, Peñuela AE. 2016. Efecto de la aplicación de agua ozonizada como técnica de conservación del café pergamino húmedo. *Revista Cenicafé* 67: 63-72.
- Patiño M, Pencue E, Vargas R. 2016. Determinación del contenido de humedad en granos de café pergamino seco utilizando speckle dinámico. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14: 84-91.
- Puerta G. 2006. La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. *Revista Cenicafé* 49: 01-08.
- Sánchez J, Anaya I, Vizcarra M, Gutiérrez G, Pineda T. 2007. Estudio de la hidrodinámica del café tostado (coffea arábica l.) en lecho fluidizado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6: 185-192.
- Shans MS, Mathew E. 2015. Hydrodynamic study of four duct swirling fluidized bed and the effect of air temperature on fluidization. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 4: 3618-3623.
- Sivakumar R, Saravanan R, Elaya AP, Iniyan S. 2016. Fluidized bed drying of some agro products – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61:280–301.
- Specialty Coffee Association of America – SCAA. 2004. Manual de catación del programa de cafés especiales de Colombia. California. Pág. 30.
- Sumnu G, Goksu I, Esin A. 2005. Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads. *Journal of Food Engineering*, 66: 463–468.
- Vargas EM, Garzón FA. 2010. Montaje y puesta en marcha de un secador por lotes semiautomático de bandejas por aire caliente. *Revista Ingenieria e Investigación*, 30: 43-51.
- Zarein M, Samadi SH, Ghobadian B. 2015. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14: 41-47.
- Zogzas NP, Moroullis ZB, Marinos-kouris D. 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14: 2225–2253.

