



Modelado matemático del secado con aire y microondas de Café Pergamino

Mathematical modeling of the drying with air and microwaves of parchment coffee

Jose Reyes Chaparro¹, Ricardo Duran Baron, Juliana Gamboa-Santos, Ramiro Arballo, Laura Campañone

Recibo: 08.09.2018 Aceptado: 09.04.2019

Reyes, J., Duran, R., Gamboa-Santos, J., Arballo, R., Campañone L. (2019). Modelado matemático del secado con aire y microondas de Café Pergamino. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 6(1), 7-16.

Resumen

En este trabajo se resolvió numéricamente el secado de Café Pergamino (género *coffea*, especie arábica, variedad Castillo) a través de la resolución de los balances microscópicos de energía y materia. En el modelado fueron consideradas condiciones convectivas que tienen en cuenta el efecto del flujo de aire en la geometría 3D del grano de café. Para la transferencia de energía, se utilizó la ley de Fourier y para la transferencia de materia la ley de Fick, ambas en estado no estacionario. Con el propósito de incorporar el efecto de las microondas sobre los granos de café, se incorporó una fuente de calor constante. La validación fue realizada obteniendo buena concordancia entre los datos experimentales y las simulaciones.

Palabras clave: Café Pergamino, Modelado Matemático, Secado, Microondas, Geometría 3D, Granos, Energía Limpia, Deshidratación.

¹Universidad rvicio Nacional de La Plata Argentina / Universidad Popular del Cesar Colombia; Correo: joedrech@gmail.com

Abstract

In this work, the drying of Parchment coffee was solved numerically (coffea genus, Arabic species, and Castle variety) through the resolution of the microscopic balances of energy and mass. In the modeling, convective conditions that take into account the effect of the airflow in the 3D geometry of the coffee bean was considered. For the transfer of energy, the Fourier's law was used and for the mass transfer the Fick's law, both in a transient state. In order to incorporate the effect of microwaves on coffee beans, a constant heat source was incorporated. The validation was done; a good agreement was obtained between the experimental data and the simulations.

Keywords: Parchment coffee, Mathematical modeling, Drying, Microwave, 3D geometry, Grains, Clean energy, Dehydration.

Introducción

El consumo mundial de café para los años 2016 y 2017 fue 157858 miles de bolsas de 60 kg y para el presente año se estima un aumento significativo del 2% (ICO, 2018). El café colombiano ha ganado identidad y lugar de privilegio en la industria global, con atributos únicos de calidad como fragancia, aroma, sabor, acidez, cuerpo y una variedad exquisita de notas, entre otros.

En Colombia, como resultado de una larga tradición que se ha transmitido y mantenido viva a través de sus generaciones, 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 (Reyes Chaparro et al., 2016).

Por lo tanto, la economía y la sociedad colombiana transitaron el camino hacia la

modernidad de la mano de la producción y exportación de café y posteriormente de la industrialización, pero también de investigación científica y desarrollos tecnológicos que la renuevan (López Rivera, 2018).

En la actualidad, los avances en las capacidades de computación y desarrollo de modelos matemáticos permiten describir los fenómenos que ocurren, contribuyendo como herramientas avanzadas donde fortalecen las mejoras continuas en su implementación en el procesamiento de alimentos, ya sea para escala industrial o uso en laboratorio con una inversión mínima de tiempo, mano de obra y fondos.

De acuerdo a lo expresado, el objetivo del presente estudio fue investigar experimental y teóricamente la transferencia de energía y materia durante el secado con aire y microondas de Café Pergamino.

Materiales y Métodos

Materia Prima

Se trabajó con Café Pergamino del género *coffea*, especie arábica, variedad Castillo (Figura 1) obtenidas por la empresa Café Perijá en el municipio de Agustín Codazzi (Cesar),

Colombia. El contenido inicial de humedad fue determinado por la norma (NTC 2325, 2005) y la caracterización de la geometría (dimensiones, diámetro equivalente, volumen, esfericidad) fue realizada con el software comercial SolidWorks®.



Figura 1. Café Pergamino (género *coffea*, especie arábica, variedad Castillo)

Modelo matemático

El modelo matemático debe permitir resolver la transferencia de energía y materia simultáneamente que ocurren en el proceso de secado. Las siguientes consideraciones han sido realizadas para el desarrollo del modelo que incluyen 1) distribución inicial uniforme de la temperatura y contenido agua en el alimento, 2) tamaño constante (sin cambios de volumen) y encogimiento despreciable, 3) condiciones de contorno convectivas, 4) dominio computacional en geometría 3D, y 5) término de generación interna de calor constante (Q constante).

Balance de energía

Para describir la transferencia de energía, se planteó el balance microscópico considerando válida la ley de Fourier, con un término adicional de generación de calor interno para tener en

cuenta la energía de microondas (Ayappa, 1997).

Donde ρ es la densidad (kg/m^3), C_p

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q \quad (1)$$

capacidad calorífica específica ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), T temperatura ($^\circ\text{C}$), t tiempo (seg), k conductividad térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$) y Q (W/m^3) representa la generación volumétrica de calor.

Para completar el modelo, se plantean las siguientes condiciones.

Inicial:

$$t = 0 \quad T = T_{ini} \quad 0 \leq r \leq R \quad (2)$$

Donde R es el radio (m), T_{ini} temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$), h coeficiente de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$), T_a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), L_{vap} calor de vaporización del agua (J/mol), k_m coeficiente de transferencia de materia (m/s),

$$r = R - k_m \nabla T = h(T - T_a) + L_{vap} \frac{dC_w}{dt}$$

C_w concentración de agua del alimento (mol/m^3) y C_{eq} concentración de agua del alimento en equilibrio (mol/m^3).

Balance de materia

Se plantea el balance microscópico de materia, asumiendo válida la ley de Fick.

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 C_w$$

Para completar el modelo, se plantean las siguientes condiciones:

Inicial:

$$t = 0 \quad C_w = C_{w,ini} \quad 0 \leq r \leq R$$

Contorno:

$$r = R \quad -D_{eff} \nabla C_w = k_m (C_w - C_{eq}) \quad (6)$$

Donde D_{eff} es la difusividad efectiva del agua en el grano de café (m^2/s).

Analogía para la transferencia de energía y materia.

El modelo planteado considera la analogía entre la transferencia de energía y materia para evaluar k_m . Por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor depende de la geometría del producto y las condiciones fluidodinámicas.

En el caso de la convección forzada, el número de Nusselt (N_{nu}) depende del número de Reynolds (N_{re}), el número de Prandtl (N_{pr}), la

$$N_{nu} = 2 + 0.6 N_{pr}^{\frac{1}{3}} * N_{re}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

geometría y las condiciones de contorno convectivas (Bird et al., 1976). Asumiendo el grano como una esfera equivalente, se aplicó la siguiente ecuación:

$$h = \frac{N_{nu} * k_{aire}}{D_{eq}} \quad (8)$$

Con el cálculo del número de Nusselt se puede obtener:

Donde D_{eq} es el diámetro equivalente (m) y k_{aire} coeficiente de transferencia de materia – aire (m/s).

A partir de la Ecuación 8 podemos considerar la analogía Chilton-Colburn para la transferencia de materia y energía para estimar k_m (Bird et al., 1976; Campañone & Zaritzky, 2010).

Discusión

Caracterización del Café Pergamino.

Debido a que los granos de Café Pergamino tienen formas irregulares y morfología superficial diferente, es importante conocer sus características (Tabla 1) y por medio de la representación geométrica (Figura 2) permiten clasificarlo como partícula tipo D (Geldart, 1973), cuyo comportamiento en lechos de gran altura, provoca generación de burbujas si la distribución del aire es muy irregular. En consecuencia, se convierte en una consideración clave al diseñar reactores de lecho fluidizado porque establece las condiciones como: altura del lecho, dimensiones de la placa fluidizadora, caída de presión, diámetro y números de agujeros (Yang, 2003). Estos resultados son similares a los reportados por Ghosh & Gacanja, (1970).

Tabla 1. Caracterización del Café Pergamino

Parámetro	Resultado
Largo (cm)	1.18 ± 0.13 *
Ancho (cm)	0.83 ± 0.05 *
Altura (cm)	0.51 ± 0.09 *
Humedad (% b.h.)	50.80 ± 1.6
Densidad (Kg/m ³)	1065 ± 0.03
Esfericidad	0.93
Volumen (m ³)	3.1×10^{-7}
Diámetro equivalente - D_{eq} (m)	0.0087

* Muestra al azar de 100 granos (Media ± Desv Estándar).

Resolución numérica

Las ecuaciones acopladas de energía y materia con sus condiciones iniciales y de contorno (Ecuación 1 al 6) fueron resueltas numéricamente por el Método de los Elementos Finitos (MEF), usando el software comercial COMSOL Multiphysics versión 5.0, aplicando el solver multifrontal directo (MUMPS) dependiente del tiempo. La cantidad de elementos de la malla computacional utilizada fue 3218 elementos tetraédricos (Figura 3).

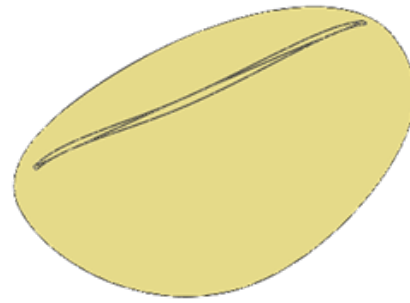


Figura 2. Grano de Café Pergamino en 3D

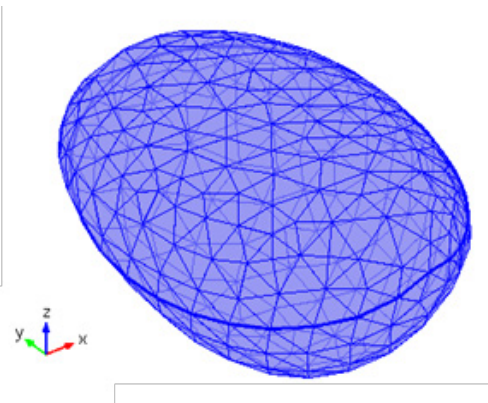


Figura 3. Representación espacial del dominio utilizando elementos tetraédricos

Tabla 2. Parámetros y propiedades utilizadas

Parámetro	Valor [unidad]
Generación volumétrica de calor - Q	1×10^6 [W/m ³]
Velocidad del aire - V_{aire}	2 [m ² /s]
Temperatura inicial - T_{ini}	25 [°C]
Conductividad térmica - k_{aire}	0.026 [J/ms°C]
Concentración de agua inicial - C_w	30767 [mol/m ³]
Conductividad térmica Café Pergamino - k	0.15 [W/m°C] *
Capacidad calorífica Café Pergamino - C_p	1070 [J/Kg°C] *
Difusividad efectiva Café Pergamino - D_{eff}	1×10^{-9} [m ² /s]
Coefficiente de transferencia de calor - h	70.8 [W/m ² °C]
Coefficiente de transferencia de materia - k_m	3×10^{-7} [m/s]

* Chandrasekar & Viswanathan, 1999

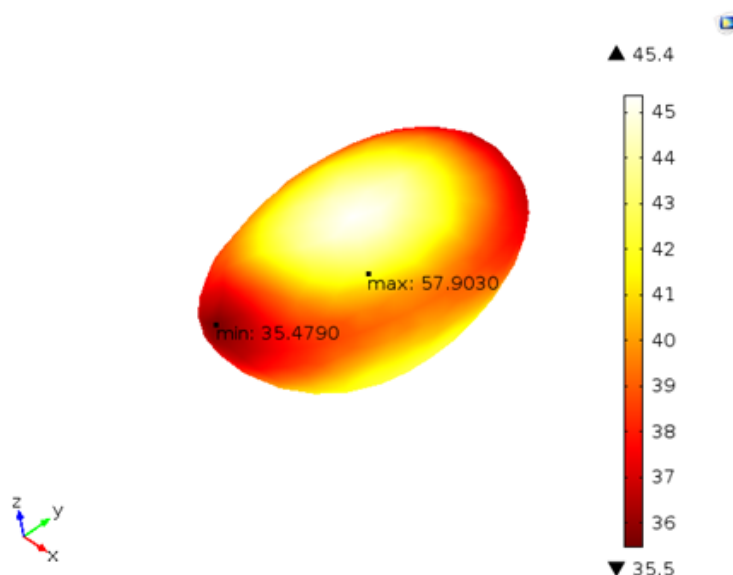


Figura 4. Perfil de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en geometría 3D obtenido a través de COMSOL Multiphysics

Validación del modelo

El modelo matemático fue validado contra datos experimentales de humedad y temperatura obtenidos en el equipo de microondas con lecho fluidizado ubicado en el laboratorio del Centro de Investigación para el Desarrollo de la Ingeniería (CIDI) de la Universidad Popular del Cesar, Colombia. Los parámetros necesarios y las propiedades físicas empleadas para las simulaciones se presentan en la Tabla 2.

En la Figura 4, se muestra el resultado de la simulación computacional donde se puede visualizar el perfil de temperatura en geometría 3D del Café Pergamino; en la misma puede observarse claramente la no uniformidad del mismo, ya que hay áreas de alta intensidad de campo eléctrico (puntos calientes) y otras de intensidad de campo eléctrico baja (puntos fríos) (Adam et al., 2017). Por lo tanto, el calentamiento es ocasionado en el interior del grano que a su vez genera las diferencias de temperaturas entre el centro y la superficie, mostrando claramente la no uniformidad del proceso, donde este comportamiento es similar a la distribución del campo eléctrico, que es característica propia del uso de las microondas (Campañone & Zaritzky,

2010; Datta & Anantheswaran 2001). uso de las microondas (Campañone & Zaritzky, 2010; Datta & Anantheswaran 2001). La evolución de la temperatura mostró dos zonas marcadas (Figura 5). El centro del producto es calentado con mayor intensidad en comparación con la superficie, esto es debido a la distribución del campo eléctrico dentro de la cavidad resonante generado dentro del producto por la aplicación de las microondas (Arballo et al., 2013).

El mecanismo de transferencia de calor durante del secado con aire y microondas de Café Pergamino muestra una mayor temperatura en la superficie que la temperatura del aire circundante. La razón de este efecto radica en que el aire, ingresando a temperatura ambiente (25°C), fluye a través de la superficie del producto e induce el efecto de enfriamiento superficial. Este enfriamiento superficial genera una diferencia de temperatura entre ésta y el centro del grano, el cual absorbe calor en forma volumétrica, dicho comportamiento es similar para el secado lecho fluidizado medio inerte asistido por microondas de ajo fresco reportado por Abbasi Souraki & Mowla, (2008).

Dadas las características geométricas del Café Pergamino (heterogeneidad) resulta muy importante que la energía microondas penetre tan profundamente como sea posible, por lo que su longitud de onda o penetración térmica tiende a estar cercana del centro geométrico del mismo, ocasionando un aumento significativo de la temperatura (Campañone & Zaritzky, 2005; Schiffmann, 2015).

La deshidratación con microondas posee la capacidad de interactuar con las moléculas de agua en el interior del producto, produciendo su calentamiento y promoviendo la evaporación volumétrica del agua contenida en el Café Pergamino. En la Figura 5, notamos la primera zona con rápido aumento de la temperatura inicial y luego durante la segunda zona se mantiene la temperatura casi constante, que se puede apreciar tanto en el centro como en la superficie, cuyo límite es la temperatura de equilibrio que alcanza en el centro alrededor de 56°C y en la superficie 41°C . Cuando es alcanzada la temperatura de equilibrio, observamos que esta se mantiene e inmediatamente ocurre la pérdida de la concentración de humedad y es más significativa.

Adicionalmente, el modelado matemático

permite observar el comportamiento de la humedad en el tiempo (Figuras 6 y 7). Como puede observarse en la Figura 6, la pérdida de agua es también función de la posición dentro del grano de café, siendo evidente la mayor pérdida en la superficie, esta variación es originada por la no uniformidad del calentamiento (debido a la generación volumétrica de energía del microondas), ocurriendo que la transferencia de masa se debe principalmente al gradiente de presión total establecido por el cambio de fase, a medida que aumenta la temperatura. En la figura 7, se muestra el descenso global de la humedad predicha y experimental en función del tiempo. Los resultados obtenidos del modelo matemático desarrollado muestran un buen ajuste de las predicciones para la temperatura y humedad utilizando diseño asistido por computadora en 3D.

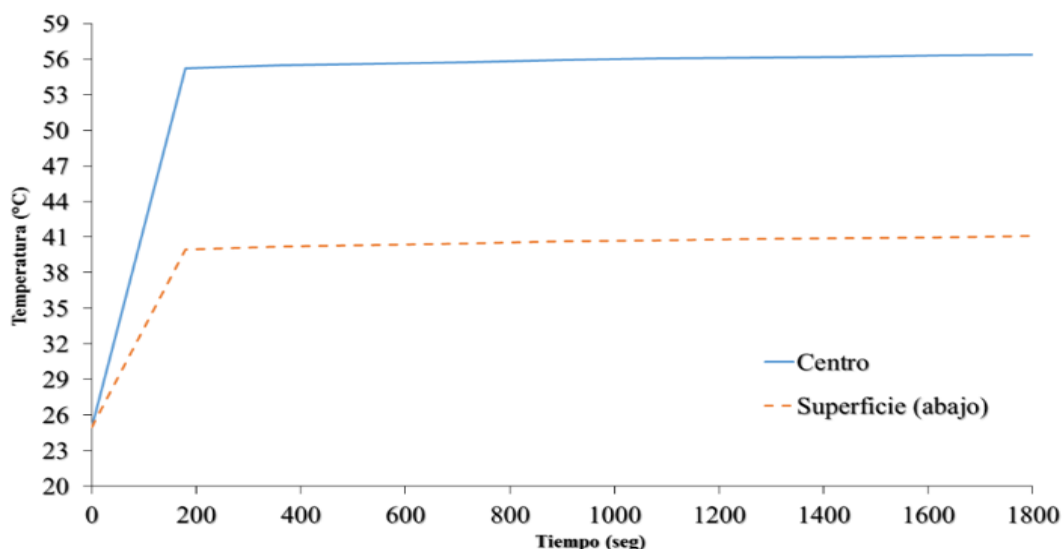


Figura 5. Evolución de la temperatura en el centro y en la superficie durante el calentamiento de un grano de café por microondas

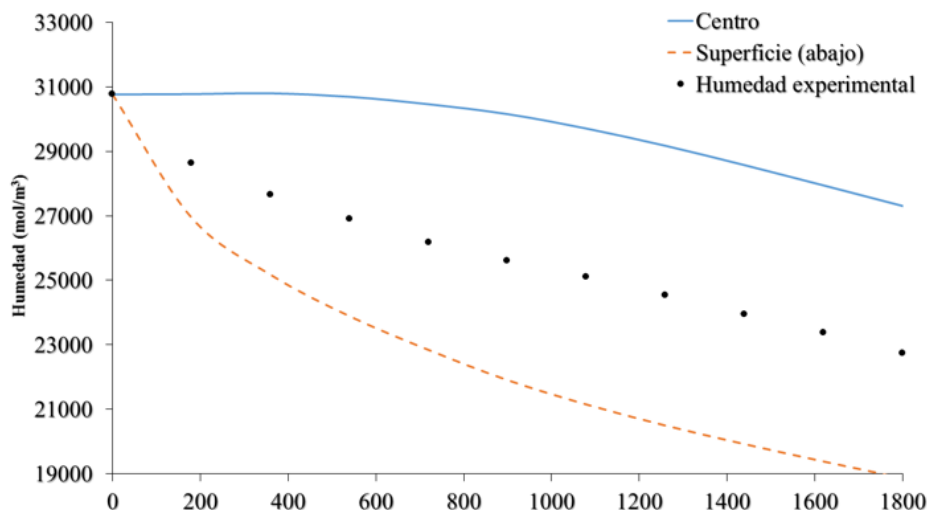


Figura 6. Concentración media (centro y superficie) en función del tiempo

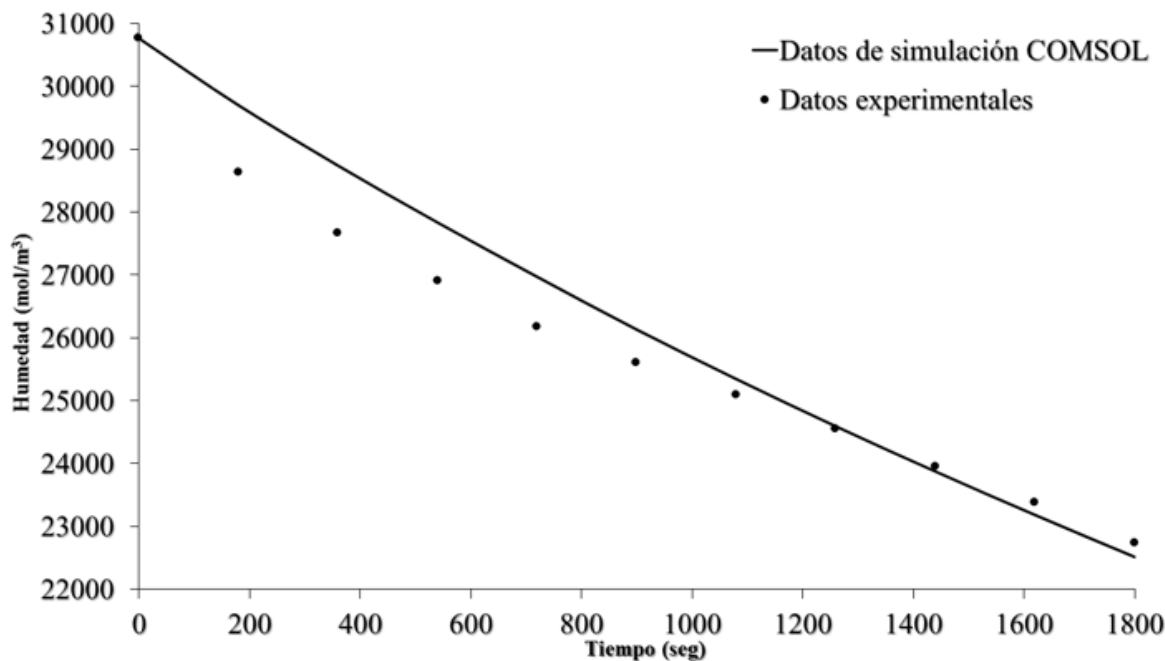


Figura 7. Concentración de humedad simulada y experimental en función del tiempo

Conclusiones

El presente estudio puede considerarse un primer paso hacia el desarrollo de un modelo más completo de interés industrial. Particularmente, optimizar el proceso de secado y comprender

mejor las relaciones entre los parámetros con la calidad del producto.

La integración del calentamiento por microondas con un sistema de lecho fluidizado podría ser una alternativa atractiva y realista

que hasta el momento no se ha explorado para el proceso de secado del Café Pergamino.

Referencias

Abbasi Souraki, B., & Mowla, D. (2008). Experimental and theoretical investigation of drying behaviour of garlic in an inert medium fluidized bed assisted by microwave. *Journal of Food Engineering*, 88(4), 438–449.

Adam, M., Beneroso, D., Katrib, J., Kingman, S., & Robinson, J. P. (2017). Microwave fluidized bed for biomass pyrolysis. Part I: Process design. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(4), 601-612.

Arballo, J. R., Campañone, L. A., & Mascheroni, R. H. (2013). Análisis de perfiles de temperatura durante el proceso de calentamiento de frutas por microondas. *Mecánica Computacional*, 32(15), 1393–1407.

Ayappa, K. G. (1997). Modelling transport processes during microwave heating: a review. *Reviews in Chemical Engineering*, 13(2), 1-69.

Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1976). *Transport phenomena*. John Wiley and Sons, New York.

Campañone, L. A., & Zaritzky, N. E. (2005). Mathematical analysis of microwave heating process. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 359-368.

Campañone, L. A., & Zaritzky, N. E. (2010). Mathematical modeling and simulation of microwave thawing of large solid foods under different operating conditions. *Food and Bioprocess Technology*, 3(6), 813-825.

Chandrasekar, V., & Viswanathan, R. (1999). Physical and Thermal Properties of Coffee. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73(3), 227-234.

Datta, A., & Anantheswaran, R. (2001). *Handbook Microwave technology for Food applications*. Marcel Dekker, Inc, New York.

Geldart, D. (1973). Types of gas Fluidization. *Powder Technology*, 7(5), 285-292.

Ghosh, B. N., & Gacanja, W. (1970). A study of the shape and size of wet parchment coffee beans. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 15(2), 91–99.

ICO – International Coffee Organization. (2018). World coffee consumption (Data as at April 2018 - next update July 2018). London, United Kingdom.

López Rivera, E. (2018). *Reseña. La economía colombiana del siglo XX: Un recorrido por la historia y sus protagonistas*. Carlos Caballero. Penguin Random House, 2016. *Tiempo y Economía*, 5(2), 227–231

NTC – Norma Técnica Colombiana 2325. (2005). *Café verde. Determinación de la pérdida de masa a 105°C*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Bogotá, Colombia

Reyes Chaparro, J., Durán Barón, R., Arballo, J. R., & Campañone, L. A. (2016). Secado de café pergamino por lecho fluidizado con asistencia de microondas. VI Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, 382-392.

Schiffmann, R. F. (2015). Microwave and Dielectric Drying. *Handbook of Industrial Drying*, 283-301.

Yang, W. (2003). Particle Characterization and Dynamics. *Handbook of Fluidization and fluid-particle systems*, 01-27.