



## Modelado numérico del proceso de secado solar de manzanas en el municipio de Nuevo Colón-Boyacá

### Numerical model of solar drying of apples from Nuevo Colón-Boyacá

Pedro Julián García<sup>1</sup>, Jersson León-Medina<sup>2</sup>, Leydi Cárdenas-Flechas<sup>3</sup>, Juan Giraldo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Ingenierías Aplicadas para la Innovación la Gestión y el Desarrollo-INGAP, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. Orcid: [orcid.org/0000-0002-8042-1299](http://orcid.org/0000-0002-8042-1299). Email: [pjgarcia@ufpso.edu.co](mailto:pjgarcia@ufpso.edu.co)

<sup>2</sup>Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Nuevas Tecnologías-GIDINT, Universidad Santo Tomas-Seccional Tunja, Tunja, Colombia. Orcid: [orcid.org/0000-0002-9198-1996](http://orcid.org/0000-0002-9198-1996). Email: [jersson.leon@usantoto.edu.co](mailto:jersson.leon@usantoto.edu.co)

<sup>3</sup>Grupo de Energías y Nuevas Tecnologías-GENTE, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Sede Duitama, Duitama, Colombia. Orcid: [orcid.org/0000-0001-6039-3924](http://orcid.org/0000-0001-6039-3924). Email: [julicf-08@hotmail.com](mailto:julicf-08@hotmail.com)

<sup>4</sup>Grupo de Investigación de Diseño Avanzado, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. Orcid: [orcid.org/0000-0002-1902-2555](http://orcid.org/0000-0002-1902-2555). Email: [juan.giraldo@profesores.uamerica.edu.co](mailto:juan.giraldo@profesores.uamerica.edu.co)

RECIBIDO: Abril 17, 2017. ACEPTADO: Agosto 13, 2017. VERSIÓN FINAL: Septiembre 27, 2017.

#### RESUMEN

El secado de frutales caducifolios, como las manzanas, es un proceso en el cual se disminuye la cantidad de humedad contenida dentro del fruto. Además, se busca prolongar el tiempo en el que conserven propiedades organolépticas, físicas y químicas aptas para el consumo humano, también este proceso tiene por objeto disminuir los desperdicios y generar una economía rentable en empresas agrícolas productoras de alimentos deshidratados. Según los estándares nacionales, en Colombia se pierde y se desperdicia el 58 % de las frutas y las verduras (6,1 millones de toneladas), mientras que en el mundo el promedio está en 45 % [1]. En Colombia, la región que tiene el mayor nivel de participación en la pérdida nacional es la Centro-oriental (Cundinamarca, Santander, Norte de Santander y Boyacá) con una participación del 1 millón de toneladas entre frutas y verduras. Este proyecto busca realizar una simulación del proceso de transferencia de calor presente en un secador solar de manzanas. En el proceso de secado de frutas intervienen diversas variables físicas, como la temperatura, la velocidad del aire, la humedad de la fruta, el tiempo de secado [12] y para garantizar una calidad óptima en la fruta se deben controlar dichas variables, los fenómenos de transferencia de calor a utilizar son: la convección de calor producida en el aire con los sólidos, la radiación del sol, y la conducción entre los sólidos que componen la estructura de un equipo secador. Existen diversos softwares que facilitan la elaboración de esta simulación como: Matlab o Python. Finalmente se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para que con ellas se pueda continuar con el proceso de diseño del secador.

**PALABRAS CLAVE:** Energía solar; secador de frutas; simulación numérica.

#### ABSTRACT

The drying of fruits such as apples is a process in which the amount of moisture is decreased. Furthermore this process looks for to prolong the time with the fruits preserve organoleptic, physical and chemical properties for human consumption, this process also aims to reduce waste and generate a profitable economy in agricultural companies producing dehydrated foods. According to national standards, 58 % of fruits and vegetables are lost and wasted in Colombia, while in the world the average is 45 % [1]. In Colombia, the region with the highest level of participation

ISSN Impreso: 1657 - 4583, En Línea: 2145 - 8456

Este artículo puede compartirse bajo la licencia **CC BY-ND 4.0** y se referencia usando el siguiente formato: P. García, J. León, L. Cardenas, JF. Giraldo, "Modelado numérico del proceso de secado solar de manzanas en el municipio de nuevo Colón-Boyacá," *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 1, pp. 201-208, 2018. Doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018019>

in the national loss is the Central Eastern (Cundinamarca, Santander, Norte de Santander and Boyacá) with one million tons. This project seeks to simulate the heat transfer process in a solar apple dryer. In the fruit drying process, various physical variables are involved, such as temperature, air velocity, fruit moisture, drying time [12]. In order to guarantee an optimal quality in the fruit, these variables must be controlled, the heat transfer phenomena to be used are: the convection of heat produced in the air with the solids, the radiation of the sun, and the conduction between the solids of the structure of a dryer equipment. There are several software that facilitate the elaboration of this simulation as: Matlab or Python. Finally the results of the simulations are presented. With these results you can continue with the dryer design process.

**KEYWORDS:** Solar energy; fruit dryer; numerical simulation.

## 1. INTRODUCCIÓN

Según la clasificación de la asociación colombiana de frutas y hortalizas, Colombia se encuentra entre los cinco primeros países productores de frutas y hortalizas en latino América. A su vez reporta un alto porcentaje de desperdicios de dichos productos, alcanzando un 58% de pérdidas, (6.1 millones de toneladas) superando el promedio mundial del 45% registrado en el año 2016 [1]. Según Barrett et al, la mayor parte de estos desperdicios en países en vía de desarrollo se presenta en etapas tempranas del proceso agroindustrial (almacenamiento, refrigeración, transporte) [2]. Estas pérdidas generan desperdicio no solo en el producto recolectado sino también gasto innecesario de los recursos utilizados en su proceso de cosecha y pos cosecha.

El departamento de Boyacá es una de las regiones de Colombia con mayor participación de cultivo de frutales caducifolios. El departamento cuenta con aproximadamente 3.000 ha plantadas de peral, duraznero, ciruelo y manzanero [3], así mismo es uno de los que cuentan con mayor participación de pérdida nacional, reportando un promedio de pérdidas en post-cosecha del 5 al 10% de la producción global [5], el municipio de Nueva Colon, dado sus condiciones ambientales de altitud, temperatura y humedad relativa, puede producir hasta tres cosechas al año a causa de sus lluvias prolongadas, las cuales generan temperaturas uniformes a lo largo de todo el año. [9]. En la actualidad el municipio de Nuevo Colón es catalogado como el mayor productor de dichos frutos en el país [6].

El cultivo de manzano es uno de los frutales caducifolios de mayor producción en el departamento de Boyacá, siendo el tercero más importante por debajo del durazno y el ciruelo [3]. El municipio de Nuevo Colón cuenta con condiciones de temperatura entre 14 y 20 °C, brillo de sol entre 800 y 2.000 horas anuales y humedad relativa entre 13,5 y 85%. Estas condiciones han favorecido su cultivo en la región pues se acercan a las condiciones óptimas para el crecimiento de dicho fruto en el país [8][6][3].

Gran parte de esta producción de manzano se desperdician en etapas iniciales del proceso. En el municipio de Nueva Colón se identificó como principales factores problemáticos causantes del alto índice de residuos generados de frutales caducifolios los siguientes puntos: deficiencias asociadas a la falta de recursos genéticos, nula formación de talento especializado en el manejo de dichos frutos, poca eficiencia en la tecnología existente, y problemas en el manejo de plagas y enfermedades [3]. Dichos problemas han venido identificándose desde instituciones de investigación y federaciones agrícolas del país y buscan a partir de proyectos de investigación dar solución al aprovechamiento o disminución de los residuos generados de estos productos [4].

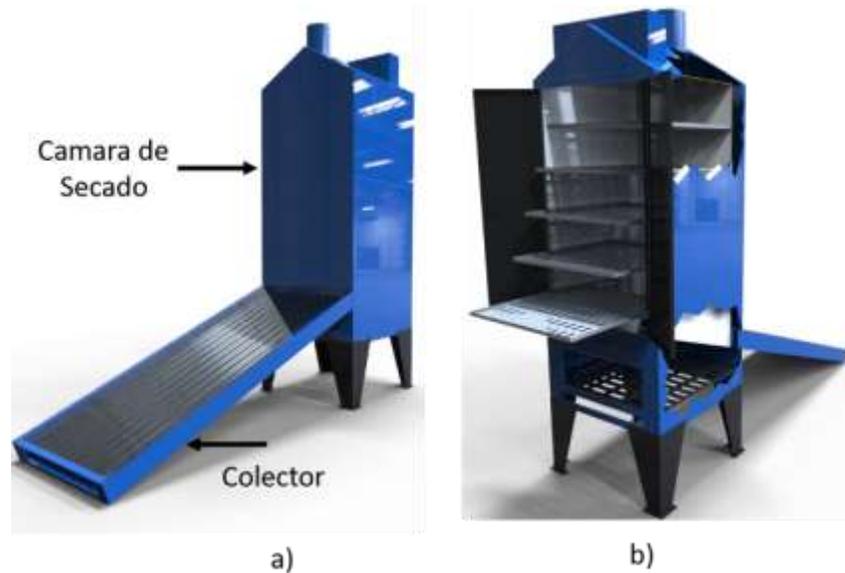
Los frutales caducifolios son frutos que contienen grandes cantidades de agua, alcanzando hasta un 80% cuando el fruto está maduro. Dicho contenido de agua clasifica a estas frutas como materia perecible, aumentando así la probabilidad de deteriorarse más fácilmente y volviendo más propenso la obtención de plagas y enfermedades asociadas a las mismas [11].

Para reducir estos problemas y dar mayor vida a dichos frutos se ha venido incorporando procesos de refrigeración y acondicionamiento a los sistemas de almacenamiento y transporte. Uno de los procesos más comunes y actualmente más usados es el secado. Este proceso aparte de alargar la vida del producto y la seguridad alimentaria cuenta con múltiples beneficios como: reducción de peso, reducción de costo es almacenamiento y transporte, reducción de generación de plagas y enfermedades asociadas a agentes microbianos y en muchos casos conservación total de las propiedades y nutrientes del producto. Además, el proceso de secado requiere un alto consumo energético en la producción de manzanas deshidratadas, por lo que estudios para mejorar la eficiencia y disminuir costos son relevantes.

En el estudio de secadores solares se tiene en cuenta variables aleatorias como la velocidad y dirección del viento, las cuales pueden ser descritas mediante

funciones de probabilidad [17], otra variable aleatoria que interviene es la radiación solar [17], tradicionalmente, el secado con energía solar es uno de los procedimientos técnicos más usados en la conservación de alimentos, ya que debido a su disponibilidad disminuye los costos por consumo de energía [16]. La caracterización de la zona específica en la que opera el secador (Nuevo Colón) puede contribuir para determinar los vientos y radiación del mismo.

Algunos secadores que operan en Boyacá requieren el uso de paneles fotovoltaicos, estos paneles son más eficientes si se baja su temperatura con un sistema de irrigación [18] y para almacenar energía los secadores utilizan un sistema de piso radiante, el cual puede ser analizado utilizando correlaciones de transferencia de calor basados en intercambiadores de calor en espiral [19].



**Figura 1.** a. Modelo CAD del secador indicando el colector y la cámara de secado. b. Detalle interno de la cámara de secado. **Fuente.** Autores.

Acorde a la información recolectada sobre la radiación solar y velocidad del viento se modela un secador solar mixto el cual operara en el municipio de Nuevo Colón Boyacá. El modelado se basa en un balance de energía de los componentes principales del secador, y el balance de transferencia de masa de las manzanas. Los resultados se utilizan para determinar la pérdida de energía y masa de las manzanas, y la eficiencia del secador solar.

## 2. MÉTODOS

El análisis de secadores solares puede ser realizado a través de un modelo numérico del fenómeno físico del proceso de secado, dicho modelo generalmente se valida a través de un proceso de experimentación, sin embargo el proceso experimental toma tiempo, requiere de calibración, puesta a punto de instrumentos y algunas veces resulta costoso. Por otro lado el modelado matemático y numérico permite representar fenómenos físicos que ocurren en el interior del secador, posibilitando el estudio del fenómeno de secado y permitiendo predecir diferentes escenarios. En este

trabajo, el modelo numérico desarrollado permite reproducir fenómenos de transferencia de calor y masa [12]. El modelo CAD renderizado del secador solar se puede apreciar en la Figura 1. Dicho modelo CAD se ilustra para describir la geometría del secador, el cual se compone de dos partes fundamentales, en primer lugar un colector solar, en donde ingresa el aire a temperatura ambiente y se calienta por medio de energía solar térmica, en segundo lugar se encuentra la cámara de secado, en donde se ubica el producto a secar, en este caso manzanas, cortadas en rodajas y dispuestas en bandejas; el aire caliente proveniente del colector solar entra a la cámara de secado por la parte inferior y es expulsado por la parte superior, después de haber interactuado con las manzanas, de tal forma que el aire a la salida tendrá un contenido de humedad mayor heredado de las manzanas y el producto tendrá un contenido de humedad menor deseado en el proceso de secado. El modelo matemático del secador solar se divide en dos secciones, en la primera sección se estudia el colector solar y en la segunda sección se estudia la cámara de secado.



Los valores se tomaron para condiciones estándar de funcionamiento y la sumatoria de pérdidas exteriores que se presenta en la ecuación (1) han sido calculados como un solo término mostrado en la ecuación (7) [12]. Los valores fueron calculados para un número de Reynolds inferior a 2000 en el que el flujo es laminar.

$$\begin{aligned}
 h_{cam}(T_c - T_{amb}) + h_{rcs}(T_c - T_s) \\
 - \alpha_c I (1 + \tau_c \rho_p) \quad (7) \\
 = U_t(T_c - T_{amb})
 \end{aligned}$$

**Tabla 1.** Propiedades térmicas de la manzana.

Propiedades	Símbolo	Unidades	Valor
Densidad de la manzana Golden D [7]	$\rho_m$	$kg/m^3$	845
Conductividad térmica de la manzana Golden D[7]	$k_m$	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	0.427
Calor específico de la manzana Golden D [7]	$c_{p,m}$	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$	3.58
Difusividad efectiva a 30°C [15]	$D_{eff, 30}$	$\frac{m^2}{s}$	$2.5 \times 10^{-10}$
Difusividad efectiva a 30°C [15]	$D_{eff, 50}$	$\frac{m^2}{s}$	$5.5 \times 10^{-10}$

Fuente. [7], [15].

### 3. RESULTADOS

El sistema se resuelve utilizando el algoritmo presentado por Guarín [12], y se determina el rendimiento térmico del colector usando la ecuación (8) El rendimiento del colector se define como la relación entre la potencia que entra en forma de radiación solar y la potencia obtenida a la salida, cuantificada por el flujo másico de aire caliente por el gradiente de temperatura como se muestra en la ecuación (9).

$$\eta_{col} = \frac{\dot{Q}_{u,sal}}{I_{col} A_{col}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{u,sal} \\
 = \frac{\int \dot{m}_a(t) c_{p,a}(T_{col,sal} - T_{col,ent}) dt}{t} \quad (9)
 \end{aligned}$$

Para la temperatura ambiente característica en el municipio de Nuevo Colón de 20°C, un colector de 1 m de ancho, 0,1 m de alto y 3 m de largo. Se obtuvo un calor útil  $\dot{Q}_u$  de 250W y el rendimiento térmico del colector

$\eta_{col}$  de 16,13 %. Los valores están ajustados a valores de rendimiento típicos para estas regiones.

La cámara de secado se diseña tomando condiciones similares a las del colector. El valor de difusividad efectiva mostrado en la Tabla 1 es dependiente de la temperatura, la cual se puede calcular utilizando una ecuación tipo Arrhenius [12].

$$D_{eff} = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_o) - \frac{E_a}{R} \times \frac{1}{T} \quad (11)$$

$$A = \ln(D_o) \quad (12)$$

$$B = -\frac{E_a}{R} \quad (13)$$

La difusividad efectiva es dependiente de la temperatura por lo que se linealiza utilizando una transformada logarítmica. El valor del coeficiente de la difusividad efectiva es de  $82,24 \times 10^{-6} m^2/s$  y la energía de activación es de 32,11 kJ/mol.

**Tabla 2.** Propiedades térmicas del sector solar [12].

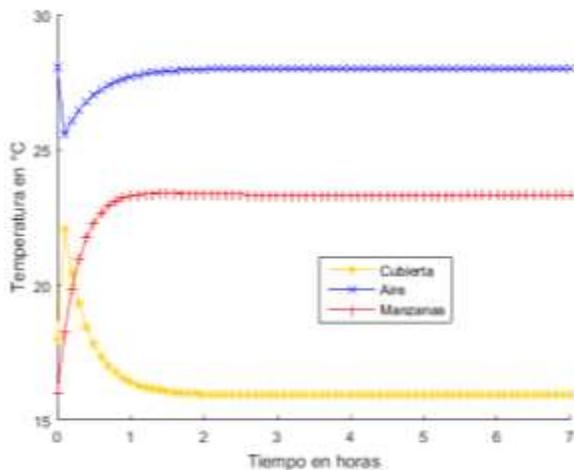
Propiedades	Símbolo	Unidades	Valor
Conductividad del aire	$k_a$	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	0.024
Densidad del aire	$\rho_a$	$\frac{kg}{m^3}$	1.147
Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el cielo	$h_{rc}$	$\frac{W}{m^2}$	0.014
Coefficiente de transferencia de calor por convección interno	$h_{ca}$	$\frac{W}{m^2}$	0.87
Coefficiente de transferencia de calor por convección externo	$h_{cam}$	$\frac{W}{m^2}$	11.8
Radiación solar incidente	$I$	$\frac{W}{m^2}$	500
Pérdidas superiores	$U_t$	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	5.9
Pérdidas inferiores	$U_{b,p}$	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	1.25
Número de Reynolds	$Re$	-	1877

Fuente. [12].

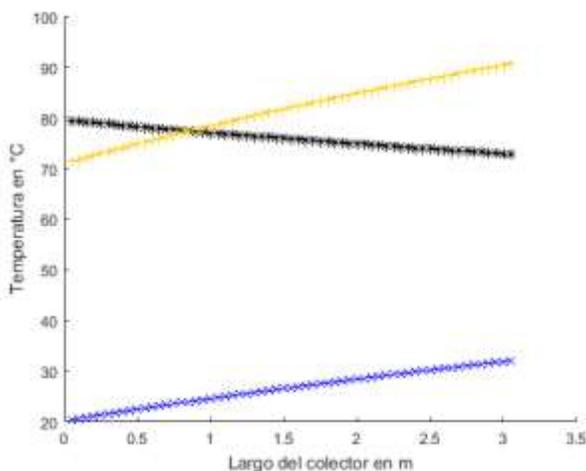
La Figura 3 presenta el cambio de temperatura para los principales elementos de la cámara de secado, que son las temperaturas en la cubierta, el aire interno y las manzanas. La temperatura es menor hacia la cubierta porque es un elemento de gran área que se encuentra en contacto con el medio ambiente. El aire viene caliente del

colector por lo que su temperatura es mayor y esta se estabiliza con el tiempo, de igual forma la temperatura en las manzanas aumenta debido al intercambio energético dado por la interacción con el aire. La Figura 4 presenta la variación de temperatura para los elementos cubierta, aire y placa a lo largo de un colector inclinado 20°C. La temperatura de la placa tiene un leve descenso desde 79,4 hasta 72,83°C mientras la temperatura del aire y la cubierta aumentan. El incremento de la temperatura del aire es de 11,6 °C y el de la cubierta de 19,23 °C.

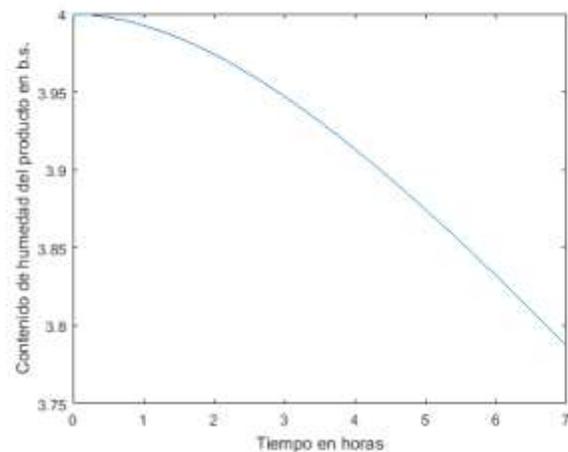
La Figura 5 presenta pérdida del contenido de humedad del producto, las manzanas pierden alrededor de 0,28 kg de agua/kg de producto seco durante 7 horas.



**Figura 3.** Cambio de temperatura en la cámara de secado.  
**Fuente.** Autores.



**Figura 4.** Cambio de temperatura a lo largo del colector.  
**Fuente.** Autores.



**Figura 5.** Cambio de contenido de humedad del producto.  
**Fuente.** Autores.

#### 4. CONCLUSIONES

La preservación de alimentos ha sido un problema de gran importancia en la sociedad, el secado se presenta como una alternativa para solucionar este problema. El proceso de deshidratación de alimentos requiere grandes cantidades de energía y en este estudio se utiliza la energía solar como energía limpia para realizar este proceso de forma más eficiente. Esta investigación muestra el uso de métodos numéricos para estudiar los fenómenos de transporte de energía y masa en un dispositivo de secado solar. El estudio se realizó para los componentes principales que son el colector y la cámara de secado. El algoritmo presentado permitió cuantificar el valor de la energía suministrada por el colector y su eficiencia, también se determinó el cambio de temperatura para los productos contenidos a lo largo del tiempo para la cámara de secado. Se tomaron condiciones ambientales de Nuevo Colón, acordes a la investigación presentada se observó que la manzana incrementaba su temperatura en el orden de 7 °C, y debido a esto se estima necesario el suministro de energía de una fuente adicional. Adicionalmente, esta investigación presenta la metodología para calcular la energía de activación que es igual a 32,11 kJ/mol y el coeficiente de la ecuación tipo Arrhenius es  $82,24 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , estos parámetros son esenciales para determinar la pérdida de humedad de las manzanas en un rango de temperatura de 30 a 50°C, los dos en conjunto permiten determinar la energía mínima para iniciar el procesos de secado y la razón de pérdida del contenido de agua de las manzanas.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a cada una de las instituciones de las que hacen parte los autores por el apoyo para proyectos de investigación y participación en Congresos Académicos, a su vez agradecemos a la Universidad Santo Tomas Seccional Tunja por el apoyo brindado con el proyecto de investigación titulado: “Diseño y Construcción de un secador híbrido Solar-Biomasa para manzanas en el municipio de Nuevo Colón Boyacá” financiado con la XVIII Convocatoria Interna de Proyectos de Investigación de 2016.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Departamento Nacional de Planeación -DNP, Informe de Desperdicio de Alimentos en Colombia, 2016.
- [2] Barrett, D. M., Lloyd, B., “Advanced preservation methods and nutrient retention in fruits and vegetables,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 92, no. 1, pp. 7-22, 2012.
- [3] Sociedad Colombiana de ciencias hortícolas (SCCH), los frutales caducifolios Situación actual, sistemas de cultivo y plan de desarrollo en Colombia, 2013.
- [4] Sociedad Colombiana de ciencias hortícolas (SCCH), Asociación Hortifrutícola de Colombia (ASOHOFrucol), Diagnóstico comparativo del estado actual de los sistemas productivos de frutales caducifolios: manzano (*Malus sp.*), peral (*Pyrus sp.*), duraznero (*Prunus sp.*) y ciruelo (*Prunus sp.*) en Colombia, estrategias de difusión y planeación del desarrollo de estos cultivos.
- [5] PFN, Desarrollo de la fruticultura en Boyacá. Tunja, Colombia, 2006.
- [6] Puentes, G., L.F. Rodríguez y L. Bermúdez. “Análisis de grupo de las empresas productoras de frutales caducifolios del departamento de Boyacá,” *Agron. Colombia*, vol. 26, no. 1, pp. 146-154, 2008.
- [7] H.S. Ramaswamy, M.A. Tung, Thermophysical Properties of Apples in Relation to Freezing, 1981
- [8] Fischer, G. “Técnica de suprimir el reposo invernal del manzano en el altiplano colombiano,” *Proc. Interamer. Soc. Trop. Hort.*, vol. 36, pp. 49-54, 1992.
- [9] Fischer, G., F. Casierra-Posada y C. Villamizar, “Producción forzada de duraznero, *Prunus pérsica* L. Batsch en el altiplano tropical de Boyacá, Colombia,” *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.*, vol. 4, no. 1, pp. 19-32, 2010.
- [10] Ávila, C. y A. Robles, “Caracterización y tipificación de los sistemas productivos de manzano (*Malus sp.*), pera (*Pyrus sp.*), durazno (*Prunus sp.*) y ciruelo (*Prunus sp.*) en Colombia,” Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2012.
- [11] V. Orsat, V. Changrue, G. S. Vijaya, Microwave drying of fruits and vegetables, 2006
- [12] P. J. Garcia-Guarin, S. L. R. Prat and P. C. Andrade, “Modelación matemática de secador de túnel tipo Hohenheim solar biomasa para plantas aromáticas,” En: VII Congreso Internacional Ingeniería Mecánica, V Congreso Ingeniería Mecatrónica y V Congreso Materia Energía y Medio Ambiente, Cartagena, Colombia, pp 1-4, 2015.
- [13] H. Kopka and P. W. Daly, A Guide to LATEX, 3rd ed. Harlow, England: Addison-Wesley, 1999.
- [14] Doymaz, Ibrahim. Thin-layer drying behaviour of mint leaves, *Journal of Food Engineering*, Colombia, pp 1-4, 2006.
- [15] C. I. C. Monzón, “Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratadas,” Ph.D. dissertation, Departamento de tecnología de alimentos, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España, 2006.
- [16] P. J. Garcia-Guarin, S. L. R. Prat and P. C. Andrade, “Implementación del secador solar de túnel tipo Hohenheim en productos agrícolas: Revisión de literatura,” *Revisión de literatura. Puente*, vol. 10, no 1, pp. 7-19, 2017.
- [17] P. Vergara-Barrios, J. M. Rey-López, G. A. Osma-Pinto, G. Ordóñez-Plata, “Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 13, no. 2, pp. 49-57, 2014.
- [18] G. Osma, C. Flórez, W. Rojas, J. Flórez, G. Ordóñez, “Mejoramiento del desempeño de paneles fotovoltaicos a partir de la irrigación forzada de la superficie superior,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no 2, pp. 161-171, 2017.
- [19] J. Ardila, D. Hincapie, “Spiral Tube Heat Exchanger,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 1, no 2, pp. 204-212, 2002.