

Diseño, construcción y evaluación de un secador solar para mango Ataulfo*

Design, construction and evaluation of a solar dryer for Ataulfo mango

Roilan Iglesias Díaz^{1§}, Reynaldo Alonso José Gómez¹, Orlando Lastres Danguillecourt¹, Pascual López de Paz¹, Nein Farrera Vázquez¹ y Guillermo Rogelio Ibáñez Duharte¹

¹Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas-Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables. Edificio 24, Libramiento Norte Poniente Núm. 1150. Ciudad Universitaria, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. CP. 29039. Tel. 6170440, ext. 4290. (jreynaldoalonso@gmail.com; orlando.lastres@unicach.mx; pascualdepaz@gmail.com; nein.farrera68@hotmail.com; guibdu@gmail.com. [§]Autor para correspondencia: roilan2008@hotmail.com.

Resumen

Se reporta el diseño, construcción y evaluación de un secador solar para mango Ataulfo cosechado en la región del Soconusco en el estado de Chiapas. En esta región se pierde 15% del mango ya sea por súper producción y por no tener un método de conservación poscosecha. Para el diseño se utilizaron las especificaciones del producto a secar, el registro de las condiciones climáticas del lugar y los ensayos experimentales de secado realizados en la UNICACH. La metodología propuesta se basa en la sistemática combinación de la aplicación de los conceptos básicos de diseño y reglas generales de la transferencia de calor y masa, presentándose los resultados de dichos cálculos en un cuadro. Se obtuvieron de la evaluación en vacío del secador valores promedios de humedad y temperatura del aire en la cámara de secado de 5% y 45 °C respectivamente. La temperatura promedio del aire ambiente fue de 25 °C y la radiación solar promedio de 500 W m⁻². El tiempo de secado fue de 8 horas sol, secándose hasta 8.4% desde una humedad inicial de 80%. Se presentan las curvas la evaluación en vacío; además de la variación del peso, humedad y la humedad libre del mango respecto al tiempo. Se demostró que es posible dar tratamiento

Abstract

The design, construction and evaluation of a solar dryer for Ataulfo mango harvested in the Soconusco region in the state of Chiapas is reported. In this region, 15% of the mango is lost due to its super production and because it does not have a postharvest conservation method. For the design, the specifications of the product to be dried, the registration of the climatic conditions of the place and the experimental drying tests carried out were used in the UNICACH. The proposed methodology is based on the systematic combination of the application of the basic concepts of design and general rules of heat and mass transfer, presenting the results of these calculations in a table. The average vacuum and humidity values in the drying chamber of 5% and 45 °C respectively were obtained from the vacuum evaluation of the dryer. The average temperature of the ambient air was 25 °C and the average solar radiation of 500 W m⁻². The drying time was 8 hours, drying to 8.4% from an initial humidity of 80%. The curves are presented in vacuum evaluation; In addition to the variation of weight, humidity and free moisture of the handle with respect to time. It was demonstrated that it is possible to give post-

* Recibido: agosto de 2017
Aceptado: octubre de 2017

poscosecha del mango Ataulfo y aprovechar el que se pierde en los campos. Este diseño de secador solar es muy flexible en su funcionamiento.

Palabras clave: conservación de mango, deshidratación solar, diseño.

Introducción

Existe una gran diversidad de sistemas e instalaciones que usan la energía solar térmica para la conservación de productos agrícolas y específicamente de frutas tropicales y uno de los mayores retos de estas tecnologías es su diseño.

Una revisión de los parámetros involucrados en el diseño de secadores solares se puede encontrar en Forson *et al.* (2007). Se presenta un método de diseño basado en las características del producto a deshidratar y en ensayos experimentales apoyados en principios generales de la termodinámica. Saravia *et al.* (2008) presentó un método de diseño basado en las curvas de secado del producto obtenidas experimentalmente, basándose en el cálculo computacional del comportamiento del secador mediante un programa se simulación de nombre SIMUSOL.

Corp (1998) en Cuba presentó un método de diseño gráfico basado en un nomograma, que aunque determina sólo los parámetros fundamentales, como el área de la lámina absorbadora, el volumen del secador y el flujo de aire necesario para deshidratar el material, reporta ventajas por su facilidad de uso y rapidez del cálculo de diseño. Todos estos métodos han obtenido resultados buenos en el diseño de secadores solares para el deshidratado de productos agrícolas.

La Asociación de Fruticultores del Soconusco del estado de Chiapas, México reveló que Chiapas ocupa el sexto lugar en la producción de mango a nivel mundial y el primero en exportar mango Ataulfo a los Estados Unidos de América y Canadá. En esta región se pierde hasta 15% del fruto por sobreproducción o por no poseer una buena calidad de exportación. Entonces, una de las forma de aprovechar al menos un por ciento de este mango es dándole un oportuno tratamiento poscosecha para poderlo comercializar. El tratamiento más apropiado por sus bajos costos y eficiencia es el secado solar.

harvest treatment of the Ataulfo mango and take advantage of the one that is lost in the fields. This solar dryer design is very flexible in its operation.

Keywords: design, mango conservation, solar dehydration.

Introduction

There is a great diversity of systems and facilities that use solar thermal energy for the conservation of agricultural products and specifically tropical fruits and one of the greatest challenges of these technologies is their design.

A review of the parameters involved in the design of solar dryers can be found in Forson *et al.* (2007). A design method is presented based on the characteristics of the product to be dehydrated and in experimental tests supported by general principles of thermodynamics. Saravia *et al.* (2008) presented a design method based on the product drying curves obtained experimentally, based on the computational calculation of the behavior of the dryer through a simulation program named SIMUSOL.

Corp (1998) in Cuba presented a graphic design method based on a nomogram, which although it only determines the fundamental parameters, such as the area of the absorber sheet, the volume of the dryer and the air flow necessary to dehydrate the material, reports advantages for its ease of use and speed of design calculation. All these methods have obtained good results in the design of solar dryers for the dehydration of agricultural products.

The Soconusco Fruit Growers Association of the state of Chiapas, Mexico revealed that Chiapas ranks sixth in mango production worldwide and the first to export Ataulfo mango to the United States of America and Canada. In this region, up to 15% of the fruit is lost due to overproduction or because it does not have good export quality. So, one of the ways to take advantage of at least one percent of this mango is by giving it a timely post-harvest treatment to be able to market it. The most appropriate treatment for its low costs and efficiency is solar drying.

Therefore, in this research aims at the design, construction and evaluation of a solar dryer for Ataulfo mango, where was used a methodology based on the laws of thermodynamics,

Por tanto en esta investigación tiene como objetivo el diseño, construcción y evaluación un secador solar para el mango Ataulfo, donde se empleó una metodología basada en las leyes de la termodinámicas, de la transferencia de calor y masa, expresiones matemáticas empleadas en diseños de secadores solares y otras consideraciones de diseño. Además se realizó una evaluación en vacío (sin producto) del prototipo de secador y una evaluación con carga (con producto) que resulto en la curva de secado del mango Ataulfo. Además se realizó la evaluación en vacío (sin producto) del prototipo de secador y una evaluación con carga (con producto) que resulto en la curva de secado del mango Ataulfo.

Se plantea como hipótesis que la implementación de un sistema de deshidratado solar proporcionaría la posibilidad de aprovechar el mango Ataulfo que se pierde en la zona del soconusco por sobreproducción o falta de calidad exportable y que podría comercializarse como un producto seco en el mercado nacional.

Dicho secador debe llevar el mango Ataulfo desde su humedad inicial 80% a la conservación o de equilibrio de 10% y hacerlo con eficiencia, siendo esta una tecnología amigable con el medio ambiente, sencilla en su construcción y recomendable para el tratamiento poscosecha del mango.

Materiales y métodos

Diseño del secador

En el diseño del secador se parte de algunas condiciones meteorológicas del día del ensayo y características experimentales del mango Ataulfo. Para las condiciones del día del ensayo (21 de abril), se utilizó una estación actinométrica emplazada en el Centro de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (CIDTER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), donde se desarrolló el secador solar. Esta estación registra un gran número de parámetros ambienteles, solo interesaron para este estudio la radiación solar, la temperatura ambiente y humedad relativa del aire, mediante su registrador WatchDog Data Logger 450. Este registrador incluye reloj y memoria interna para grabar la hora y el día de las lecturas. Se realizaron medidas a las variables cada media hora. Registra temperaturas entre -20 °F a 70 °F y humedades relativas entre 20% a 100%, con exactitudes de ± 0.7 °F y

heat and mass transfer, mathematical expressions used in designs of dryers solar and other design considerations. In addition, a vacuum evaluation (without product) of the dryer prototype and a load evaluation (with product) was carried out, which resulted in the drying curve of the Ataulfo mango. In addition, the vacuum evaluation (without product) of the dryer prototype and an evaluation with load (with product) that resulted in the drying curve of the Ataulfo mango were carried out.

It is hypothesized that the implementation of a solar dehydration system would provide the possibility of taking advantage of the Ataulfo mango that is lost in the Soconusco zone due to overproduction or lack of exportable quality and that could be marketed as a dry product in the national market.

Said dryer must carry the Ataulfo handle from its initial humidity 80% to the conservation or equilibrium of 10% and to do it with efficiency, being this a friendly technology with the environment, simple in its construction and recommendable for the post-harvest treatment of the mango.

Materials and methods

Dryer design

The design of the dryer is based on some meteorological conditions on the day of the trial and experimental characteristics of the Ataulfo mango. For the conditions of the trial day (April 21), an actinometric station was used at the Center for Research and Development of Renewable Energies (CIDTER) of the University of Sciences and Arts of Chiapas (UNICACH), where the dryer was developed solar. This station registers a large number of ambient parameters, only interested for this study the solar radiation, the ambient temperature and relative humidity, through its WatchDog Data Logger 450 recorder. This recorder includes clock and internal memory to record the time and day of the readings. Measurements were made to the variables every half hour. Registers temperatures between -20 °F to 70 °F and relative humidity between 20% to 100%, with accuracies of ± 0.7 °F and $\pm 3\%$ respectively. Solar radiation was recorded with a pyranometer attached to it, with a range between 300 and 1100 W m⁻² and an accuracy margin of $\pm 5\%$. The data that was useful for the design were.

$\pm 3\%$ respectivamente. La radiación solar se registró con un piranómetro adjunto a esta, con un rango entre 300 y 1100 W m^{-2} y un margen de exactitud de $\pm 5\%$. Los datos que fueron útiles para el diseño fueron.

Radiación solar promedio: $I_t = 500 \text{ W m}^{-2}$; temperatura promedio del aire ambiente: $T_a = 298 \text{ K}$; humedad relativa promedio del aire ambiente $HR = 47\%$. Los datos del mango fueron obtenidos de la bibliografía referenciada a continuación: humedad inicial del mango: $M_{iwb} = 80\%$ (producto fresco) (Buitrago, 2014); humedad final del mango: $M_{fwb} = 10\%$ (humedad de equilibrio) (Buitrago, 2014); densidad del mango ataulfo: $\rho = 1\,050 \text{ kg m}^{-3}$ (González *et al.*, 2015); porosidad del mango: $\xi = 0.9$ (Ramírez *et al.* 2010).

El mango pasa por un pretratamiento consistente en lavado, pelado y rebanado. Estas rebanadas son sumergidas en una solución con 2% de ácido cítrico para evitar la oxidación, obteniéndose una masa inicial limpia de mango: $W_w = 100 \text{ kg}$.

Cálculo del flujo de aire necesario para el secado

Hematian *et al.* (2012) plantearon que el aumento de la temperatura del aire ambiente al pasar por un colector solar es:

$$\Delta T = 2\beta(T_b - T_c)(I_t/I_o) \quad 1)$$

Donde: ΔT es la diferencia de temperatura entre el aire que sale del colector y el ambiente; β es un parámetro adimensional que está entre 0.14 - 0.25 y se asumió el valor de 0.2, T_b es la temperatura de ebullición del agua a presión atmosférica (100 °C); T_c es la temperatura de congelación del agua a presión atmosférica (0 °C); I_t es la intensidad de la radiación solar incidente promedio sobre el plano del colector; y I_o es la constante solar (1 367 W m^{-2}).

La cantidad de agua que se debe extraer al producto para llevarlo a la humedad final es según Forson *et al.* (2007).

$$M_w = \frac{W_w (M_{iwb} - M_{fwb})}{(1 - M_{fwb})} \quad 2)$$

Donde: W_w es la masa inicial; M_{iwb} es la humedad inicial base húmeda del mango; M_{fwb} es la humedad final del mango base húmeda.

Average solar radiation: $I_t = 500 \text{ W m}^{-2}$; average ambient air temperature: $T_a = 298 \text{ K}$; average relative humidity of the ambient air $HR = 47\%$. Mango data were obtained from the bibliography referenced below: initial humidity of mango: $M_{iwb} = 80\%$ (fresh product) (Buitrago, 2014); final humidity of mango: $M_{fwb} = 10\%$ (equilibrium moisture) (Buitrago, 2014); density of the ataulfo mango: $\rho = 1\,050 \text{ kg m}^{-3}$ (González *et al.*, 2015). Porosity of mango: $\xi = 0.9$ (Ramírez *et al.*, 2010).

The handle goes through a pre-treatment consisting of washing, peeling and slicing. These slices are submerged in a solution with 2% citric acid to avoid oxidation, obtaining a clean initial mass of mango: $W_w = 100 \text{ kg}$.

Calculation of the air flow required for drying

Hematian *et al.* (2012) stated that the increase in ambient air temperature when passing through a solar collector is:

$$\Delta T = 2\beta(T_b - T_c)(I_t/I_o) \quad 1)$$

Where: ΔT is the temperature difference between the air leaving the collector and the environment; β is a dimensionless parameter that is between 0.14 - 0.25 and the value of 0.2 was assumed; T_b is the boiling temperature of water at atmospheric pressure (100 °C); T_c is the freezing temperature of water at atmospheric pressure (0 °C); I_t is the intensity of the average incident solar radiation on the collector plane and I_o is the solar constant (1 367 W m^{-2}).

The amount of water that must be extracted to the product to bring it to the final humidity is according to Forson *et al.* (2007).

$$M_w = \frac{W_w (M_{iwb} - M_{fwb})}{(1 - M_{fwb})} \quad 2)$$

Where: W_w is the initial mass; M_{iwb} is the initial moisture base humidity of the mango; M_{fwb} is the final moisture of the wet base mango.

Forson *et al.* (2007) proposes that the total volume of air needed (V_a), to eliminate the amount of water to the product is evaluated from the equation.

$$V_a = \frac{M_w L_t R_a T_a}{C_{pa} P_a (T_o - T_f)} \quad 3)$$

$$V_a = \frac{M_w L_t R_a T_a}{C_{pa} P_a (T_o - T_f)} \quad (3)$$

Donde: $R_a = 283 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (constante de los gases ideales); P_a es la presión parcial del aire seco en la atmósfera; $C_{pa} = 1.012 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (calor específico del aire a presión constante), T_f es la temperatura promedio del aire que sale de la cámara de secado; L_t es calor latente de evaporación. $T_f = T_a + 0.25 (\Delta T)$, donde: T_a es la temperatura promedio del aire ambiente y $T_o = 323 \text{ K}$ (temperatura de salida del aire del colector) (Cengel y Boles, 2011).

La temperatura promedio del producto durante el secado (T_{pt}) se estimó como la media ponderada de las temperaturas T_o y T_a : $T_{pt} = 0.25(3T_o + T_a) = 316.5 \text{ K}$ (Aquino *et al.*, 2009). Chávez (2012) propone que el valor del calor latente de evaporación de la ecuación (3) se puede estimar mediante la siguiente expresión.

$$L_t = R_g T_c T_b \ln \left(\frac{P_c}{10^5} \right) \left[\frac{(T_c - T_{pt})^{0.38}}{(T_c - T_b)^{1.38}} \right] \quad (4)$$

Donde: R_g es la constante de los gases para el vapor de agua ($461 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T_b es el punto de ebullición del agua (373 K); P_c es la presión crítica del agua (22.1 MPa); T_c es la temperatura crítica del agua (647.4 K) (Hernández, 2014).

El flujo de aire necesario para el secado del producto se obtuvo por:

$$G = V_a / t \quad (5)$$

Donde: t es el tiempo necesario para el secado del mango hasta su humedad de equilibrio, según los ensayos experimentales fue de $t = 8 \text{ h}$.

Cálculo del área de secado en el interior de la cámara

Forson *et al.* (2007) plantea que el área efectiva para el secado (A) puede ser calculada por:

$$A = \frac{W_w}{\rho h_l \xi (1 - \varepsilon_v)} \quad (6)$$

Donde: ρ = densidad del producto en condiciones húmedas; h_l = espesor de la capa de producto en la bandeja (0.01 m); ξ = porosidad del producto; ε_v = fracción de la bandeja que queda vacía determinada experimentalmente ($\varepsilon_v = 0.3$).

Where: $R_a = 283 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (constant of the ideal gases); P_a is the partial pressure of the dry air in the atmosphere; $C_{pa} = 1.012 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (specific heat of air at constant pressure), T_f is the average temperature of the air that comes out of the drying chamber; L_t is latent heat of evaporation. $T_f = T_a + 0.25(\Delta T)$, where: T_a is the average temperature of the ambient air and $T_o = 323 \text{ K}$ (collector air output temperature) (Cengel and Boles, 2011).

The average temperature of the product during drying (T_{pt}) was estimated as the weighted average of the temperatures T_o and T_a : $T_{pt} = 0.25(3T_o + T_a) = 316.5 \text{ K}$ (Aquino *et al.*, 2009). Chavez (2012) proposes that the value of the latent heat of evaporation of equation (3) can be estimated by the following expression.

$$L_t = R_g T_c T_b \ln \left(\frac{P_c}{10^5} \right) \left[\frac{(T_c - T_{pt})^{0.38}}{(T_c - T_b)^{1.38}} \right] \quad (4)$$

Where: R_g is the gas constant for water vapor ($461 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T_b is the boiling point of water (373 K); P_c is the critical water pressure (22.1 MPa); T_c is the critical water temperature (647.4 K) (Hernández, 2014).

The air flow necessary for drying the product was obtained by:

$$G = V_a / t \quad (5)$$

Where: t is the time needed to dry the mango to its equilibrium moisture, according to the experimental tests it was $t = 8 \text{ h}$.

Calculation of the drying area inside the chamber

Forson *et al.* (2007) states that the effective area for drying (A) can be calculated by:

$$A = \frac{W_w}{\rho h_l \xi (1 - \varepsilon_v)} \quad (6)$$

Where: ρ = density of the product in wet conditions, h_l = thickness of the product layer in the tray (0.01 m); ξ = porosity of the product; ε_v = fraction of the empty tray determined experimentally ($\varepsilon_v = 0.3$).

The loading density of the trays is determined by:

$$L = \rho h_l \xi (1 - \varepsilon_v) \quad (7)$$

La densidad de carga de las bandejas se determina por:

$$L = \rho h_i \xi (1 - \varepsilon_v) \quad (7)$$

Cálculo del área de captación de la energía solar incidente

El área de captación de un colector solar está relacionada con la eficiencia del sistema de secado (η_s) que viene dada por la ecuación: (Duffie y Beckman, 1980).

$$\eta_s = \frac{M_w L_t}{I_t A_c} \quad (8)$$

Donde: A_c es el área total de captación; I_t es la energía incidente sobre el secador.

Determinación de la curva de secado

Para trazar la curva de la cinética de secado de un producto es necesario medir su pérdida de su peso en intervalos fijos de tiempo. El ratio de secado se determinó con la siguiente expresión (García *et al.*, 2015; Doymaz, 2004).

$$DR = dM/dt \quad (9)$$

$$DR = (M_{t+dt} - M_t)/dt \quad (10)$$

DR arroja la curva de secado ($\text{kg}_{\text{agua}} \text{kg}_{\text{seco}}^{-1}$); ($M_{t+dt} - M_t$) es la variación de la masa del producto (kg) y dt es la variación del tiempo.

Los productos agrícolas son higroscópicos, por lo que siempre les queda un contenido de humedad residual, que para cada ambiente de almacenamiento se llama “humedad de equilibrio” (Ekechukwu, 1999).

Descripción del experimento

Primeramente se realizó una evaluación en vacío (sin producto) para probar el comportamiento termodinámico de la instalación de secado, donde se obtuvieron parámetros de desempeño termodinámico del secador. Para esta evaluación se colocaron instrumentos que se detallan a continuación.

Termopares para medir temperatura, colocados en: cámara de secado, placa adsorbadora superior, placa adsorbadora inferior, compuerta de salida del aire húmedo de la cámara al ambiente, en el producto, a la entrada del aire al colector y a la salida del aire del colector. Son termopares tipo “K” que

Calculation of the catchment area of incident solar energy

The catchment area of a solar collector is related to the efficiency of the drying system (η_s) that is given by the equation: (Duffie and Beckman, 1980).

$$\eta_s = \frac{M_w L_t}{I_t A_c} \quad (8)$$

Where: A_c is the total catchment area; I_t is the energy incident on the dryer.

Determination of the drying curve

To trace the curve of the drying kinetics of a product it is necessary to measure its loss of weight at fixed intervals of time. The drying ratio was determined with the following expression (García *et al.*, 2015; Doymaz, 2004).

$$DR = dM/dt \quad (9)$$

$$DR = (M_{t+dt} - M_t)/dt \quad (10)$$

DR shows the drying curve ($\text{kg}_{\text{agua}} \text{kg}_{\text{seco}}^{-1}$); ($M_{t+dt} - M_t$) is the variation of the mass of the product (kg) and dt is the variation of time.

Agricultural products are hygroscopic, so they always have a residual moisture content, which for each storage environment is called “equilibrium moisture” (Ekechukwu, 1999).

Description of the experiment

First a vacuum evaluation was carried out (without product) to test the thermodynamic behavior of the drying installation, where thermodynamic performance parameters of the dryer were obtained. For this evaluation, instruments that are detailed below were placed.

Thermocouples for measuring temperature, placed in: drying chamber, upper adsorber plate, lower adsorber plate, damp air outlet door of the chamber to the environment, in the product, to the air inlet to the collector and to the collector air outlet. They are “K” type thermocouples that are connected to a STEREN multimeter hook type MUL - 100 (with range up to 750 °C). Relative humidity sensor, in the drying chamber, brand HANNA HI-6838.

conectados a un Multímetro STEREN tipo gancho modelo MUL - 100 (con rango hasta de 750 °C). Sensor de humedad relativa, en la cámara de secado, marca HANNA HI-6838.

Para la experimentación con carga (con producto), se realizó primeramente una pre-preparación del mango, consistente en lavado, pelado y cortado en lascas de 0.01 m de espesor, estas fueron sumergidas a una solución de ácido cítrico 2% para evitar la oxidación, así quedo listo para ponerlo en una sola capa en las bandejas del secador. Estas fueron construidas con el fondo de tela metálica. Se dejaron escurrir por media hora antes de colocarlo en el interior del secador. Una vez situado todo el mango dentro del secador todo el mango se comenzó a registrar la pérdida de peso de una muestra de 21.2 g de mango con una balanza electrónica American Weigh. Para el procesamiento de datos se utilizó una computadora personal.

Resultados y discusión

En el Cuadro 1 se muestran los resultados de los cálculos del diseño del secador solar, según metodología descrita en el apartado anterior. Esta es fundamentalmente para el cálculo del área de captación solar y del área efectiva de secado, las cuales ayudan a obtener las bases del dimensionado del secador y poder hacer las consideraciones de diseño necesarias para la propuesta final del secador solar.

El flujo de aire necesario para el secado del mango fue $G=0.042 \text{ kg s}^{-1}$ y la densidad de carga de producto por bandeja de $L=6.61 \text{ kg prod. m}^{-2}$, estas son cantidades que están en los rangos propuestos por Forson *et al.* (2007) y Zuluaga *et al.* (2010). Se plantea que debe estar $G=0.02$ a 0.9 kg s^{-1} y la densidad de carga por bandeja entre los valores de 5 a $18 \text{ kg prod. m}^{-2}$. Buitrago (2014) en su trabajo determino que el flujo de aire para el secado del mango es de $G=0.0115 \text{ kg s}^{-1}$, cantidad algo inferior a los resultados de esta investigación debido a que la temperatura del aire es mayor y en cuanto a la densidad de carga por bandeja de $5.5 \text{ kg prod. m}^{-2}$, cantidad muy similar a este artículo.

Consideraciones de diseño del secador solar

Con los resultados de los cálculos de diseño se selecciona el tipo de secador y se decide hacer un secador con dos colectores uno de convección natural (primario) en la parte inferior y otro de convección forzada (secundario) en la parte superior o techo del secador. Esta configuración es para darle

For the experimentation with loading (with product), a pre-preparation of the mango was carried out, consisting of washing, peeling and cutting in 0.01 m thick flakes, these were submerged in a 2% citric acid solution to avoid oxidation, so I'm ready to put it in a single layer in the dryer trays. These were built with the wire mesh background. They were allowed to drain for half an hour before placing it inside the dryer. Once the entire handle was placed inside the dryer the entire mango began recording the weight loss of a 21.2 g sample of mango with an American Weigh electronic scale. For the processing of data a personal computer was used.

Results and discussion

In the Table 1 shows the results of the solar dryer design calculations, according to the methodology described in the previous section. This is fundamentally for the calculation of the solar collection area and the effective drying area, which help to obtain the bases of the dimensioning of the dryer and to be able to make the necessary design considerations for the final proposal of the solar dryer.

The air flow needed to dry the handle was $G=0.042 \text{ kg s}^{-1}$ and the product loading density per tray of $L=6.61 \text{ kg prod. m}^{-2}$, these are amounts that are in the ranges proposed by Forson *et al.* (2007) and Zuluaga *et al.* (2010). Plate that should be $G=0.02$ to 0.9 kg s^{-1} and the loading density per tray between the values of 5 to $18 \text{ kg prod. m}^{-2}$. Buitrago (2014) in his work determined that the air flow for the drying of the control is $G=0.0115 \text{ kg s}^{-1}$, something somewhat lower than the results of this investigation because the air temperature is higher and as for the loading density per tray of $5.5 \text{ kg prod. m}^{-2}$, a quantity very similar to this article.

Design considerations of the solar dryer

With the results of the design calculations the type of dryer is selected and it is decided to make a dryer with two collectors one of natural convection (primary) in the lower part and one convection blanket (secondary) in the top or ceiling of the dryer. This configuration is to give you more flexibility in its operation, since this way you can work the dryer only by natural convection in places where electrical power is lacking in the network just by leaving open the compound ones (6) and in case if there is electrical energy, the dryer can use the two collectors to heat the air and only the composite ones open (6) when the air in the chamber is saturated.

más flexibilidad en su funcionamiento, ya que así puede trabajar el secador solo por convección natural en lugares donde se carezca de energía eléctrica de la red con tan solo dejar abiertas las compuertas (6) y en el caso de que si haya energía eléctrica puede el secador usar los dos colectores para el calentamiento del aire y solo se abren las compuertas (6) cuando el aire de la cámara este saturado.

In addition, this secondary collector in the ceiling of the dryer substantially reduces heat losses through the roof, where they are usually significant, even in the case that forced air does not circulate through this, also contribute to increase the thermal efficiency of the dryer as it would heat its absorber sheet and transmit that heat by natural convection to the drying chamber and thus constitutes a thermal barrier.

Cuadro 1. Resultados del cálculo de diseño.

Table 1. Design calculation results.

Parámetros	Ecuación matemática	Resultados
Aumento de la temperatura del aire al pasar por el colector	$\Delta T = 2\beta(T_b - T_c) (I_t/I_o)$	$\Delta T = 18.72 \text{ }^\circ\text{C}$
Humedad a retirar de los 100 kg de mango	$M_w = \frac{W_w (M_{fwb} - M_{fwb})}{(1 - M_{fwb})}$	$M_w = 77.27 \text{ kg de agua}$
Volumen total de aire necesario	$V_a = \frac{M_w L_t R_a T_a}{C_{pa} P_a (T_o - T_f)}$	$V_a = 6086 \text{ m}^3$
Temperatura del aire de salida de la cámara	$T_f = T_a + 0.25(\Delta T)$	$T_o - T_f = 18.32 \text{ K}$
Temperatura del producto	$T_{pt} = 0.25 (3T_o + T_a)$	$T_{pt} = 44.25 \text{ }^\circ\text{C}$
Calor latente de vaporización	$L_t = R_g T_c T_b \ln \left(\frac{P_c}{10^5} \right) \left[\frac{(T_c - T_{pt})^{0.38}}{(T_c - T_b)} \right]$	$L_t = 2.73 \text{ MJ kg}^{-1}$
Flujo de aire	$G = V_a/t$	$G = 0.042 \text{ kg s}^{-1}$
Área de secado	$A = \frac{W_w}{\rho h_l \xi (1 - \epsilon_v)}$	$A = 15.12 \text{ m}^2$
Densidad de carga de las bandejas	$L = \rho h_l \xi (1 - \epsilon_v)$	$L = 6.61 \text{ kg prod. m}^{-2}$
Área de captación Solar	$\eta_s = \frac{M_w L_t}{I_t A_c}$	$A_c = 5.8 \text{ m}^2$

Además ese colector secundario en el techo del secador disminuye sustancialmente las pérdidas de calor por el techo, lugar donde suelen ser significativas; incluso en el caso que no circulara aire forzadamente por este, también contribuiría a aumentar la eficiencia térmica del secador ya que se calentaría su lámina absorbidora y transmitiría ese calor por convección natural a la cámara de secado y así constituye una barrera térmica.

De acuerdo al resultado del área de captación ($A_c = 5.8 \text{ m}^2$), se decide hacer un secador con 1.5 m de ancho, con esta medida de partida se distribuyeron las áreas entre los dos

According to the result of the catchment area ($A_c = 5.8 \text{ m}^2$), it was decided to make a dryer with 1.5 m width, with this starting measure the areas between the two collectors were distributed. Taking into account that the heat transfer in forced fluids is more intense than in convective fluids, an area greater than 3.6 m^2 ($2.4 * 1.5 \text{ m}$) was assigned to the secondary collector and to the primary collector 1.25 m^2 ($1.5 * 1.5 \text{ m}$).

Between both they add 5.85 m^2 of collection area, which represents 8.6% greater than the calculated catchment area, which is assumed as security rank. Respecting that the dryer

colectores. Tenido en cuenta que la transferencia de calor en fluidos forzados es más intensa que en fluidos convectivos se asignó un área mayor de 3.6 m^2 ($2.4 \times 1.5 \text{ m}$) al colector secundario y al colector primario 1.25 m^2 ($1.5 \times 1.5 \text{ m}$).

Entre ambos suman 5.85 m^2 de área colección, que representa 8.6% mayor al área de captación calculada, que se asume como rango de seguridad. Respetando que el secador tiene una anchura de 1.5 m y que el área efectiva de secado es de $A = 15.12 \text{ m}^2$, las dimensiones de la cámara serán $1.5 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ y de altura 1 m por el frente y 1.65 m por la parte posterior. Esto garantiza la inclinación del colector secundario (techo del secador) de 18° , lo que da un volumen aproximado de la cámara de secado de 3.8 m^3 . Con estas dimensiones se podrán acomodar 12 bandejas de 1.26 m^2 cada una, con dimensiones de $0.9 \times 1.4 \text{ m}$, dispuestas en dos filas de 6, separadas 0.1 m entre ellas. Las dimensiones generales se presentan en la Figura 1.

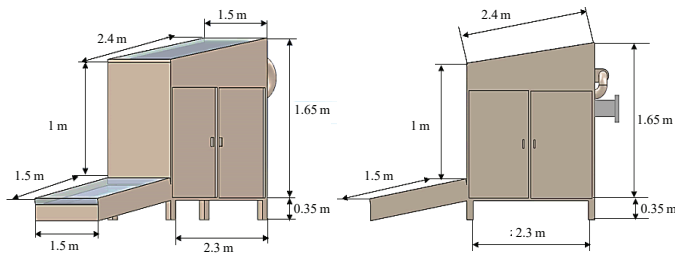


Figura 1. Principales dimensiones del secador solar.
Figure 1. Main dimensions of the solar dryer.

Para garantizar su transportación y ensamblaje del secador solar de mango se construye de tal manera que las partes puedan ser acopladas fácilmente por medio de tornillos. Las partes ensamblables son los dos colectores, la cámara se forma al atornillar las paredes a un marco, las puertas se ensamblan por la bisagras. Una vez formado de esta manera se introducen las guías para bandejas o portabandejas ensamblado previamente por tornillos también Figura 2.

Para garantizar la separación del piso y la inclinación adecuada del colector primario, se dispone de una base en la parte inferior de la cámara con una altura de 0.35 m. Para permitir el acceso adecuado al interior de la cámara de secado, se diseñan dos puertas laterales en forma de dos hojas.

has a width of 1.5 m and that the effective drying area is $A = 15.12 \text{ m}^2$, the dimensions of the chamber will be $1.5 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ and height 1 m on the front and 1.65 m on the back. This guarantees the inclination of the secondary collector (ceiling of the dryer) of 18° , which gives an approximate volume of the drying chamber of 3.8 m^3 . With these dimensions it will be possible to accommodate 12 trays of 1.26 m^2 each, with dimensions of $0.9 \times 1.4 \text{ m}$, arranged in two rows of 6, separated 0.1 m between them. The general dimensions are presented in Figure 1.

To ensure its transportation and assembly of the mango solar dryer is built in such a way that the parts can be coupled by means of screws. The assembled parts are the two collectors, the chamber is formed by screwing the walls to a frame, the doors are assembled by the hinges. Once formed in this way, the guides for trays or tray carriers previously assembled by screws are introduced. Figure 2.



Figura 2. Fotos del secador solar.
Figure 2. Photos of the solar dryer.

To guarantee the separation of the floor and the appropriate inclination of the primary collector, a base is available in the lower part of the chamber with a height of 0.35 m. To allow access to the interior of the drying chamber, two side doors are designed in the form of two sheets.

Description of the dryer

In the Figure 3 shows a diagram of a side cut of the solar dryer. It is composed of the primary (1) and secondary (9) collector and the drying chamber (4). It also has an axial fan (7) on the back, which has the function of recirculating the air forcedly through the secondary collector and the drying chamber. The primary collector is in the lower part where the ambient air passes through it under a thermosyphonic regime. Solar energy for through the covers of both collectors (3) and (8).

Descripción del secador

En la Figura 3 se muestra un esquema de un corte lateral del secador solar. Está compuesto por el colector primario (1) y secundario (9) y la cámara de secado (4). También cuenta con un ventilador axial (7) en la parte posterior, que tiene como función la recirculación del aire de forma forzada a través del colector secundario y la cámara de secado. El colector primario se encuentra en la parte inferior donde el aire del ambiente pasa por él a régimen termosifónico. La energía solar para a través de las cubiertas de ambos colectores (3) y (8).

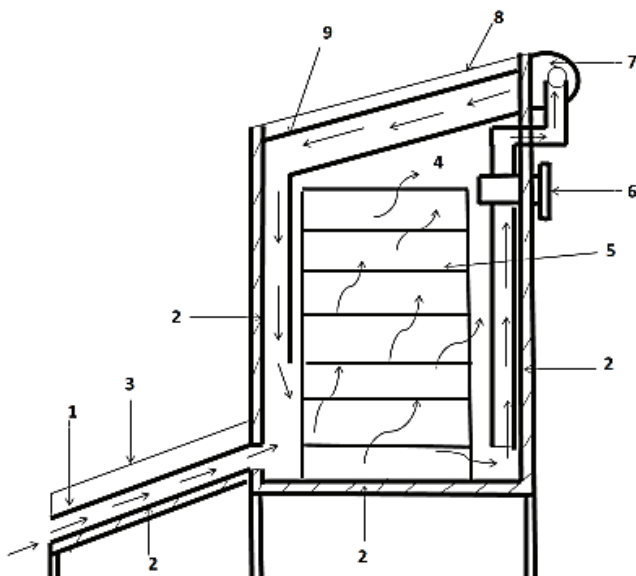


Figura 3. Corte lateral del secador solar.
Figure 3. Side cut of the solar dryer.

En la parte posterior se encuentran dos aberturas (6) para la renovación desde la cámara del aire saturado y entrada de aire ambiente con diámetro de 0.1 m, hechas de tubos de PVC de 4", con sus tapones. El producto se coloca en las bandejas (5). Todo el cuerpo de los colectores y de la cámara de secado está hecho de paneles multimuro aislados (2). Con flechas se describe el movimiento del aire dentro del secador.

En la Figura 4 se presenta los resultados de la evaluación en vacío del secador, se observa la variación de la radiación solar en el tiempo con un valor máximo de radiación de 910 $W m^{-2}$, entre la 13:00 a las 14:00 h. El promedio de radiación solar en las horas de más incidencia solar (10:00 y las 16:00 h) es de 500 $W m^{-2}$, siendo este un valor muy bueno propio de la época de primavera en la cual se realizó la investigación (21 de abril, día soleado de escasas nubes).

In the back part there are two openings (6) for the renewal from the saturated air chamber and ambient air inlet with diameter of 0.1 m, made of 4" PVC pipes, with their plugs. The product is placed in the trays (5). The entire body of the collectors and the drying chamber is made of insulated multimide panels (2). The movement of the air inside the dryer is described with arrows.

In the Figure 4 shows the results of the vacuum evaluation of the dryer, the variation of solar radiation over time is observed with a maximum radiation value of 910 $W m^{-2}$, between 1:00 pm to 2:00 pm. The average solar radiation in the hours with the highest solar incidence (10:00 and 16:00 h) is 500 $W m^{-2}$, this being a very good value from the spring season in which the research was carried out (April 21, sunny day with few clouds).

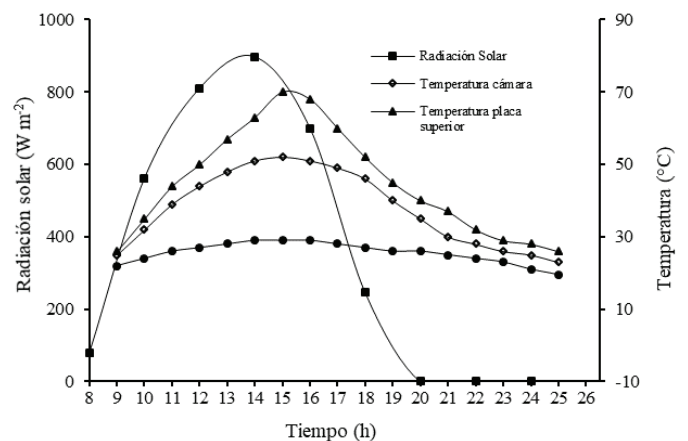


Figura 4. Resultados de la evaluación en vacío del secador.
Figure 4. Results of the vacuum evaluation of the dryer.

The variation of the temperatures of the ambient air, of the air in the drying chamber and of an average of the two absorber plates of the two collectors are also appreciated. The temperature of the air (drying agent) increases during the day to the same extent that solar radiation increases. The average room temperature was 25 $^{\circ}C$ and in the drying chamber it reached 52 $^{\circ}C$. This increase of 27 $^{\circ}C$ is very appropriate for this type of installation and suitable for the process of drying the handle. The upper absorber plate reaches maximum temperatures of 70 $^{\circ}C$ in the hours of highest radiation, this indicates that there are few heat losses in the solar collectors, a good hermeticity and a suitable design, since it is a high temperature for the spring time. These values are similar to those of Iglesias *et al.* (2011).

También se aprecia la variación de las temperaturas del aire ambiente, del aire en la cámara de secado y de un promedio de las dos placas absorbedoras de los dos colectores. La temperatura del aire (agente secante) va aumentando durante el día en la misma medida que se incrementa la radiación solar. La temperatura ambiente promedio fue de 25 °C y en la cámara de secado este alcanzó los 52 °C. Este incremento de 27 °C es muy apropiado para este tipo de instalación e idóneo para el proceso de secado del mango. La placa absorbedora superior alcanza temperaturas máximas de 70 °C en las horas de mayor radiación, esto indica que existen pocas pérdidas de calor en los colectores solares, una buena hermeticidad y un diseño adecuado, ya que es una temperatura elevada para la época de primavera. Valores similares a los de Iglesias *et al.* (2011).

En la Figura 5 se presenta la variación de la humedad relativa del aire ambiente y dentro de la cámara de secado en función del tiempo. Esta desciende desde 52% hasta un mínimo de 1.5% (sin carga) en horas del mediodía, de acuerdo a la variación de la radiación incidente. Se obtiene un valor promedio de 5.5% entre las 10:00 y las 16:00 h, valor muy apropiado para secado de productos agrícolas, ya que este aire exhibe una gran avidéz por la humedad de dicho producto.

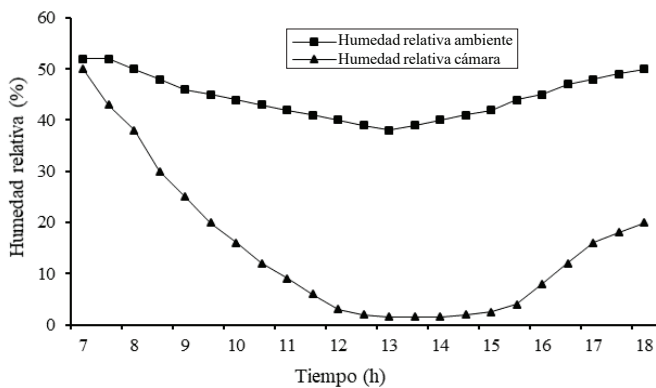


Figura 5. Variación de la humedad relativa del aire en la cámara de secado y del ambiente.
Figure 5. Variation of the relative humidity of the air in the drying chamber and the environment.

En la Figura 6 se muestra la variación del peso de una muestra de 21.2 g de mango Ataulfo el día de la experimentación. El peso comienza a disminuir de forma paulatina. A partir de las 14:00 h las disminuciones son más pequeñas, hasta que a las 17:00 h se alcanza la humedad de equilibrio y el peso se mantiene constante.

In the Figure 5 shows the variation of the relative humidity of the ambient air and inside the drying chamber as a function of time. This drops from 52% to a minimum of 1.5% (no load) at noon, according to the variation of the incident radiation. An average value of 5.5% is obtained between 10:00 and 16:00 h, a very appropriate value for drying agricultural products, since this air exhibits a great avidity for the humidity of said product.

In the Figure 6 shows the variation of the weight of a sample of 21.2 g of Ataulfo mango on the day of experimentation. The weight begins to decrease gradually. As of 2:00 pm, the decreases are smaller, until at 5:00 pm equilibrium humidity is reached and the weight remains constant.

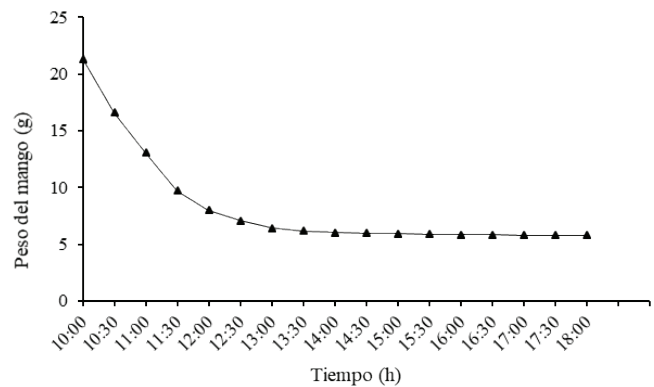


Figura 6. Variación del peso de la muestra del mango Ataulfo.
Figure 6. Variation of the weight of the Ataulfo mango sample.

In the Figure 7 shows the variation of mango moisture, from its initial humidity of 80% to 8%, which is 1.6% below its equilibrium humidity, according to Buitrago (2014).

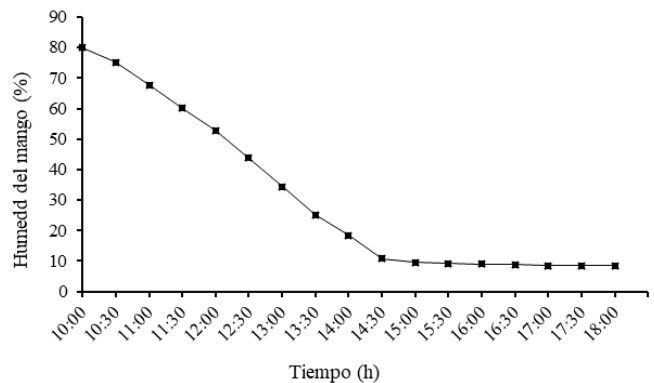


Figura 7. Variación del por ciento de humedad del mango Ataulfo.
Figure 7. Variation of humidity percent of Ataulfo mango.

En la Figura 7 se muestra la variación de la humedad del mango, desde su humedad inicial del 80% hasta 8%, que es 1.6% por debajo de su humedad de equilibrio, según Buitrago (2014).

Como se observa en la Figura 6 y 7 las curvas tiene un comportamiento muy similar a la curva ya que el producto (mango) al irse deshidratando va perdiendo agua (humedad) y por ende peso. Ya que en eso consiste el proceso de secado, en la extracción del agua de un producto que constituye parte de su masa.

Una típica curva de secado se obtiene al representar el contenido de humedad libre (X) (kg de agua/kg de sólido seco) frente al tiempo de secado como se muestra en la Figura 8. En la ecuación (13) se expone la forma de calcular esta humedad libre (Aviara *et al.*, 2002).

$$X = X_t - X_{eq} \quad (11)$$

Donde: X_t es la humedad que se va registrando en el tiempo y X_{eq} es la humedad de equilibrio.

Conclusiones

Se diseñó, construyó y evaluó un prototipo de secador solar, en el cual se llevaron a cabo los ensayos del deshidratado del mango Aaulfo.

Se deshidrataron 100 kg de lascas de mango en un secador con 5.8 m² de área de captación. El área de secado en la cámara es 15.12 m² repartidos en 12 bandejas, en cada una se colocaron 8.33 kg de mango, esta cantidad de lascas de mango corresponden a 190 kg mango fresco ya que el resto lo constituye cascara y semilla. Al mango se disminuyó la humedad inicial de 80% a una humedad final de 8.4%, 1.6% inferior a la humedad de equilibrio reportada por Ocampo (2006) de 10%.

Para el deshidratado solar se emplearon 8 h sol, obteniéndose un mango seco con muy buenas características organolépticas, las cuales rebasan los objetivos de este artículo.

Este tipo de diseño de secador solar es muy flexible en su funcionamiento, ya que puede trabajar de forma autónoma sin suministro de energía eléctrica en caso de ser necesario,

As shown in Figures 6 and 7, the curves behave very similar to the curve because the product (mango) when dehydrating is losing water (moisture) and therefore weight. Since that is the process of drying, in the extraction of water from a product that is part of its mass.

A typical drying curve is obtained by plotting the free moisture content (X) (kg of water/kg of dry solids) versus the drying time as shown in Figure 8. In equation (13) the form is exposed to calculate this free moisture (Aviara *et al.*, 2002).

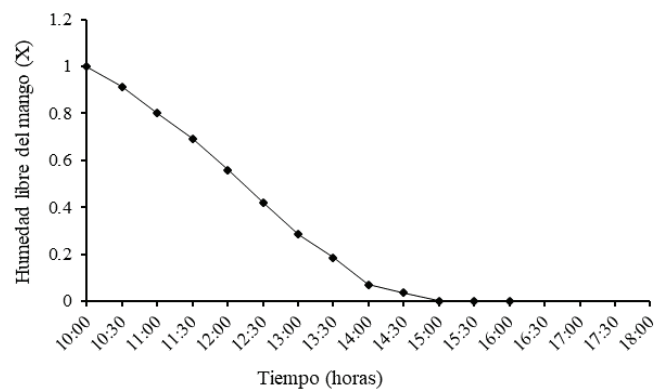


Figura 8. Variación de la humedad libre del mango Aaulfo.
Figure 8. Variation of the free humidity of the Aaulfo mango.

$$X = X_t - X_{eq} \quad (11)$$

Where: X_t is the humidity that is registered in time and X_{eq} is the equilibrium humidity.

Conclusions

A solar dryer prototype was designed, built and evaluated, in which the Aaulfo mango dehydration tests were carried out.

The 100 kg of mango flakes were dehydrated in a dryer with 5.8 m² of catchment area. The drying area in the chamber is 15.12 m² distributed in 12 trays, in each one 8.33 kg of mango was placed, this amount of mango flakes corresponds to 190 kg fresh mango since the rest is shell and seed. The mango was reduced the initial humidity of 80% to a final humidity of 8.4%, 1.6% lower equilibrium moisture reported by Ocampo (2006) of 10%.

con tan solo abrir los conductos (6). La novedad de combinar en una misma instalación dos tipos de colectores uno de circulación natural y otro de circulación forzada ofrece mucha versatilidad y flexibilidad en su operación como deshidratador de productos agrícolas.

Estos resultados indican que ese secador es una solución real para aprovechar el mango Ataulfo que se pierde en la zona del Soconusco por sobreproducción o falta de calidad exportable y ofrece una opción de comercializar el mango como producto seco en el mercado nacional; además ofrece una solución al problema abordado en este artículo. Al mismo tiempo ayuda a la economía de las familias productoras de mango y al desarrollo económico de la región, ofreciendo además posibilidades de empleo.

Estos resultados son válidos únicamente para el producto mango Ataulfo cosechado en la zona del Soconusco estado de Chiapas, México, en las condiciones expuestas aquí.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por su apoyo otorgado a través de los proyectos “energía termosolar y eólica” para impulsar el desarrollo de poblaciones rurales (FORDECYT - 174532) y al proyecto ‘estación de pruebas de sistemas energéticos renovables e implementación en comunidades de alta marginación en Chiapas’ (CONACYT - 152941).

Literatura citada

- Aquino, L.; Rodríguez, J.; Méndez, L. y Sandoval, S. 2009. Evaluación de programas de secado para madera de chalamite (*Pinus pseudostrobus*). *Rev. Madera y Bosques*. 16(2):35-46.
- Aviara, N. A.; Ajibola O. y Dairo, U. 2002. *Termodinámica de las curvas de sorción en semilla de sésamo*. 4^{ta} (Ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores. SA. de CV. México. 15 p.
- Buitrago, C. A. 2014. Estudio preliminar para deshidratación solar de mango (*Mangifera Indica* L. var. Comun) en Colombia. Tesis de licenciatura en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá, Colombia. 107 p.
- Cengel, Y. y Boles, M. A. 2011. *Termodinámica*. 2^{da} edición. Tomo I y II. Séptima edición. McGraw-Hill Interamericana Editores. SA. de CV. México, D. F. 982 p.
- Chávez, J. 2012. *Calculo del calor latente*. Termodinámica experimental. Bogotá, Colombia. 1-7 pp.

For solar dehydration, 8 h of sun was used, obtaining a dry magician with very good organoleptic characteristics, which exceed the objectives of this article.

This type of solar dryer design is very flexible in its operation, since it can work autonomously without supplying electrical power if necessary, just by opening the ducts (6). The novelty of combining in the same installation two types of collectors one of natural circulation and another of forced circulation offers a lot of versatility and flexibility in its operation as a dehydrator of agricultural products.

These results indicate that this dryer is a real solution to take advantage of the Ataulfo mango that is lost in the area of Soconusco due to overproduction or lack of exportable quality and offers an option to market mango as a dry product in the national market; it also offers a solution to the problem addressed in this article. At the same time, it helps the economy of the command-producing families and the economic development of the region, also offering employment opportunities.

These results are valid only for the Ataulfo mango product harvested in the Soconusco area in the state of Chiapas, Mexico, under the conditions set forth herein.

End of the English version



- Corp, L. S. 1998. *Diseño de secadores solares*. Instituto Superior Politécnico José A. Echevarría (ISPJAE). Grupo de energías renovables. Cuba energía. La Habana, Cuba. 6 p.
- Doymaz, I. 2004. Cinética de secado de la morera blanca. *Rev. J. Food Eng.* 61:341-346.
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A. 1980. *Procesos térmicos de la ingeniería solar*. 2^{da} edición. Editorial John Wiley & Sons, Interscience. EUA. 165 p.
- Ekechukwu, O. V. 1999. *Estudios de sistemas de secado solar y principios y teorías del secado*. 6^{ta} (Ed.). Convention of Energy. 40 p.
- Forson, F. K.; Nazhab, A.; Akuffoa, F. and Rajakarunab, H. 2007. Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *J. Renewable Energy*. 32:2306-2319.
- García, M.; Alvis, A. y García, C. 2015. Modelado de la cinética de secado de mango pre-tratadas con deshidratación osmótica y microondas. *Rev. Biotecnol. Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 13(2):22-29.
- González, K. D.; Daza, D.; Caballero, P. A. y Martínez, C. 2015. Valuación de las propiedades físicas y químicas de residuos sólidos orgánicos a emplearse en la elaboración de papel. *Rev. Luna Azul*. 43:499-517.

- Hematian, A.; Ajabshirchi, Y. and Bakhtiari, A. A. 2012. Experimental analysis of flat plate solar air collector efficiency. *Indian J. Sci. Technol.* University of Tabriz, Iran: 5(8):3183-3187.
- Hernández, G. 2014. Presión de vapor y entalpía de vaporización del agua. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)-Facultad de Química. 21 p.
- Iglesias, R.; Pantoja, J.; Moreira, J.; Farrera, N. y Ibáñez, G. 2011. Diseño de un secador solar con circulación forzada. *Rev. Lacandonia.* 5(11):79-88.
- Ocampo, A. 2006. Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista EIA.* Colombia. 5:119-128.
- Ramírez, R.; Quijada, O.; Castellano, G.; Burgos, M. E.; Camacho, R. y Marin, C. 2010. Características físicas y químicas de frutos de trece cultivares de mango en el municipio Mara en la planicie de Maracaibo. *Rev. Iberoam. Technol. Postcosecha.* 10(2):65-72.
- Saravia, L.; Saravia, D. y Sánchez, B. 2008. El diseño de secadores solares usando las curvas de secado del producto. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Argentina.* 11:201-207.
- Zuluaga, J.; Cortes M. y Rodríguez E. 2010. Evaluación de las características físicas de mango deshidratado aplicando secado por aire caliente y deshidratación osmótica. *Rev. Facultad de Ingeniería UCV.* 25(4):127-135.