

Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero*

Thermal and financial evaluation of the drying process of coffee bean in a active solar dryer type greenhouse

Juan Quintanar Olguin^{1§} y Refugio Roa Durán¹

¹Campo Experimental San Martinito, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera Federal México-Puebla, km 56.5, San Martinito, Tlahuapan, Puebla. CP. 74100. [§]Autor para correspondencia: quintanar.juan@inifap.gob.mx.

Resumen

La forma más común de realizar el proceso de secado para obtener café pergamino seco a partir de café cereza, es exponiéndolo a los rayos solares de manera directa y a la intemperie, donde la calidad final no siempre es óptima. Una alternativa para mejorar el proceso ha sido el aprovechamiento de la energía solar mediante el uso de secadores solares. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero. El estudio se realizó durante el año 2014, en un secador solar tipo invernadero con colector integrado formando parte de la estructura, con circulación de aire forzada. El grano fue puesto en charolas hechas con bastidor de madera y malla sombra 80% con dimensiones de 0.3*0.85 m, que sirvieron como camas de secado. La proporción de grano fue de 19.5 kg m⁻². En 44 h de sol (5 días), se obtuvo un porcentaje de humedad del café pergamino de 11%. La eficiencia térmica del secador solar fue de 12%. Los resultados del flujo de efectivo descontado es positivo y la recuperación de la inversión se logra durante un periodo de cosecha (aproximadamente tres meses), que representa una alta viabilidad de uso de esta tecnología a nivel de pequeños productores.

Abstract

The most common way to perform the drying process for dry parchment coffee from coffee cherries, is exposing the product to sunlight directly and weathering, where the final quality is not always optimal. An alternative to improve the process has been the use of solar energy through the use of solar dryers. The aim of this study was to evaluate the thermal and financial efficiency of the drying process of grain coffee washing in an active solar dryer type greenhouse. The study was conducted during the 2014 coffee harvest in a solar dryer type greenhouse with integrated collector part of the structure with forced air circulation. The grain was placed in trays made with wooden frame and 80% shade cloth with dimensions of 0.3*0.85 m, which served as drying beds. The grain proportion was 19.5 kg m⁻². In 44 hours of sunshine (5 days on average), a moisture content of parchment coffee of 11% was obtained. The thermal efficiency of the solar dryer was to 12%. The discounted cash flow results are positive and the recovery of the investment is achieved during a harvest period (approximately three months), which represents a high viability of use of this technology at the level of small producers.

* Recibido: enero de 2017
Aceptado: marzo de 2017

Palabras clave: contenido humedad, periodo recuperación, rentabilidad, tiempo de secado.

Introducción

En México, el café es uno de los cultivos de mayor extensión e importancia económica, ya que se mantiene entre los cinco productos de exportación más importantes. Las zonas de producción se concentran en 12 estados, principalmente en pequeñas unidades de producción de las áreas montañosas, siendo los estados de Oaxaca, Chiapas, Veracruz y Puebla, los que aportan más de 80% de la producción nacional.

Al proceso industrial para la transformación del café cereza a pergamino, se le denomina beneficio y comprende las etapas de: clasificación, lavado, despulpado, remoción de mucílago y secado. De estas etapas, el secado es fundamental, ya que tiene como finalidad disminuir el contenido de humedad del café lavado (48 a 56% en base húmeda) a un rango que oscile entre 10% y 12% de humedad.

El proceso tradicional de secado del grano de café en las regiones cafetaleras del país, es al aire libre sobre planillas de concreto (asoliaderos), donde se exponen los granos húmedos directamente a los rayos del sol, durante nueve a doce días aproximadamente, removiendo el grano periódicamente hasta alcanzar un contenido de humedad de 12% en promedio. El sistema de secado es simple, pero existen limitantes que reducen la calidad del mismo; como lo son las lluvias repentinas, el polvo, la basura y los animales; también se debe guardar o cubrir el café por las noches para evitar que vuelva a absorber la humedad ambiental y la imposibilidad de secar alto volumen de café.

Una de las alternativas de solución, es realizar el proceso de secado del grano de café en el interior de un secador solar, con lo cual; se obtendrá mayor oportunidad de comercializar el café con menor cantidad de defectos (mancha), con mayor inocuidad y una mejor calidad sensorial, acercándose al concepto de café orgánico, donde se cumplen requisitos específicos en la etapa de secado tales como: el aprovechamiento máximo de la energía del sol, evitar el contacto del grano con el suelo (CERTIMEX, 2009). Además, solo se permite el plástico elaborados de polietileno o polipropileno con fines de protección siempre y cuando el café no entre en contacto directo con el plástico (Paswan y Mohit, 2010). Además, el uso de secadores solares

Keywords: drying time, moisture content, profitability, recovery period,

Introduction

In Mexico, coffee is one of the crops of greater extension and economic importance, since it is among the five most important export products. The production areas are concentrated in 12 states, mainly in small production units in mountain areas, where the states of Oaxaca, Chiapas, Veracruz and Puebla, contributing more than 80% of national production.

The industrial process for the transformation of coffee cherry to parchment, it is called profit and comprises the steps of: sorting, washing, pulped, mucilage removal and drying. Of you are stages, drying is critical because it is intended to reduce the moisture content of washed coffee (48-56% wet basis) to a range ranging between 10% and 12% humidity.

The traditional process of drying coffee beans in the coffee regions of the country, is outdoors on sheets of concrete (asoliaderos), where the moist grains are directly exposed to sunlight for nine to about twelve days returning The grain periodically until reaching a moisture content of 12% on average. The drying system is simple, but there are limitations that reduce the quality of the same; such as sudden rains, dust, garbage and animals; you should also store or cover the coffee at night to avoid re-absorbing moisture and the inability to dry high volume of coffee.

One of the solution alternatives is to perform the drying process of the coffee bean inside a solar dryer, whereby; greater opportunity to market coffee with fewer defects (stain), more safety and better sensory quality, approaching the concept of organic coffee, where specific requirements are met in the drying step such is obtained maximum use of: the energy of the sun, avoid contact of the grain with the soil (CERTIMEX, 2009). In addition, only plastic made of polyethylene or polypropylene protection purposes always allowed and when the coffee does not come into direct contact with plastic (Paswan and Mohit, 2010). In addition, the use of solar dryers for drying parchment coffee responds to a trend in the development of sustainable technologies, designed to protect the grain from adverse weather conditions and a dry grain quality.

para el secado de café pergamino responde a una tendencia en el desarrollo de tecnologías sustentables, que permitan proteger al grano de las condiciones climatológicas adversas y obtener un grano seco de calidad.

El funcionamiento de los secadores solares está basado en el principio invernadero, donde la energía solar es atrapada mediante colectores que elevan la temperatura del fluido (aire), el cual realiza el proceso de secado, por lo que, la eficiencia de un sistema de secado habitualmente se expresa a través de diferentes parámetros tales como: eficiencia del secador, eficiencia del captador solar, tasa de extracción de humedad específica, capacidad evaporativa, entre otros.

La evaluación del desempeño térmico en aplicaciones de secado solar se considera un medio para evaluar como opera un secador solar bajo ciertas condiciones y se define como la relación entre la cantidad de energía destinada al secado y la cantidad de agua evaporada durante el proceso. Por lo tanto, la eficiencia térmica total es la relación de la ganancia de calor útil a la energía solar disponible en el interior del secador solar (Almuhanna, 2012). Así, la eficiencia de un secador solar es una medida de la eficacia con que se utiliza la radiación solar por el sistema para secar el producto y evalúa su rendimiento (Keke *et al.*, 2014 y Mustapha *et al.*, 2014). Esto es, la energía necesaria para evaporar el agua del grano (kJ h^{-1}) dividido por la entrada de energía al secador y se expresa en porcentaje (Parra-Coronado *et al.*, 2008; Chavan *et al.*, 2011). Valores habituales de este parámetro se encuentran en el rango 10 - 50%, dependiendo del modo de funcionamiento y del tipo de secador (Tiwaria *et al.*, 2013, Zakaria, 2013).

En relación a la evaluación de la rentabilidad de un secador solar respecto de un secador que utilice energía fósil, se requiere que las comparaciones se realicen bajo condiciones de uso comercial. Tal comparación proporciona el costo de secado unitario y por supuesto, la diferencia de costos de cada método. Así, la inversión inicial en un secador solar es menor o a lo sumo, igual a un secador convencional del mismo volumen, por lo que la diferenciación está en los costos de la energía para realizar el proceso de secado, con tiempos menores de amortización (Sreekumar, 2013). De acuerdo con Ferro *et al.* (2000), para los cálculos económicos de comparación entre secadores solares se pueden utilizar los siguientes elementos de costo.

Costos directos. Materias primas, mano de obra de operación y supervisión y mano de obra de oficina.

The operation of solar driers is based on the greenhouse principle, where solar energy is trapped by manifolds which raise the temperature of the fluid (air), which performs the drying process, so that the efficiency of a drying system usually expressed by different parameters such as efficiency of the dryer, the solar collector efficiency, extraction rate specific humidity, evaporative capacity, among others.

The thermal performance evaluation in drying applications sun is considered a means to evaluate as it operates a dryer under solar certain conditions and is defined as the ratio of energy for drying and amount of water evaporated during the process. Therefore, the total thermal efficiency is the ratio of the gain useful heat of solar energy available inside the solar dryer (Almuhanna, 2012). Thus, an efficiency from a solar dryer it is a measure of the effectiveness with which used the radiation solar system to dry the product and evaluate your performance (Keke *et al.*, 2014 and Mustapha *et al.*, 2014). That is, the energy needed to evaporate water grain (kJ h^{-1}) divided by power input to the dryer and is expressed in percentage (Parra-Coronado *et al.*, 2008; Chavan *et al.*, 2011). Typical values of this parameter are in the range 10-50% depending on the operating mode and the type of dryer (Tiwaria *et al.*, 2013, Zakaria, 2013).

In relation to the evaluation of the profitability of a solar dryer with respect to a dryer that uses fossil energy, the comparisons are required to be carried out under conditions of commercial use. Such a comparison provides the unit cost of drying and of course, the difference in cost of each method. Thus, the initial investment in a solar dryer is lower or at most equal to a conventional dryer of the same volume, so the differentiation is in the costs of energy to perform the drying process, with lower times of amortization (Sreekumar, 2013). According to Ferro *et al.* (2000), the following cost elements can be used for economic comparison calculations between solar dryers.

Direct costs. Raw materials, operating labor and supervision and office labor.

Costs of services. Electricity, maintenance and repairs (2-10% of fixed capital), operating supplies (10-20% of operating labor) and laboratory charges.

Indirect costs. General (payroll and plant), packing, storage, local taxes (1-2% of capital), insurance (0.4-1% of capital). Furthermore, Boonyasri *et al.* (2011) recommend as the basis

Costos de los servicios. Electricidad, mantenimiento y reparaciones (2-10% del capital fijo), suministros de operación (10-20% de la mano de obra de operación) y cargos de laboratorio.

Costos indirectos. Generales (nómina y planta), empaqueo, almacenamiento, impuestos locales (1-2% del capital), seguros (0.4-1% del capital).

Por otro lado, Boonyasri *et al.* (2011) recomiendan como base de los cálculos del costo total a la suma del costo del secador, los costos de mantenimiento, el trabajo, el costo del producto a secar y la depreciación. Otra forma de obtener la factibilidad económica de un secador solar, es mediante el cálculo del ahorro obtenido al utilizar una instalación solar frente a una alternativa de secado convencional. Pero si requiere evaluar la factibilidad de un secador solar como única opción de secado, se sugiere utilizar el valor presente o flujo del efectivo descontado, que determina si el valor presente de los flujos esperados justifica la inversión inicial.

El atractivo económico de una inversión potencial en energía solar para procesos industriales, se puede determinar mediante la comparación del precio de la energía solar con el precio del combustible fósil utilizado, ambos expresados en términos unitarios o energía equivalente. Esto requiere del cálculo de la tasa interna de retorno de la inversión solar o, en algunos casos, la tasa de crecimiento de retorno.

Por lo anterior el objetivo del presente trabajo es evaluar la eficiencia térmica y financiera del proceso de secado de grano lavado de café en un secador solar activo tipo invernadero.

Materiales y métodos

El diseño del secador bajo estudio es de tipo invernadero, cuyas medidas son 2.4 m de ancho y 5.6 m de largo, con una cámara útil de secado para 5.8 m³. Consta de un colector de 15 m² formando parte de la cámara de secado, construido con láminas galvanizadas del calibre más bajo, pintadas de negro “mate” en la parte expuesta al sol, con una orientación hacia el sur y una inclinación igual a la latitud del lugar. La construcción es a base de bastidores de PTR y cubierta con polietileno transparente, calibre 720 con tratamiento para rayos UV, comúnmente utilizado en la construcción de invernaderos. Para mover el aire al interior del secador a una velocidad de 1.5

for calculations of the total cost to the sum of the cost of the dryer, maintenance costs, labor, the cost of the product to be dried and depreciation. Another way to get the economic feasibility of a solar dryer is by calculating the savings obtained by using a solar installation against an alternative conventional drying. But it requires assessing the feasibility of a solar dryer drying only option, we suggest using the present value or discounted cash flow, which determines whether the present value of the expected cash flows justifies the initial investment.

The economic attractiveness of a potential investment in solar energy for industrial processes can be determined by comparing the price of solar energy with the price of the fossil fuel used, both expressed in unit terms or equivalent energy. This requires the calculation of the internal rate of return of the solar investment or, in some cases, the growth rate of return.

Therefore, the objective of this study is to evaluate the thermal and financial efficiency of the drying process of grain coffee washing in an active solar dryer greenhouse.

Materials and methods

The design of the dryer is under study greenhouse, whose measurements are 2.4 m wide and 5.6 m long, with a useful drying chamber to 5.8 m³. Collector consists of a 15 m² part of the drying chamber, built with galvanized sheets of the lowest caliber, painted black “mate” on the sunny side, with an orientation to the south and an inclination equal to the latitude of the place part. The construction is based on PTR frames and covered with transparent polyethylene, caliber 720 with treatment for UV rays, commonly used in the construction of greenhouses. To move the air into the dryer at a speed of 1.5 m s⁻¹, an electric fan motor is used 0.186425 kW. In addition, it has manual closing vents for extraction of humid air. The grain was placed in trays made with wooden frame and 80% shade cloth with dimensions of 0.3*0.85 m, which served as drying beds, bed trays being formed in August, forming five lines inside the dryer bed. The proportion of grain was 19.5 kg m⁻² (Menya and Komakech, 2013).

The thermal efficiency of the solar dryer is determined using the following equation (Monrudee *et al.*, 2011; Tiwaria *et al.*, 2013; Zakaria, 2013):

ms^{-1} , se utiliza un ventilador eléctrico con motor de 0.186425 kW de potencia. Además, cuenta con ventilas de cierre manual para la extracción del aire humedo. El grano fue puesto en charolas hechas con bastidor de madera y malla sombra 80% con dimensiones de 0.3*0.85 m, las cuales sirvieron como camas de secado, formandose ocho charolas por cama, formando cinco líneas de cama dentro del secador. La proporción de grano fue de 19.5 kg m^{-2} (Menya and Komakech, 2013).

La eficiencia térmica del secador solar se determinó utilizando la siguiente ecuación (Monrudee *et al.*, 2011; Tiwaria *et al.*, 2013; Zakaria, 2013):

$$\eta_s = \frac{(W_o - W_t) * L_v}{(H_t * A_c) + P_v}$$

Donde: η_s = eficiencia del secador solar; W_o = peso del material inicial (kg); W_t = peso del material en el tiempo t (kg); L_v = calor latente de vaporización del agua en el café pergamino (kJ kg^{-1}); H_t = radiación horaria incidente sobre la superficie inclinada del colector; (kJ m^{-2}); A_c = área del colector (m^2); P_v = consumo de energía por los ventiladores (kJ).

El calor latente de vaporización del agua en el café pergamino (L_v), se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$L_v = (2502.4 - 2.42958T)[1 + 1.44408\exp(-21.5011M)]$$

Donde: L_v = calor latente de vaporización del café pergamino, kJ kg^{-1} ; T = temperatura del café, $^{\circ}\text{C}$; M = contenido de humedad del café, decimal, bs.

Para la evaluación económica, se consideraron los datos siguientes: un volumen de 200 kg (19.5 kg m^{-2}) de grano de café secados por carga en el secador solar, con un tiempo promedio de secado de 5 días (pérdida de humedad de 55% hasta 12%) y teniendo en cuenta que el periodo de cosecha de café dura 25 semanas aproximadamente, por lo que se asume que se pueden realizar en promedio 25 cargas de secado (una por semana) al año.

En la evaluación del valor presente (VP) o flujo de efectivo descontado (FED), se utilizó la ecuación y consiste en determinar si el valor presente de los flujos esperados justifica la inversión (Purohit *et al.*, 2006; Purohit and Purohit, 2010):

$$\eta_s = \frac{(W_o - W_t) * L_v}{(H_t * A_c) + P_v}$$

Where: η_s = efficiency of the solar dryer; W_o = weight the starting material (kg); W_t = weight the the material at time t (kg); L_v = latent heat of vaporization of water in the parchment coffee (kJ kg^{-1}); H_t = time radiation incident on the inclined surface of the collector; (kJ m^{-2}); A_c = collector area (m^2); P_v = consumption energy by fans (kJ).

The latent heat of vaporization of water in the parchment coffee (L_v) heat is obtained using the following equation:

$$L_v = (2502.4 - 2.42958T)[1 + 1.44408\exp(-21.5011M)]$$

Where: L_v = value latent vaporization of parchment coffee, kJ kg^{-1} ; T = temperature coffee, $^{\circ}\text{C}$; M = contents moisture coffee, decimal, bs.

For the economic evaluation, the following data were considered: a volume of 200 kg (19.5 kg m^2) coffee bean dried load on the solar dryer with an average time drying of 5 days (moisture loss from 55% to 12%) and given that the harvest period lasts coffee 25 weeks or so, so it is assumed to be performed on average 25 drying loads (one per week) per year.

In the evaluation of the present value (PV) or discounted cash flow (FED), the following equation was used to determine if the present value of the expected flows justifies the investment (Purohit *et al.*, 2006; Purohit and Purohit, 2010):

$$V_p = \sum_{j=1}^n \left[\frac{I_j}{(1+i)^j} - \frac{G_j}{(1+i)^j} \right]$$

Where: V_p = value present of future total flows; I_j = ingress in the j-th load; G_j = expenses incurred in the solar dryer at the j-th; n = planning horizon; i = discount rate

The payback period of the investment was calculated with the following formula (Passamai and Passamai, 2006):

$$Pr i = \frac{\text{Investment}}{\text{Benefit}}$$

$$V_p = \sum_{j=1}^n \left[\frac{I_j}{(1+i)^j} - \frac{G_j}{(1+i)^j} \right]$$

Donde: V_p = valor presente de los flujos totales futuros; I_j = ingresos en el carga j -ésima; G_j = gastos realizados en el secador solar en la carga j -ésima; n = horizonte de planeación; i = tasa de descuento.

El periodo de recuperación de la inversión, se calculo con la siguiente formula (Passamai y Passamai, 2006):

$$Pr\ i = \frac{\text{Inversión}}{\text{Beneficio}}$$

Y la rentabilidad de la inversión del secador solar, se determinó con la formula siguiente:

$$RI = \frac{\text{Beneficio}}{\text{Inversión}}$$

Resultados y discusión

El proceso tradicional de secado del grano de café es 9-12 días aproximadamente mientras que utilizando un secador solar fue de 44 h de sol acumuladas (5 días en promedio). Se contabilizaron aproximadamente 7 h sol del primer día, ya que el secador fue preparado por la mañana, 10 de los días 2- 4 y 7 del día 5, dado que el secador fue vaciado por la tarde. La temperatura máxima promedio que se alcanzo al interior del secador fue 46 °C, con una humedad relativa de 60% en promedio. Se obtuvo un porcentaje de humedad del café pergamino de 11.8%. Estos resultados muestran que mediante el uso del secador solar se reduce hasta en 40- 60% el tiempo de secado respecto al secado tradicional (Figura 1). Estos resultados son acorde a los reportados por Henry *et al.* (2013), quienes contabilizaron 11 horas de radiación solar diarias y un tiempo entre 5 a 7 días, para secar pimienta mediante secadores solares.

Al compara las condiciones de temperatura existentes al interior del secador y medio ambiente, siempre son mayores los valores de temperatura al interior del secador por el efecto invernadero (Figura 2), siendo de 20 °C la mayor diferencia y se presenta aproximadamente a las 16 h, esto permitió un secado más acelerado respecto al medio ambiente. La diferencia entre la temperatura interna y del medio ambiente

And the profitability of the inversion of the solar dryer, was determined with the following formula:

$$RI = \frac{\text{Benefit}}{\text{Investment}}$$

Results and discussion

The traditional process of drying the coffee bean is about 9-12 days while using a solar dryer was 44 hours of accumulated sunshine (5 days on average). About 7 h sun first day were recorded as the dryer was prepared in the morning, 10 days 2-4 and 7 day 5, since the dryer was emptied afternoon. The average maximum temperature reached within the dryer was 46 °C, with a relative humidity of 60% on average. A moisture percentage of the parchment coffee of 11.8% was obtained. These results show that by using the solar dryer it is reduced up to 40-60% drying time compared to traditional drying (Figure 1). These results are consistent with those reported by Henry *et al.* (2013), who counted 11 hours of daily sunlight and a time between 5 to 7 days, to dry pepper by solar dryers.

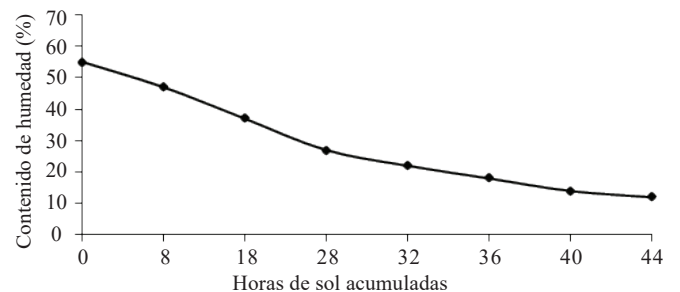


Figura 1. Curva de secado para granos de café en secador solar.
Figure 1. Drying curve for coffee beans solar dryer.

Compares the existing temperature conditions inside the dryer and the environment, are always higher values of temperature inside the dryer by the greenhouse effect (Figure 2), 20 °C the greatest difference and presents approximately at 16 h, this enabled a faster drying environmentally. The difference between the internal temperature and the environment is greater than the difference of 13.6 °C reported by Menya and Komakech (2013) in a greenhouse dryer, located in Uganda, and also greater than the temperature difference of 12.8 °C reported by Monrudee *et al.* (2001) and 14.1 °C reported by Almuhanha (2012), both in greenhouse dryers, and less than the maximum difference of 27 °C reported by

es mayor a la diferencia de 13.6 °C reportada por Menya and Komakech (2013) en un secador tipo invernadero, localizado en Uganda, e igualmente mayor a la diferencia de temperatura de 12.8 °C reportada por Monrudee *et al.* (2001) y de 14.1 °C reportada por Almuhan (2012), ambos en secadores tipo invernadero, e inferior a la diferencia máxima de 27 °C reportada por Ferreira *et al.* (2008) mediante una chimenea solar o a la diferencia de 29.9 °C de temperatura al interior de un secador solar sobre la temperatura ambiental, reportada por Sreekumar (2013).

Sin embargo, el perfil de temperatura no es constante durante las horas de un mismo día, y tampoco durante los días que dura el proceso de secado. Esto se debe a que la temperatura del secador depende de la radiación solar, que no es constante. También la humedad relativa del aire de secado es un factor crítico para controlar la velocidad de secado del producto. Cuanto menor sea la humedad relativa, mayor es la capacidad de absorción de aire de secado. Para determinar la eficiencia global del secador se tomaron los datos promedio de insolación en el área donde se evaluó el secador, la cual se determinó utilizando la ecuación 1, teniendo como resultado un estimado de 12%.

Por otro lado, la pérdida de humedad fue más rápida en las etapas iniciales del secado, dado que el grano tiene mayor contenido de humedad y el agua presente es más fácil de remover, volviéndose cada vez más difícil extraer humedad al final del proceso de secado. Estos resultados son congruentes con las evaluaciones realizadas por Rajeshwari and Ramalingam (2012), quienes reportan una eficiencia de 15% a 18%, en todas las condiciones de ensayo de un diseño de secador solar tipo caja, pero son valores bajos con respecto a la eficiencia de 29% al secar café con un secador solar indirecto con convección forzada, reportada por Restrepo y Burbano (2005) y al valor de 52.55% de eficiencia media durante un día, reportado por Sreekumar (2013). Bergues-Ricardo y Díaz-López (2014) al evaluar una muestra de secadores solares existentes en Latinoamérica, determinaron que su eficiencia varía entre 2 y 50% en promedio.

Como el proceso de secado afecta en gran medida la calidad del café en términos de apariencia y sabor. Cuando el proceso de secado de grano de café se realiza adecuadamente dentro de las condiciones recomendadas, se obtiene un producto de calidad superior (Menya and Komakech, 2013). Así, dependiendo de la ubicación del secador y las condiciones de insolación, en ciertas horas del día se pueden alcanzar temperaturas de hasta 50 °C al interior del secador, que son

Ferreira *et al.* (2008) using a solar chimney or the difference 29.9 °C of temperature inside a solar drier over the ambient temperature, reported by Sreekumar (2013).

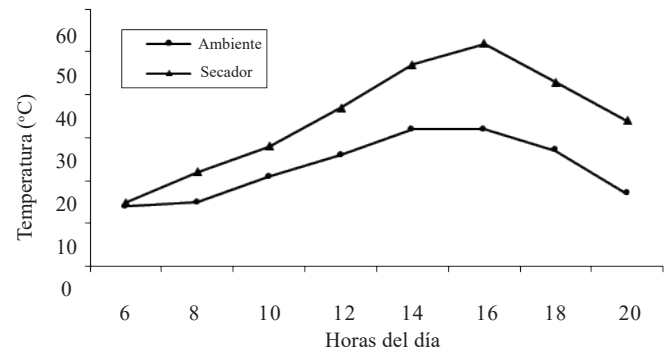


Figura 2. Temperaturas interior del secador-externo (ambiente), en un día normal al iniciar el otoño (septiembre).

Figure 2. Dryer interior temperature-external environment, in a normal day to start the fall (September).

However, the temperature profile is not constant during the hours of one day, nor during the days of the drying process. This is because the temperature of the dryer depends on solar radiation, which is not constant. Also the relative humidity of the drying air is a critical factor in controlling the drying rate of the product. The lower the relative humidity, the greater the drying air absorption capacity. In order to determine the overall efficiency of the dryer, the average insolation data was taken in the area where the dryer was evaluated, which was determined using equation 1, resulting in an estimated 12%.

Furthermore, moisture loss was faster in the initial stages of drying, since the grain has higher moisture content and this water is easier to remove, becoming increasingly difficult to remove moisture at the end of the drying process. These results are consistent with the assessments made by Rajeshwari and Ramalingam (2012), who reported an efficiency of 15% to 18%, in all conditions test design solar dryer box type, but are low values regarding the efficiency of 29% by dry coffee with an indirect solar dryer with forced convection, reported by Restrepo and Burbano (2005) and the value of 52.55% average efficiency for a day, reported by Sreekumar (2013). Bergues-Ricardo and Díaz-López (2014) when evaluating a sample of existing solar dryers in Latin America, found that its efficiency varies between 2 and 50% on average.

As the drying process greatly affects to quality coffee in terms of appearance and taste. when the drying process coffee bean done properly within the recommended

apropiadas para el proceso de secado del café (Restrepo y Burbano, 2005). Esto debido a que cuando se sobrepasan 50 °C de temperatura en el proceso de secado del grano de café durante un periodo de 4 a 10 h, existen pérdidas en el sabor del café. Un sobrecalentamiento durante el secado produce sabores agrios o “cocinados” en la bebida de café o un grosor mínimo de la capa de los granos a secar, generando un endurecimiento de las superficies exteriores de los granos de café que comprometen el cuerpo y sabor del mismo (Menya and Komakech, 2013).

Un aspecto relevante a tener en cuenta, es lo que pasa durante la noche, cuando existe un enfriamiento de la cámara de secado, llegando a generarse condensación en las paredes del secador. Una forma de manejar este aspecto es mantener abiertas las ventilas y prender el ventilador para mover la humedad relativa del interior de la cámara.

En relación a la evaluación económica, aplicando la metodología empleada por Purohit *et al.* (2006) para determinar el costo de secado, que está en función del tiempo y de los insumos (energía eléctrica, depreciación del equipo, volumen de café pergamino, salarios por carga, costo del terreno y de administración), el resultado fue de \$4.00 por kg de café pergamino (Cuadro 1). Los gastos para realizar el proceso de secado de una carga de café lavado hacen un total de \$3 200.00 (Costo total del secado más el costo del café sin secar) y un costo de instalación de un secador solar de \$25 000.00. El precio de mercado del café pergamino es de \$32.50 kg. Comercializando el grano secado en el secador solar bajo este esquema, genera un ingreso de \$6 500.00, lo que implica una utilidad de \$3 300.00 por carga de secado. Bajo el supuesto de un uso intensivo (realización de 25 cargas por año), durante el primer año existe un flujo neto de \$57 500.00 (Cuadro 2).

Al aplicar la ecuación del valor presente (VP) o flujo de efectivo descontado (FED) con los datos del Cuadro 2, y asumiendo un horizonte de planeación de 5 años (vida útil promedio del secador solar), con un gasto de mantenimiento anual de \$5 000.00 (sustitución de la cubierta de polietileno transparente) y una tasa de descuento anual de 8%. El ingreso anual es de \$74 500.00 y un valor presente al final del horizonte de planeación igual a \$335 004.00 (Cuadro 3), todo bajo la consideración de secar café lavado y con un uso de tiempo completo del secador solar (25 cargas al año).

conditions, a quality higher product is obtained (Menya and Komakech, 2013). Thus, depending on the location of the dryer and the conditions of insolation, at certain times of the day temperatures up to 50 °C within the dryer, which are suitable for drying coffee (Restrepo and Burbano, 2005). This is because when you exceed 50 °C temperature in the drying process of coffee beans for a period of 4 to 10 h, there are losses in the taste of coffee. Overheating during drying produces citrus or “cooked” flavors in the coffee beverage or a minimum layer thickness of the grains to dry, generating a hardening of the outer surfaces of the coffee beans that compromise the body and flavor thereof (Menya and Komakech, 2013).

An important aspect to keep in mind is what happens during the night, when there is a cooling of the drying chamber, resulting in condensation on the walls of the dryer. One way to handle this aspect is to keep the vents open and turn on fan to move the relative humidity of the inside the chamber.

Regarding the economic evaluation, applying the methodology used by Purohit *et al.* (2006) to determine the cost of drying, which is a function of time and inputs (electrical energy, equipment depreciation, volume of parchment coffee, salaries per load, land cost and administration), the result was \$4.00 per kilogram of parchment coffee (Table 1). The expenses to carry out the drying process of a load of washed coffee made a total of \$3 200.00 (total cost of drying plus the cost of coffee without dry) and cost of installing a solar dryer of \$25 000.00. The market price of parchment coffee is \$32.50 kg. Marketing the dried grain in the solar dryer under this scheme generates an income of \$6 500.00, which implies a profit of \$3 300.00 for drying load. Under the assumption of intensive use (carrying 25 loads per year), during the first year there is a net flow of \$57 500.00 (Table 2).

Cuadro 1. Costos por kilogramo y costo total del secado solar de granos de café.

Table 1. Costs per kilogram and total cost of solar drying of coffee beans.

Volumen de granos de café (kg)	Costo de secado (\$ kg ⁻¹)	Costo total del secado (\$)	Precio café sin secar (\$)	Costo total café pergamino (\$)
200	4.00	800.00	2 400.00	3 200.00

Cuadro 2. Flujo neto (\$) del secado solar de granos de café en el primer año de servicio.
Table 2. Net flow (\$) of solar drying of coffee beans in the first year of service.

Concepto	Cargas de secado en secador solar							
	1	2	3	4	...	23	24	25
Inversión	25 000.00							
Costo de operación	3 200.00	3 200.00	3 200.00	3 200.00	3 200.00	3 200.00	3 200.00	3 200.00
Ingresos	6 500.00	6 500.00	6 500.00	6 500.00	6 500.00	6 500.00	6 500.00	6 500.00
Saldos	-21 700.00	3 300.00	3 300.00	3 300.00	3 300.00	3 300.00	3 300.00	3 300.00
Flujo neto anual								57 500.00

Cuadro 3. Valor presente del proyecto de secado solar de grano de café.

Table 3. Present value of project solar drying of coffee bean.

Año	Inversión	Flujo del proyecto (\$)	Valor presente (\$)
0	25 000.00	57 500.00	57 500.00
1	5 000.00	74 500.00	64 352.00
2	5 000.00	74 500.00	59 587.00
3	5 000.00	74 500.00	55 172.00
4	5 000.00	74 500.00	51 088.00
5	5 000.00	74 500.00	47 305.00
Valor presente neto			335 004.00

Con los ingresos netos obtenidos del primer año durante el cual se utilizó el secador solar y aplicando la ecuación del periodo de recuperación de la inversión, se tiene un valor de 0.435, que implica una recuperación en menos del año y para saber en que carga será, se realiza la operación siguiente:

$$Pr i = 0.435 * 25 = 10.875$$

Esto significa que la recuperación se realiza al terminar la onceava carga de secado, en el secador solar. Que de utilizarse de tiempo completo, esto sería aproximadamente a los tres meses de realizada la inversión. Estos resultados son acordes al periodo de recuperación de aproximadamente seis meses cuando los secadores solares son utilizados para el deshidratado solar de manzana, y menor al periodo de recuperación reportado por Monrudee *et al.* (2011) de 1.15 años, considerado bastante corto en relación a la vida útil de un secador solar.

By applying the present value pre equation (VP) or discounted cash flow (FED) with data Table 2 and assuming a planning horizon of 5 years (average useful vine solar dryer), with a spending annual maintenance of \$5 000.00 (replacement cover transparent polyethylene) and an annual discount rate of 8%. Yearly income is \$74 500.00 and a value present at the end of the planning horizon equal to \$335 004.00 (Table 3), all under consideration washing and drying coffee with full time use of solar dryer (25 loads per year).

With net income for the first year of using the dryer and applying the equation of payback period of investment, it has a value of 0.435, which implies a recovery in less than a year and to know which load is, the operation is performed following:

$$Pr i = 0.435 * 25 = 10.875$$

This means that the recovery is performed at the end of the eleventh drying load in the solar dryer. That if used full time, this would be approximately three months after the investment was made. These results are in line with the recovery period of approximately six months when solar dryers are used for solar dehydrated apple, and lower the recovery period reported by Monrudee *et al.* (2011) of 1.15 years, considered quite short in relation to the useful life of a solar dryer.

The return on investment of the solar dryer had a final value of 2.3. This is that having an annual flow of \$57 500.00 by performing drying 25 loads, have a 230% rent reliability, being very attractive investment. This despite the low volume dried load, but Mohod *et al.* (2011) report a cost benefit ratio of 1.21 and a recovery period of 2.84 years.

La rentabilidad de la inversión del secador solar tuvo un valor final de 2.3. Esto es que al tener un flujo anual de \$57 500.00 por realizar 25 cargas de secado, se tiene una rentabilidad de 230%, siendo muy atractiva la inversión. Esto a pesar del bajo volumen que se seca por carga, pero Mohod *et al.* (2011) reportan una relación beneficio costo de 1.21 y un periodo de recuperación de 2.84 años.

Esta recuperación de la inversión y su respectiva rentabilidad, es posible bajo el supuesto de que el secador será utilizado a su máxima capacidad y todo el tiempo, de lo contrario, al igual que los secadores convencionales estarán siendo subutilizados y generando pérdidas económicas.

Conclusiones

El tiempo para secar café utilizando un secador solar activo tipo invernadero en el área cafetalera de la sierra nororiental de Puebla, es de 5 días en promedio. Lo que demuestra que el tiempo de secado se reduce en un 40- 50% aproximadamente, con un incremento de la temperatura interior de 20 °C respecto a la temperatura ambiente, que genera una eficiencia global del secador solar estimada en aproximadamente 12%, que lo hace apto obtener café pergamino seco a nivel de pequeños productores.

El valor presente de los flujos son positivos desde los primeros tres meses de uso, por lo que se recomienda utilizar los secadores solares en el secado de grano de café. El periodo de recuperación de la inversión en el secado solar, se logra al realizar la onceava carga de secado, por lo que el tiempo de recuperación depende de la intensidad de uso del secador solar.

Literatura citada

- Almuhanha, E. A. 2012. Utilization of a solar greenhouse as a solar dryer for drying dates under the climatic conditions of the eastern province of Saudi Arabia. Part I: thermal performance analysis of a solar dryer. *J. Agric. Sci.* 4(3):237-246.
- Boonyasri, M. C.; Lertsatitthanakorn, L. W. and Poomsa-ad; N. 2011. Performance analysis and economic evaluation of a greenhouse dryer for pork drying. *KKU Eng. J.* 38(4):433-442.
- Bergues, R. C. C. y Díaz, L. J. R. 2014. Diagramas de tendencia para la generalización sostenible de secadores solares directos de productos agropecuarios. *Tecnología Química.* 34(2):143-151.

This recovery of the investment and its respective profitability is possible under the assumption that the dryer will be used at its maximum capacity and all the time, otherwise, just as conventional dryers will be underutilized and generating economic losses.

Conclusions

The time for drying coffee using a active solar dryer type greenhouse in the coffee in growing area of northeastern mountains of Puebla, it is 5 days on average. This shows that the drying time is reduced by 40-50% approximately, with an increase of the inner temperature of 20 °C over the ambient temperature, which generates an overall efficiency of solar dryer estimated at about 12%, which makes it suitable to obtain dry parchment coffee at the level of small producers.

The present value of the flows is positive from the first three months of use, therefore, it's recommended to use solar dryers in the drying of coffee beans. The period of recovery of the investment in solar drying is achieved by performing the eleventh drying load, so that the recovery time depends on the intensity of use of the solar dryer.

End of the English version



- CERTIMEX. 2009. Normas para la producción, procesamiento y la comercialización de productos ecológicos. CERTIMEX - 01-2009. 39 p.
- Chavan, B. R.; Yakupitiyage, A. and Kumar; S. 2001. Drying performance, quality characteristics, and financial evaluation of indian mackerel (*rastrilliger kangurta*) dried by a solar tunnel dryer. *Thammasat Int. J. Sc. Tech.* 16(2):11-25.
- Ferreira, A. G.; Maia, C. B.; Cortez, M. F. B. and Valle, R. M. 2008. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. *Solar Energy.* 82:98-205.
- Ferro, F. V. R.; Abdala, R. J. L.; Fonseca, F. S.; Pantoja, E. J.; Torres, T. A.; Bergues, R. C.; Griñán, V. P. y Ibáñez, D. G. 2000. Análisis de opciones para el secado solar de café. Parte 2. Aspectos energéticos, de rendimiento y económicos. *Tecnol. Química.* 20(1):52-57.
- Henry, R.; Qayoom, A. R.; Ahmed, K. S. and Tiong, K. P. L. 2013. Development of an indirect solar dryer with biomass backup burner for drying pepper berries. *World Appl. Sci. J.* 22 (9):1241-1251.

- Keke, M. M.; Femi, S. A.; Kayode, A. S. and Abimbola, A. I. 2014. Qualitative performance and economic analysis of low cost solar fish driers in Sub-Saharan Africa. *J. Fisheries* 2(1):64-69.
- Menya, E. and Komakech, A. J. 2013. Investigating the effect of different loading densities on selected properties of dried coffee using a GHE dryer. *Agric Eng Int: CIGR J.* 15(3):231-237.
- Mohod A. G.; Sengar, S. H. and Khandetod, Y. P. 2011. Solar tunnel dryer as an income generation unit for fisherman. *BIOINFO Renewable Sustainable.* 1(1):01-04.
- Monrudee, B. M.; Lertsatitthanakorn, C.; Wiset, L. and Poomsaad, N. 2011. Performance analysis and economic evaluation of a greenhouse dryer for pork drying. *KKU Eng. J.* 38(4):433-442
- Mustapha, M. K.; Salako, A. F.; Ademola, S. K. and Adefila, I. A. 2014. Qualitative performance and economic analysis of low cost solar fish driers in Sub-Saharan Africa. *J. Fisheries.* 2(1):64-69.
- Parra, C. A.; G. Roa, M. y Oliveros, T. C. E. 2008. SECAFÉ Parte II: Recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino. *Rev. Bras. Engenharia Agríc. Amb.* 12(4):428-434.
- Passamai V. y Passamai, T. 2006. Evaluación de la eficiencia económica de secadores solares como proyecto de inversión. INENCO - CONICET. Salta, Argentina. 2 p.
- Paswan, M. K. and Mohit, J. 2010. Experimental analysis of solar dryers. *Arab Res. Inst. Sci. Eng.* (1):1-9.
- Purohit, P.; Kumar A. and Kandpal, T. C. 2006. Solar drying vs. open sun drying: a framework for financial evaluation. *Solar Energy.* 80:1568-1579.
- Purohit, I. and Purohit, P. 2010. Techno-economic evaluation of concentrating solar power generation in India. *Energy Policy.* 38:3015-3029.
- Rajeshwari, N. and Ramalingam, A. 2012. Low cost material used to construct effective box type solar dryer. *Arch. Appl. Sci. Res.* 4 (3):1476-1482.
- Restrepo, V. A. H. y Burbano, J. J. C. 2005. Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos. *Scientia Et Technica.* 11(27):127-132.
- Sreekumar, A. 2013. Evaluation of a roof-integrated solar air heating system for drying foodstuffs. *Int. J. Emer. Technol. Adv. Eng.* 3(3):209-213.
- Tiwaria, G.; Katiyara, V. K.; Dwivedia, V.; Katiyarb, A. K. and Pandeyb, C. K. 2013. A comparative study of commonly used solar dryers in India. *Int. J. Curr. Eng. Technol.* 3(3):994-999.
- Zakaria, H. M. 2013. Development of solar dryer for drying of chilli seeds. Thesis Master of science. Bangladesh Agricultural University. Mymensingh, Bangladesh. 57 p.