



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS CÓRDOBA**

MAESTRÍA TECNOLÓGICA EN AGROINDUSTRIA

**SECADO DE CAFÉ (*Coffea arabica*) EN TRES MODELOS DE SECADORES  
SOLARES TIPO INVERNADERO CON ESTRUCTURA DE BAMBÚ**

**JORGE FRANCISCO MENDIETA TELLER**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRÍA TECNOLÓGICA**

AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ  
2011

La presente tesis titulada: **Secado de café (*Coffea arabica*) en tres modelos de secadores solares tipo invernadero con estructura de bambú**, realizada por el alumno **Jorge Francisco Mendieta Teller**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA TECNOLÓGICA  
AGROINDUSTRIA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



---

Dr. Victorino Morales Ramos

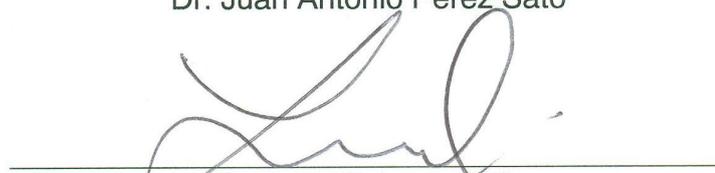
ASESOR:



---

Dr. Juan Antonio Pérez Sato

ASESOR:



---

Dr. Juan Salazar Ortiz

Amatlán de los Reyes, Veracruz, mayo de 2011

## SECADO DE CAFÉ (*Coffea arabica*), EN TRES MODELOS DE SECADORES SOLARES TIPO INVERNADERO CON ESTRUCTURA DE BAMBÚ

Jorge Francisco Mendieta Teller, MT.

Colegio de Postgraduados, 2011

El secado en el proceso del café es la etapa más cara del beneficiado húmedo, representando alrededor del 90% del costo de producción. El objetivo de este trabajo fue evaluar alternativas más baratas y sustentables para el secado de café pergamino. Se diseñaron, construyeron y probaron tres modelos de secadores solares tipo invernadero (Un agua, Dos aguas y Triangular), con estructura de bambú, de bajo costo (alrededor de \$ 9, 000.00 pesos cada uno) y fáciles de construir. Estas estructuras protegen al grano de los factores naturales, de animales domésticos y fauna silvestre. En cada modelo se colocaron camas de secado de estructura tubular y malla galvanizada de 4 mm, a tres diferentes alturas sobre el nivel del suelo: 0.5 m, 1.0 m y 1.5 m, respectivamente. El análisis de los resultados indica que los tres modelos son efectivos para el secado del grano al 12% de humedad, en un tiempo que varía de 3-12 días, dependiendo de las condiciones climáticas. No hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los tres modelos, por lo que la eficiencia en el secado de café es similar (al 12% de humedad). Sin embargo, al comparar los modelos por nivel, se observa que solo para el nivel superior (a 1.5 m sobre el nivel del suelo) hay diferencias significativas ( $p = 0.052$ ) entre el modelo Triangular y el de Un agua, siendo más eficiente para este nivel el modelo Triangular. Al comparar el efecto de los diferentes niveles de las camas de secado, se observan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en los tres modelos, específicamente entre el nivel inferior (0.5 m) y el superior (1.5 m) de cada caso. El café pierde más humedad en el nivel superior que en el inferior.

Palabras claves: Secado de café, Invernadero, Beneficiado húmedo, Estructuras de bambú.

## COFFEE DRYING (*Coffea arabica*) IN THREE MODELS OF SOLAR DRYERS TYPE GREENHOUSES WITH BAMBOO STRUCTURE.

Jorge Francisco Mendieta Teller, MT.

Colegio de Postgraduados, 2011

Drying is the most expensive stage in the wet process of coffee, representing about 90% of production cost. The purpose of this work was to evaluate cheaper and sustainable alternatives for drying coffee. Three models of greenhouse effect solar dryers were designed, built and tested (Un agua+, Dos aguas+ and Triangular+) which have bamboo structure, they are cheap (about \$ 9, 000.00 pesos each) and easy to build. These structures protect the grain from natural conditions, pets and wildlife. Drying beds were placed into each model. These beds are made of tubular structure and 4 mm galvanized mesh. They were placed at three different heights, above ground floor: 0.5 m, 1.0 m and 1.5 m, respectively. The results indicate that the three models are effective for drying coffee grain down to 12% humidity, in a time ranging from 3 to 12 days, depending on weather conditions. There were no significant differences ( $p < 0.05$ ) between models, so it cannot be said that one is more efficient, in drying coffee, than another (12% humidity content). However, when comparing models by level, results show that only for the top level (1.5 m high) there is significant difference ( $p = 0.052$ ) between the Triangular+ and Un agua+ models, being more efficient for this level the Triangular one. When comparing the effect of different levels of drying beds, there were observed significant differences ( $p < 0.05$ ) in the three models, specifically between the lower (0.5 m) and the upper (1.5 m) levels of each model. Coffee dries faster on the higher level than the lower one.

Keywords: Drying of coffee, Greenhouse, Wet processing, Bamboo structures.

## **DEDICO ESTA TESIS A:**

Mis padres, María Celia Teller Paz y Reynerio Mendieta Mendieta con su amor, enseñanzas y ejemplos, han sido un modelo a seguir. Gracias por escucharme y apoyarme en mis decisiones. Los quiero mucho.

Mis hermanos, María Mercedes, Celia Carolina, Gabriela y Carlos Alberto. Quienes a pesar de estar lejos, me han apoyado incondicionalmente. Gracias por su amor y comprensión.

Mis abuelitos, María del Socorro Mendieta y Jorge Teller G. (Q. E. P. D.) Por forjar los cimientos de las familias hermosas a la que pertenezco. Los quiero mucho.

Mi familia. Por ser humilde y sencilla. Gracias por brindarme su cariño, apoyo y comprensión en todo momento. Me siento muy orgulloso de ustedes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Colegio de Postgraduados, por la beca de colegiatura que me otorgó, contribuyendo de esta forma en mi crecimiento profesional.

A los miembros del Área de Tecnología del Café por el apoyo incondicional que me brindaron para realizar mi trabajo de tesis en Maestría Tecnológica.

A Juan Carlos Sierra Luis, Víctor Hugo Martínez González y Rolando Vázquez Lorenzo, estudiantes de servicio social del DIA-UACH, quienes construyeron los modelos de secadores solares que se evaluaron en este trabajo.

Al Dr. Victorino Morales Ramos, quien fungió como Profesor Consejero y que fue fundamental para el desarrollo de esta investigación. Por su apoyo, paciencia, confianza y motivación en todo momento.

A los integrantes del consejo particular: Dr. Juan Antonio Pérez Sato y al Dr. Juan Salazar Ortiz por los conocimientos y experiencias transmitidas durante la revisión de tesis, en asesorías y reuniones.

A mis compañeros de generación: Evelyn, Víctor, Fernando, Alexis, Celestino, León, María Luisa e Imelda, por tener el gusto de conocerlos y compartir experiencias dentro y fuera de las aulas. A Diego A. Luna por brindarme su amistad y auxiliarme desde el inicio del postgrado. A Diego López y Juan Carlos por su apoyo brindado, por compartir tristezas en momentos difíciles y alegrías en los memorables, pero sobretodo gracias por su amistad.

## CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
2.1 Hipótesis .....	2
3. OBJETIVOS .....	3
3.1 General .....	3
3.2 Particulares .....	3
4. ANTECEDENTES .....	4
4.1 Radiación solar como fuente de energía.....	5
4.2 Secadores solares .....	6
4.3 Principio básico de los secadores de café tipo invernadero.....	12
4.4 El bambú.....	14
5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	17
5.1 Ubicación .....	17
5.2 Diseño de los modelos.....	18
5.2.1 Cama de secado.....	18
5.2.2 Tipo de bambú.....	18
5.2.3 Sistema de circulación de aire .....	19
5.2.4 Diseño de los modelos de secadores solares.....	19
5.2.5 Diseño de los ensambles.....	20
5.2.6 Tipo de plástico.....	21

5.3 Construcción de los modelos .....	21
5.4 Evaluación de los modelos.....	21
5.4.1 Colocación del grano de café en las camas de secado .....	22
5.4.2 Toma de muestra.....	23
5.4.3 Análisis de las muestras .....	24
5.4.4 Morteado.....	25
5.4.5 Pesado de la muestra a analizar.....	25
5.4.6 Reducción de partícula .....	26
5.4.7 Determinación de humedad.....	26
5.4.8 Registro de datos.....	27
5.4.9 Análisis estadístico .....	27
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	28
6.1 Diseño y construcción de modelos de secadores solares.....	28
6.2 Evaluación de los modelos de secadores solares.....	31
6.2.1 Comparación entre niveles para un mismo modelo .....	31
6.2.2. Comparación entre modelos para un mismo nivel.....	33
6.2.3 Relación entre humedad relativa interna y humedad del grano .....	34
7. CONCLUSIONES.....	37
8. LITERATURA CITADA.....	38
9. ANEXOS .....	40

## LISTA DE CUADROS

		Pagina
Cuadro 1	Incidencia solar en KWh/m <sup>2</sup> por día	5
Cuadro 2	Capacidad de remoción de humedad del aire	13
Cuadro 3	Propiedades del bambú en comparación a otros materiales	15
Cuadro 4	Descriptivo de los contenidos de humedad de cada nivel	31
Cuadro 5	ANOVA Contenidos de humedad por nivel	32
Cuadro 6	Separación de medias por Tukey	33
Cuadro 7	ANOVA del contenido de humedad entre modelos para un mismo nivel	33
Cuadro 8	Subgrupo homogéneo nivel superior (1.5 m de altura)	34

## LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Mapa de reflexión solar en México	6
Figura 2	Secadores provisto de colector de aire	7
Figura 3	Diseños de secadores de efecto invernadero	7
Figura 4	Secador CENICAFE	9
Figura 5	Secador con panel de celdas fotovoltaicas	10
Figura 6a	Secador bajo costo	11
Figura 6b	Secador costo intermedio	11
Figura 6c	Secador de alto costo	11
Figura 7	Secador con sistema neumático asistido	11
Figura 8	Secador solar de circulación forzada	12
Figura 9	Esquema de proceso de secador solar	13
Figura 10	Plantación de bambú en Orizaba, Veracruz	15
Figura 11	Localización del área dentro del Campus Córdoba donde fueron construido los secadores solares	17
Figura 12	Cama de secado	18
Figura 13	Diseño de secador solar modelo Triangular	19
Figura 14	Vista frontal del secador solar modelo Un agua	20
Figura 15	Corte transversal modelo Dos aguas	20
Figura 16	Pesado del grano de café utilizando una báscula Torrey	22
Figura 17	Colocación y distribución de los granos de café en las camas	22

Figura 18	Toma de datos de temperatura en las camas y humedad relativa....	23
Figura 19	Ejemplo de código impreso en la superficie de la bolsa que contiene la muestra	24
Figura 20	Muestras ordenadas	24
Figura 21	Morteador de grano	25
Figura 22	Báscula utilizada para pesar los 10 g del grano a analizar	25
Figura 23	Procedimiento y equipo utilizado en la trituración del grano.	26
Figura 24	Determinador halógeno de humedad	26
Figura 25	Construcción de los modelos: Un agua, Dos aguas y Triangular.	29
Figura 26	Estructura de secador solar modelo Dos aguas	30
Figura 27	Humedad media por nivel y por modelo	32
Figura 28	Humedad media en cada modelo por nivel	34
Figura 29	Relación de humedad del grano con humedad relativa interna en modelo %Un agua+	35
Figura 30	Relación de humedad del grano con humedad relativa interna en modelo %Dos aguas+	35
Figura 31	Relación de humedad del grano con humedad relativa interna en modelo %Triangular+	36

## 1. INTRODUCCIÓN

El café es uno de los principales productos que se comercializan a nivel mundial, generando ingresos anuales superiores a 15 mil millones de dólares. México ocupa el 5<sup>to</sup> lugar en producción mundial de café con el 5.7% (CEFP, 2001). Veracruz es el segundo mayor productor de café a nivel nacional, con una superficie de 140 mil hectáreas sembradas y alrededor de 90 mil productores (García, 2010), la mayoría de los ellos indígenas (Toledo y Moguel, 1996).

El secado del grano de café es importante para su conservación y es parte del proceso del beneficiado húmedo. Este se realiza después de la cosecha con el propósito de llevar el grano a un grado de humedad que oscile entre el 10 y 12% (López, 2006).

El secado puede ser de dos formas: natural o mecánico. Dentro del secado natural tenemos el secado a patio, que es el más tradicional, por ser una técnica barata y simple (Cruz, 2008). Sin embargo, involucra más trabajo físico y expone el grano a la lluvia, polvo, basura y animales. Por otro lado, tenemos el secado mecánico, técnica costosa y emisora de gases contaminantes de efecto invernadero, (PROARCA, 1994). A la fecha, se han propuesto varias alternativas al secado mecánico, entre ellas, el secado utilizando cámaras solares tipo invernadero (Fajardo y Sanzu 2003). Los secadores solares son baratos, eficientes, protegen el grano, son fáciles de construir y no contaminan el medio ambiente.

A la fecha no se tiene conocimiento de un estudio donde se evalúe el uso de secadores solares para las condiciones climáticas del estado de Veracruz. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar tres modelos de secadores solares, con estructura de bambú y forrados con plástico para invernadero, con el fin de determinar cuál de ellos es más eficiente en el secado de café.

Este documento consta de ocho capítulos: introducción, planteamiento del problema, objetivos, antecedentes materiales y métodos, resultados, conclusiones y recomendaciones.

## **2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

El secado del café es la operación más costosa del beneficiado húmedo del grano, representa alrededor del 90% del costo de operación en esta etapa. Además, la combustión de gas LP, diesel, combustóleo, leña o pajilla y el uso de motores eléctricos de alta potencia, generan directa e indirectamente compuestos orgánicos volátiles, tales como NO, CO, entre otros, que contribuyen a la contaminación atmosférica (O'Ryan y Larra 2003).

Uno de los problemas mundiales más grandes consecuencia de la contaminación atmosférica es el calentamiento global. Este fenómeno ha ocasionado desastres naturales que han costado vidas humanas y afectado la vida de plantas y animales. La Asociación Nacional de Energía Solar (2005), plantea que tenemos que ir buscando fuentes alternas de energía más baratas, renovables y sobretodo, que no dañen el medio ambiente. La ubicación geográfica de latitud y clima de Veracruz favorecen el uso de este tipo de energía. (Figura 1).

Por esta razón, el trabajo propone el diseño, construcción y evaluación de modelos de secadores solares para secado café, que sean de bajo costo, de fácil construcción, operación y amigables con el medio ambiente.

### **2.1 Hipótesis**

1. Los tres modelos de secadores solares son una buena alternativa para secar el café pergamino hasta un 12% de humedad.
2. Los tres modelos de secadores solares propuestos son igualmente eficientes para el secado de café pergamino en sus diferentes niveles.
3. El café pergamino se seca igualmente dentro de un modelo de secador solar, independientemente del nivel sobre el suelo en que se coloque la cama de secado.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 General**

Proponer y evaluar tres modelos de secadores solares, contruidos con cubierta plástica para invernaderos y estructura de bambú, para disminuir la humedad del grano de café al 12%.

#### **3.2 Particulares**

1. Diseñar tres modelos de secadores solares.
2. Construir los tres modelos propuestos.
3. Evaluar diferentes alturas de las camas de secado.

#### 4. ANTECEDENTES

El beneficiado húmedo es un proceso para transformar los frutos del cafeto, de su estado uva a café pergamino. Se desarrolla básicamente en cuatro etapas: despulpado, fermentación, lavado y secado. Cada etapa debe ser cuidadosamente controlada para lograr la bondad óptima de los granos. El tipo de beneficio, y en particular el secado, tienen efecto significativo en la calidad de la bebida de café. (Fajardo y Sanzu, 2003).

Después del lavado, el grano contiene alrededor de un 52% de humedad. Una forma tradicional reducir el nivel de humedad hasta un 12%, es el secado en patio. Esta es una técnica simple y barata pero depende de la temperatura y la humedad relativa del lugar. Con temperaturas bajas y humedad alta, el grano tardará más tiempo en secarse, pero con temperaturas altas y aire seco, la rapidez de secado se incrementa. Es importante señalar que en esta técnica se invierte un mayor tiempo de trabajo, ya que el grano debe protegerse de lluvias repentinas, polvo, basura y los animales; también se debe de cubrir o guardar por las noches para evitar que vuelva a absorber la humedad del ambiente. (Cruz, 2008). Durante el secado al sol se extrae agua hasta dejar el grano con un 12% de humedad. Para que esto ocurra pueden transcurrir entre 5-20 días, dependiendo de las condiciones climáticas del lugar (Roa *et al.*, 2000).

El café pergamino seco de buena calidad, con contenido de humedad del 10 al 12%, se conserva almacenado hasta por 6 meses en ambientes con temperatura inferior a 20°C y humedad relativa de 65 a 70% (Fajardo y Sanzu., 2003). Un mal secado del grano (humedad menor al 10%) puede causar daños irreversibles en el aroma y sabor (Juárez, 2003).

#### 4.1 Radiación solar como fuente de energía

La Asociación Nacional de Energía Solar (2005), plantea que tenemos que buscar fuentes alternativas de energía más baratas, renovables y sobretodo, que no dañen el medio ambiente. La ubicación geográfica de latitud y clima de México favorecen el uso de energía solar. (Figura 1).

Diariamente el sol arroja aproximadamente 15 mil veces la energía primaria consumida a nivel mundial. Esta energía puede ser utilizada para el secado de grano de café en zonas aisladas y marginadas, como lo son las zonas cafetaleras del estado de Veracruz (Duran y Godfrin, 2004).

Cuadro 1. Incidencia Solar en KWh/m<sup>2</sup> por día.

Estado	Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Veracruz	Tuxpan	3.1	3.8	4.4	4.8	4.7	4.4	4.7	5.5	4.4	4.1	3.4	3.1
Veracruz	Córdoba	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.5	4.1	3.5	3.1	2.8
Veracruz	Orizaba	3.3	3.5	3.9	4.2	4.9	4.4	4.5	4.6	4.3	3.6	3.3	3.1
Veracruz	Jalapa	3.2	3.5	3.8	4.3	4.6	4.4	4.9	5.0	4.4	3.7	3.3	3.0
Veracruz	Veracruz	3.7	4.5	4.9	5.1	5.1	4.8	4.7	5.1	4.6	4.8	4.1	3.6

Fuente:[www.ecotec2000.de/espanol/sun7.html](http://www.ecotec2000.de/espanol/sun7.html)

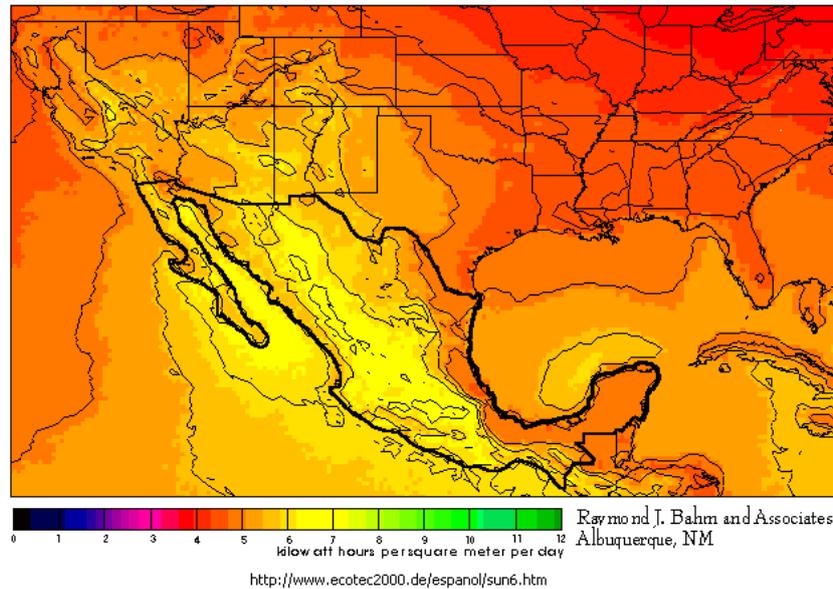


Figura.1 Mapa de reflexión solar en México.

#### 4.2 Secadores solares

Los secadores solares pueden dividirse en tres clases generales, En la primer clase están aquellos que usan un colector que provee aire caliente a una cámara de secado (Figura 2). En la segunda, los que generan el aire caliente directamente en la cámara de secado a través del efecto invernadero (Figura 3). Finalmente, en la tercer clase están los secadores solares asistidos con aire calentado usando fuentes alternas, tales como madera, carbón y paneles de celdas fotovoltaicas (Leopold *et al.*, 2003).

Oti-Boateng y Axtell (1998), mencionan las siguientes ventajas que tienen los secadores solares para café comparados al secado del grano en patio:

- Las temperaturas son más elevadas y, en consecuencia, la humedad relativa interior menor. Esto trae como resultado un secado más rápido.
- Las temperaturas elevadas que se generan actúan como una barrera contra la presencia de insectos y el desarrollo de moho.
- El producto dentro de los modelos está protegido del polvo y los insectos.

- El ritmo de secado es más acelerado, y el uso de sistemas de rejillas o mallas requiere de menor cantidad de terreno.
- Permite un grado considerable de protección contra la lluvia, lo que hace innecesaria mano de obra adicional para recoger el material.
- Resulta comparativamente más barato de construir y no necesita mano de obra especializada.

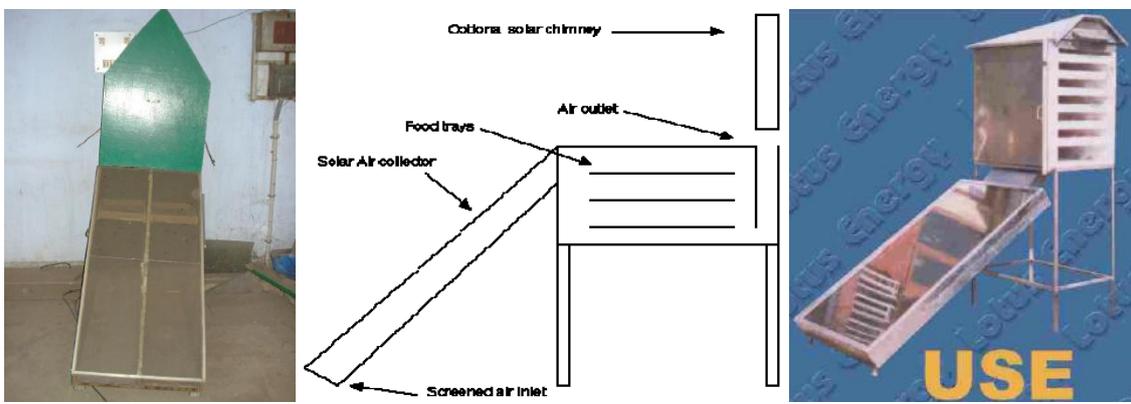


Figura 2. Secadores provistos de colector de aire.



Figura 3. Diseños de secadores de efecto invernadero.

PROARCA (1994) hace las siguientes recomendaciones a tomar en cuenta en la construcción de secadores tipo invernadero: colocar el grano de café en zarandas

de malla o lamina a un metro del suelo, utilizar en el techo un material grueso y transparente, con una altura del suelo de dos metros, su orientación tiene que ser de oriente a poniente para permitir la circulación del aire, y evitar que el café entre en contacto con la lluvia o el sereno.

CERTIMEX (2009), en sus normas para certificar café orgánico nos habla que en la etapa de secado de café se tienen que cumplir requisitos tales como: el aprovechamiento máximo de la energía del sol, evitar el contacto del grano con el suelo, prohibido el uso de combustible fósil (gasolina, diesel o petróleo). Tampoco se permite el uso de plástico en el secado, pero según Berrueta *et al.*, (2003) en el caso que el café no entre en contacto directo con el plástico, se permite el uso del mismo para protección si están elaborados por polietileno o polipropileno.

Restrepo y Burano (2005) compararon diferentes tipos de secadores solares para café y encontraron que la mejor alternativa son los secadores tipo invernadero con cubierta de plástico térmico, por ejemplo el secador tipo parabólico de 20m<sup>2</sup> propuesto por el CENICAFE (Figura 4), diseñado para un quintal de grano y que consta de estructura de bambú y plástico. Otras ventajas que posee este tipo de secadores es que el grano de café se continúa ventilándose y secándose aun en días lluviosos y evitan de igual manera que el granos se rehumedezca. (Roa *et al.*, 2000).



Figura 4. Secador CENICAFE

En la construcción de un secador se recomienda el uso de estructuras de madera, cubiertas de polietileno y una chimenea para facilitar la circulación de aire. Para reducir las pérdidas de calor por convección, se propone el uso de capas dobles de polietileno en las paredes, la exterior debe ser más transparente que la interior. Para que el secado sea más rápido la capa de granos de café no debe ser mayor a 3cm (Roa *et al.*, 2000). Paswan y Mohit (2010) recomienda en el caso de que los secadores solares no cuenten con una estructura de madera debajo del mismo utilizar pisos de concreto.

Kamaruddin (2007) propone el concepto de Pequeñas Unidades de Procesamiento (SPU), que incluyen un secador solar de efecto invernadero (GHE) para productos tales como los granos de cacao y otras semillas. Por su parte el Danish Technological Institute (2002), reporta la prueba de un secador solar para granos y semillas, provisto de un área de colección y calentamiento de aire de 24 m<sup>2</sup>, donde la circulación interior del aire se realiza con ventiladores alimentados por paneles de celdas fotovoltaicas. Con este secador, diseñado para 500 kg, fue

posible reducir el contenido de humedad en el maíz de un 20% al 10% en día y medio.

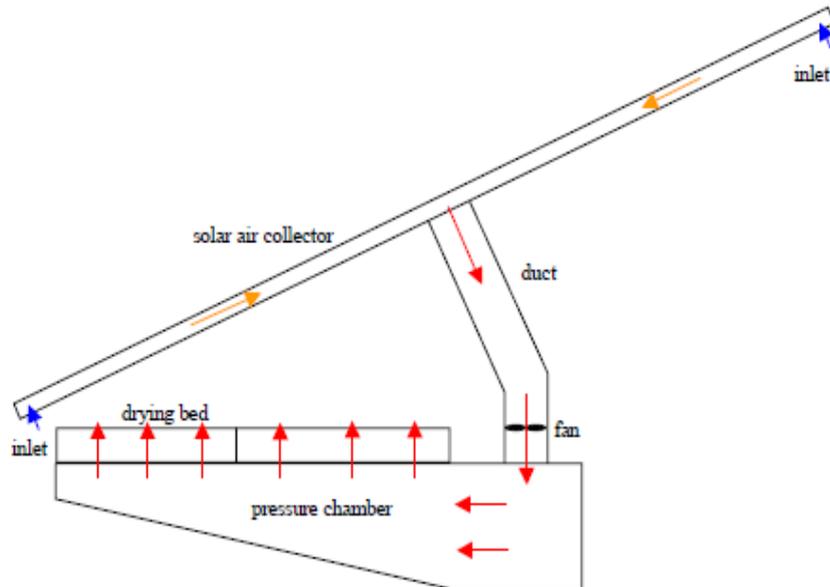


Figura 5. Secador con panel de celdas fotovoltaicas.

Basados en su costo y características, Green y Schwarz (2001) clasifican a los secadores solares en tres tipos: de costo bajo (US\$ 15) los cuales son portátiles (Figura 6a), con estructura de bambú y con una superficie de secado de 7 m<sup>2</sup>, los de costo intermedio (US\$ 400), con una superficie de secado de 5 m<sup>2</sup> y cinco charolas sobrepuestas (Figura 6b), haciendo un total de 25 m<sup>2</sup> de área de secado. Finalmente y los secadores (Figura 6c) de alto costo (US\$ 5000), con carga de secado que varía de 1.5 kg/m<sup>2</sup> en plantas medicinales y hasta 25 kg/m<sup>2</sup> para arroz y café.

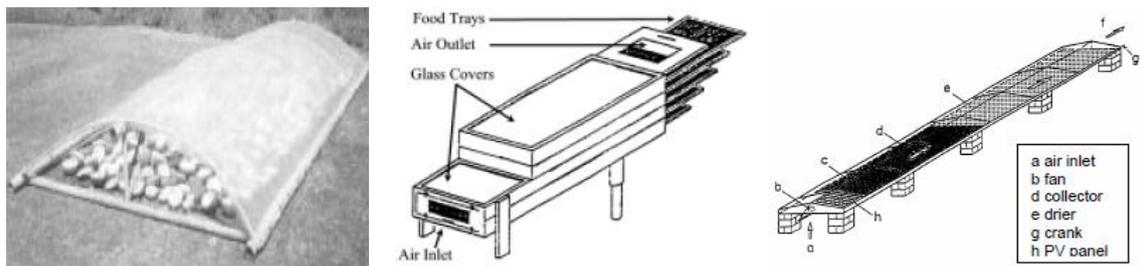


Figura 6a. Secador de bajo costo Figura 6b. Secador de costo intermedio Figura 6c. Secador de alto costo.

Berrueta *et al.* (2003) desarrollaron, con participación de productores, un secador solar de 7.5m<sup>2</sup> hecho de madera y plástico para invernadero. En la operación encontraron una reducción de hasta un 50% del trabajo físico requerido para el manejo del grano.

Según Sampaio *et al.* (2007) no todos los secadores solares para café son eficientes, debido a que estos son inicialmente diseñados para otros tipos de granos y luego adaptados para café. Por esta razón, proponen un secador con sistema neumático para agitar el grano y asistido con un flujo de aire.

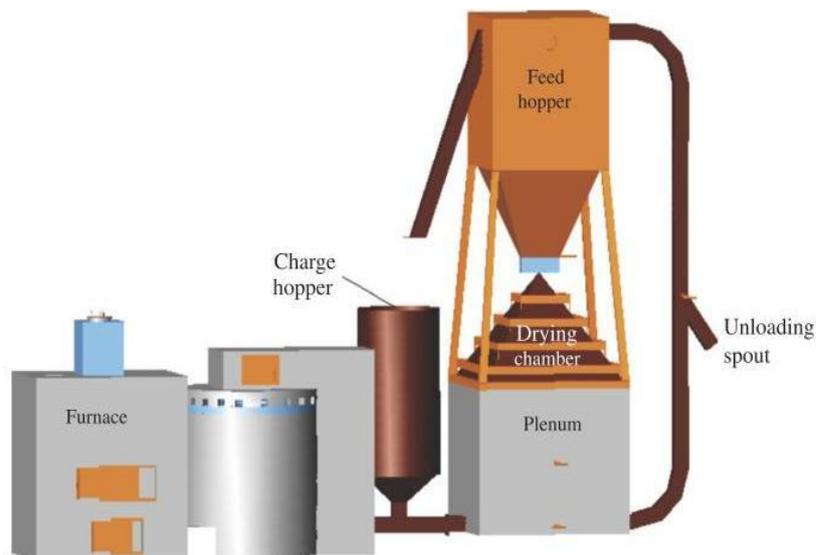


Figura 7 Secador con sistema neumático asistido por flujo de aire.

Existen secadores solares para fines industriales, que son muy eficientes incluso en días nublados y en horas nocturnas. Estos han sido diseñados para una gran variedad de productos agropecuarios. El precio de este tipo de secadores es de 70dolares por m<sup>2</sup>, y su costo de secado por kilo es menos de la mitad comparado con un secador eléctrico. ( <http://www.icar.org.in>).



Figura 8. Secador solar de circulación forzada.

#### **4.3 Principio básico de los secadores de café tipo invernadero**

El aire en el interior del invernadero se calienta por efecto de los rayos del sol, disminuyendo la humedad relativa, el aire caliente absorbe el agua del grano, secándolo (Figura 9). Debido al diferencial de temperaturas dentro y fuera del invernadero se da el fenómeno de convección natural, (Berrueta *et al.*, 2003).

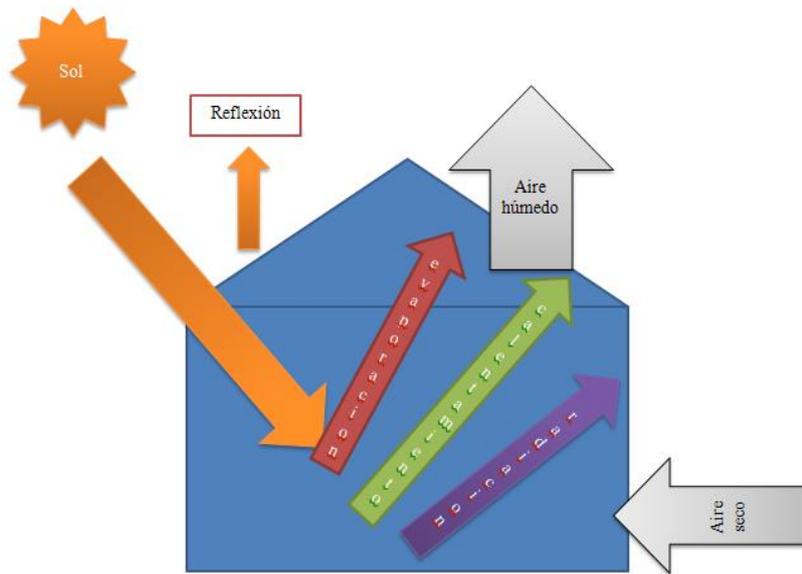


Figura 9. Esquema del proceso de secador solar.

Los secadores solares reducen la cantidad de trabajo físico requerido para el manejo del grano, pues no se requiere tender y levantar el grano diariamente. Además, reducen el tiempo de secado, en relación al secado en patios, hasta en un 40%. Además, eliminan factores que pueden afectar la calidad del grano, tales como basura, polvo, animales, el pisoteo de las personas, lluvia, etc. Finalmente, se obtiene un grano con mejor apariencia física, dado que se evita el re-humedecimiento y el recalentamiento del mismo (Barrueta *et al.*, 2003).

La capacidad de remoción de humedad en el grano de café depende de la temperatura del aire y de la humedad relativa del mismo.

Cuadro 2. Capacidad de remoción de humedad del aire.

HR inicial	Capacidad de absorción de humedad (g agua / m <sup>3</sup> aire)		
	Aire a 20°C	Aire a 40°C	Aire a 60°C
40%	4.3	9.2	16.3
60%	1.4	8.2	15.6
80%	0.0	7.1	14.9

URL: [www.nri.org/homepage.html](http://www.nri.org/homepage.html).

Algunos aspectos mencionado por Cruz (2008) para el manejo y el mantenimiento de las secadoras solares tipo invernadero son:

- No debe interrumpirse la circulación aire.
- Si el lugar es frío, hay que disminuir el tamaño de la entrada de aire pero no se debe de cerrar completamente.
- Tener cuidado que no se acumule vapor dentro del invernadero.
- No debe proyectarse sombra hacia la secadora.
- Las salidas y entradas de aire deben de cerrarse por la noche para evitar que se introduzca humedad dentro del invernadero.
- Las puertas deben estar siempre cerradas para evitar que entre polvo, basuras y animales.

Finalmente, un factor que hay que considerar en las secadoras tipo invernaderos es la material con el que se elaborara la estructura y para esto se tiene que tomar en cuenta la disponibilidad del mismo, sus propiedades en la construcción, precio, etc.

#### **4.4 El bambú**

Geográficamente, el bambú (*Guadua angustifolia*) se encuentra en regiones tropicales como es el caso del estado de Veracruz (Figura 10). El uso de este tipo de material se ha vuelto muy popular (Ordoñez, 1999) por poseer propiedades físicas y mecánicas que la hacen un material óptimo para la construcción (Cuadro 3). Es importante mencionar que el bambú tiene una tasa de crecimiento superior a cualquier especie maderable, y que alcanza su madurez en un tiempo de 5-6 años. Por las características antes mencionadas, el bambú es un material viable para su uso de secadoras solares en las zonas donde se cultiva el café

Cuadro 3. Propiedades del bambú en comparación a otros materiales.

MATERIAL	RESISTENCIA DE DISEÑO (R) (KG/CM <sup>2</sup> )	MASA POR VOLUMEN (M) (KG/CM <sup>3</sup> )	RELACION DE RESISTENCIA (R/M)	MODULO DE ELASTICIDAD (E) (KG/CM <sup>2</sup> )	RELACION DE RIGIDEZ (E/M)
Concreto	82	2400	0.032	127400	53
Acero	1630	7800	0.209	2140000	274
Madera	76	600	0.127	112000	187
Bambú	102	600	0.170	203900	340

Tomado de: <http://www.ingersoll-rand.com/compair/ap-may97/bamb-4.htm>.

Álvarez (2002) menciona que el bambú guadua (*G. angustifolia*) tiene potencial para utilizarse con éxito en la solución de muchos problemas relacionados con: la alimentación, producción de etanol, alcohol, celulosa, fabricación de papel, carbón, usos medicinales, bosques protectores, y sobre todo en la construcción para viviendas. Sin embargo, su atractivo principal es su bajo costo de producción, la siembra se estima en USD\$ 197 dólares/ha y el manejo de USD\$ 185 dólares/ha, con rendimientos de 4-7 ton/ha (Ordoñez 1999).



Figura 10. Plantación de bambú en Orizaba, Veracruz.

El SICAMAGE (2004) señala algunas otras ventajas de construir con bambú guadua:

- Sus extraordinarias características físicas permiten su empleo en todo tipo de miembros estructurales.
- Su forma circular y su sección hueca lo hacen un material liviano, fácil de transportar y de almacenar.
- En cada uno de los nudos existe un tabique o pared transversal que además de hacerlo más rígido y elástico evita su ruptura al curvarse.
- La constitución de las fibras de sus paredes permite que pueda ser cortado transversal o longitudinalmente en piezas de cualquier longitud.
- Su superficie natural es lisa, limpia, de color atractivo y no requiere ser pintada, raspada o pulida.
- No tiene corteza o partes que puedan considerarse como desperdicio
- Además de usarse como elemento estructural el bambú puede usarse como tuberías para el transporte de agua y en pequeñas secciones para drenaje.
- Puede emplearse en combinación con todo tipo de materiales de construcción como elementos de refuerzo.
- Se pueden obtenerse diversos materiales para enchapes tales como esteras, paneles contrachapados, etc.
- Es el material de construcción de más bajo precio.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describen las siguientes etapas: ubicación, diseño, construcción y evaluación de los tres modelos de secadores solares tipo invernadero.

### 5.1 Ubicación

La investigación se realizó en el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. (Carretera Federal Córdoba-Veracruz, Km 348). El área donde se construyeron los modelos de secadores solares estuvo ubicado a 660 msnm y geográficamente N:  $18^{\circ}5'26.14''$  y O:  $96^{\circ}51'38.32''$ .



Figura 11. Localización del área dentro del Campus Córdoba donde fueron construidos los secadores solares.

## 5.2 Diseño de los modelos

Se describe el diseño de la cama de secado (malla), el tipo de bambú que se utilizó en el experimento y las dimensiones del secador, el diseño de los ensambles (uniones de los bambúes), los tipos de plásticos utilizados y el sistema de circulación de aire.

### 5.2.1 Cama de secado

Las camas de secado consistieron en módulos rectangulares de 2 m de largo por 1 m de ancho. Fueron elaboradas con malla galvanizada de entramado cuadrado de 0.4 cm. Los bastidores fueron construidos con peinazo galvanizado de 2 pulgadas. Para los soportes de las camas se utilizó peinazo galvanizado de 3 pulgadas y 50 cm de alto. En cada una de las esquinas de la cama se colocaron unos salientes verticales de 5 cm de longitud, hechos con peinazo de 2 pulgadas, lo que permite colocar una cama sobre otra. Tanto los soportes como la malla se unieron al bastidor mediante pijas autoajustables.

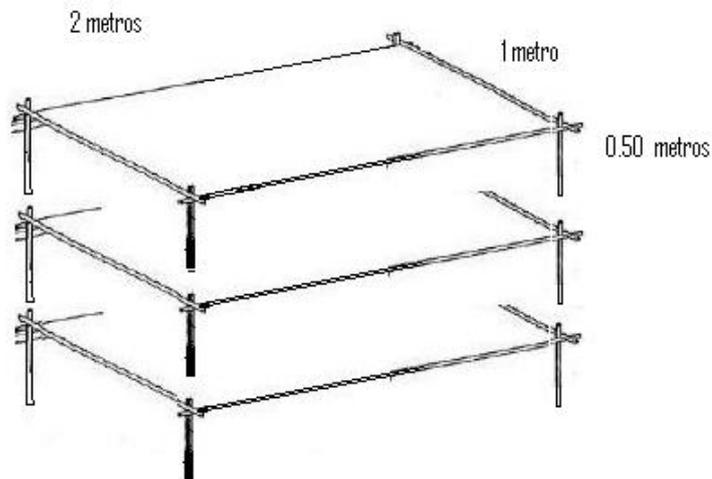


Figura. 12. Camas de secado.

### 5.2.2 Tipo de bambú

El bambú utilizado en la construcción de los secadores solares es la especie *Guadua angustifolia*.

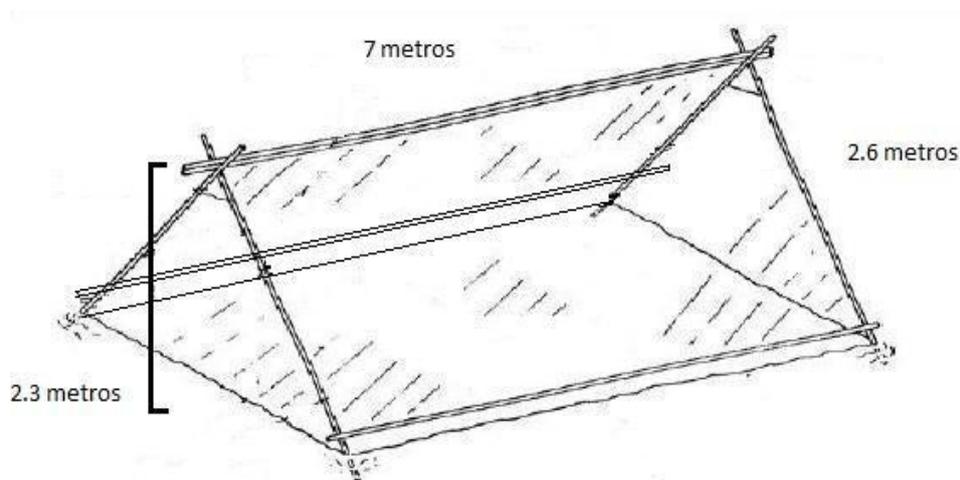
### 5.2.3 Sistema de circulación de aire

El aire entra al secador por la parte inferior de las paredes laterales, donde se dispone de una ventana longitudinal de 0.23 m de ancho por lo largo de la pared. Esta abertura está cubierta de malla mosquitera, para evitar la entrada de fauna a las cámaras de secado. Para incrementar la circulación natural del aire dentro de los secadores solares, se utilizaron aletas de calentamiento, de  $1\text{m}^2 \times 0.2\text{m}$  de altura, construidas a base de madera y plástico. Además, se realizaron dos aberturas superiores en el plástico de  $0.5 \times 0.5 \text{ m}$  en los tres modelos, lo anterior para facilitar la salida de aire caliente y húmedo.

### 5.2.4 Diseño de los modelos de secadores solares

Se construyeron tres modelos con las siguientes características:

- 1) **Modelo Í TriangularÍ**. Consiste en una figura geométrica tipo prisma, con ambos lados frontales en forma de triángulo equilátero de 2.6 metros de lado y una altura de 2.3 m. La longitud de los lados laterales fue de 7 m.



Fig

ura 13. Diseño del secador solar modelo "Triangular"

- 2) **Modelo Í Una aguaÍ**. La altura de su pared más alta es de 2.5 m, la altura mínima de la pared frontal es de 1.8 m, el ancho de 3.43 m y la longitud de las paredes laterales de 7 m (Figura 14).

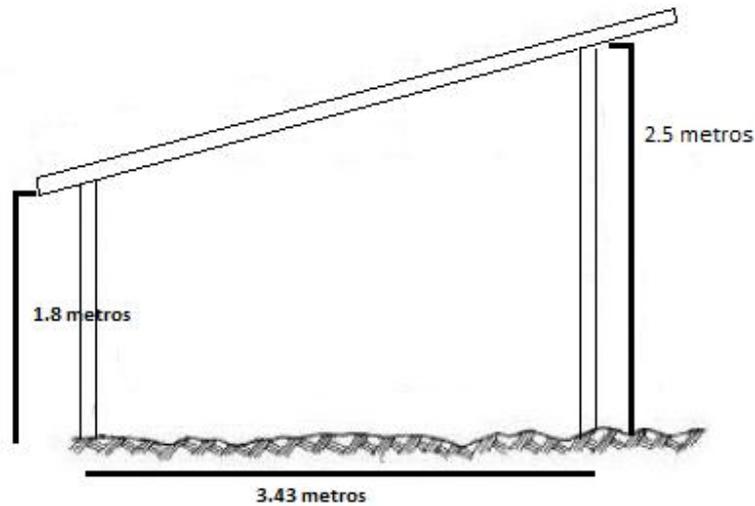


Figura 14. Vista frontal del secador solar modelo "Un agua".

3) **Modelo "Dos aguas"**. La altura de sus paredes laterales fue de 1.8 m. Al centro mide 2.5 m, de ancho de 3.96 m y una longitud de 7 m.

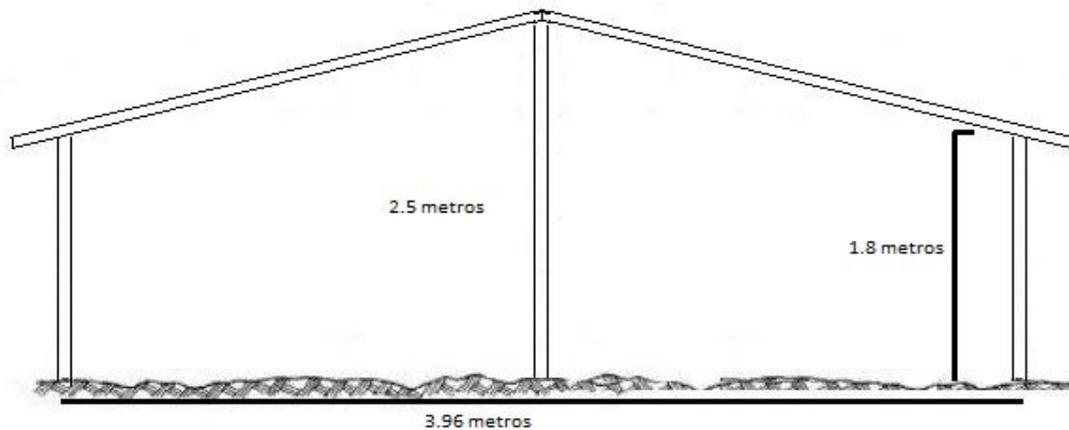


Figura 15. Corte transversal del modelo "Dos aguas".

### 5.2.5 Diseño de los ensambles

Para los ensambles se utilizó tubo galvanizado cedula 30 de 1.5 pulgadas de diámetro. Se cortaron piezas de 0.2 m y se unieron utilizando soldadura (ver lista de materiales).

### **5.2.6 Tipo de plástico**

Se utilizó lámina de polietileno calibre 800, de 8 m de ancho y con protección a los rayos ultravioleta.

### **5.3 Construcción de los modelos**

La construcción de los modelos se llevó a cabo en un área de 30 x 20 m, cercana al área de beneficio de café. El terreno fue nivelado y aplanado. Los modelos de secadores solares fueron construidos de manera que el sol les diera por las paredes laterales la mayor parte del día y tomando en cuenta la dirección de circulación del aire.

### **5.4 Evaluación de los modelos**

En la evaluación de los tres modelos de secadores solares se utilizó grano proveniente de la plantación experimental de café (*C. arabica*) propiedad del Campus Córdoba. El fruto cosechado fue inmediatamente despulpado, fermentado en tanques de concreto y lavado en botes plásticos de 200 L de capacidad. Posterior a su lavado, se dejó escurrir por un periodo de media hora para eliminar el exceso de agua. Finalmente, se procedió a colocar el grano de café en las camas de secado. Del total de camas de secado por modelo, se seleccionaron al azar tres por nivel y en ellas se evaluó el secado del grano. Con la finalidad de tener datos suficientes para detectar diferencias entre modelos y entre niveles dentro de un mismo modelo, se realizaron tres ensayos independientes.

Cada tres horas se evaluaron los siguientes parámetros:

- a) Temperatura ambiente.
- b) Temperatura interior del secador a tres niveles (0.5 m, 1.0 m y 1.5 m respectivamente).
- c) Pérdida de humedad del grano por nivel.

La evaluación finalizó cuando en algún nivel el grano alcanzó el 12% de humedad.

#### 5.4.1 Colocación del grano de café en las camas de secado

En cada una de las camas elegidas al azar se colocó y distribuyó uniformemente la cantidad de 9.48 kg de de café, los cuales fueron pesados en una báscula móvil marca Torrey.



Figura 16. Pesado del grano de café utilizando una báscula Torrey.



Figura 17. Colocación y distribución de los granos de café en las camas.

#### 5.4.2 Toma de muestra

Se diseñó un formato para captura de datos (anexo 3), en el cual se registró el contenido de humedad relativa externa e interna de cada uno de los modelos, así como la temperatura externa a la sombra y la interna a 0.5, 1.0 y 1.5 m de altura, respectivamente. Se utilizaron termómetros electrónicos (Grow Bright Thermometer / Hygrometer) y termómetros de mercurio.



Figura 18. Toma de datos de temperatura en las camas y la humedad relativa.

El muestreo consistió en tomar, con las yemas de los dedos, una cantidad de granos en diferentes puntos de cada una de las tres camas del mismo nivel. La muestra por cama era de 8 onzas. En total, por nivel, se tiene una muestra compuesta de 24 onzas, la cual fue depositada en una bolsa ziploc. El aire contenido en el interior de la bolsa fue retirado manualmente realizando un doblez. La bolsa fue sellada inmediatamente para evitar que el grano absorbiera humedad del ambiente. Este procedimiento se repitió en cada uno de los tres modelos de secadores solares, durante el periodo de muestreo.

Cada una de las bolsas conteniendo la muestra de café fue marcada con un código de ocho dígitos (Figura 19), con el fin de reconocer su origen.



Figura 19. Ejemplo de código impreso en la superficie de las bolsas que contenían las muestras.

### 5.4.3 Análisis de las muestras

Las muestras contenidas en las bolsas fueron trasladadas al laboratorio de café donde se aleatorizó, mediante el paquete estadístico  $R+$ , el orden de análisis de las mismas.



Figura 20. Muestras ordenadas al azar

#### 5.4.4 Morteado

El morteado consistió en colocar los granos contenidos en cada bolsa en una morteadora (SIEMENS, tipo 1RF3 054-4YC31) con la finalidad de eliminar el pergamino del grano.



Figura 21. Morteadora de grano.

#### 5.4.5 Pesado de la muestra a analizar

Una vez que se obtuvo el grano en verde (sin pajilla o pergamino), se procedió a pesar la cantidad de 10g. La cuantificación del peso se realizó utilizando un equipo Bernar max 2000g/80 oz.



Figura.22. Bascula utilizada para pesar los 10 g de grano a analizar.

#### 5.4.6 Reducción de partícula

Con la finalidad de reducir el tiempo requerido para determinar la humedad del grano, se procedió a reducir el tamaño de partícula de los 10 gramos pesados anteriormente. Se utilizó una licuadora de la marca DRINK MACHINE de VITA-MIX. El equipo se programó para que triturara los granos por treinta segundos a una máxima velocidad. El proceso de triturado se repitió dos veces en cada una de las muestras.



Figura 23. Procedimiento y equipo utilizado en la trituración del grano.

#### 5.4.7 Determinación de humedad

Del grano triturado se tomaron alrededor de 2.500 g, que fueron colocados en la charola del analizador halógeno de humedad HG63 marca METTLER TOLEDO.



Figura 24. Determinador halógeno de humedad.

#### **5.4.8 Registro de datos**

El determinador de humedad requirió entre 7 y 14 minutos para procesar una muestra, dependiendo del contenido inicial de humedad del grano. Los datos se registraron en la hoja de recolección de datos y se pasaron posteriormente a una hoja de cálculo, en Excel.

#### **5.4.9 Análisis estadístico**

Para determinar si existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los modelos, en sus diferentes niveles, o niveles dentro de un mismo modelo, se utilizó el procedimiento ANOVA, mediante el software Statistica 7.0.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ninguno de los modelos evaluados en este trabajo ha sido reportado antes en la literatura, por lo que comparar su eficiencia en otras condiciones ambientales queda para trabajos posteriores. Así mismo, por la estacionalidad de la cosecha y por disponibilidad de materia prima, no fue posible evaluar diferentes cargas en las camas de secado.

Los resultados que se presentan corresponden a las condiciones de humedad del grano, prevalecientes en cada uno de los niveles, al momento que se detectó que alguno de ellos tenía una humedad menor o igual al 12%. En cada ensayo, las 27 camas de los tres modelos fueron cargadas, al mismo tiempo, con café escurrido; por lo que el efecto de la temperatura y de la humedad relativa del ambiente fue el mismo para los tres modelos.

El trabajo no tenía la intención de estudiar la dinámica del secado, por lo que el flujo de aire al interior de los modelos no fue cuantificado. Si el lector está interesado en esta información puede consultar a Leopold *et al.* (2003), entre otros trabajos. Lo que se hizo fue el diseño, construcción y evaluación de modelos de secadores solares para café pergamino, que son de bajo costo (\$9,000.00 incluyendo las camas de secado), de fácil construcción, operación y amigables con el medio ambiente.

### 6.1 Diseño y construcción de modelos de secadores solares

El diseño de los modelos se realizó considerando las propuestas reportadas en la literatura, la disponibilidad de los materiales de construcción, incluyendo la máxima dimensión de la película de polietileno que se tenía disponible en el mercado local, las condiciones climáticas del lugar, el disponer de una altura que permitiera caminar cómodamente y colocar tres camas sobrepuestas dentro de las cámaras de secado.

Fueron diseñados tres modelos de secadores solares: Un agua (Altura mayor de 2.5 m, altura menor de 1.8 m, ancho de 3.43 m y longitud de 7 m), Dos aguas (Altura paredes laterales 1.8 m, altura al centro de 2.5 m, ancho de 3.96 m y longitud de 7 m) y Triangular (con lado frontal en triángulo equilátero de 2.6 metros de lado, una altura de 2.3 m. La longitud será de 7 m).



Figura 25. Construcción de modelos: Un agua, Dos aguas y Triangular.

Los tres modelos fueron construidos con estructura de bambú (*G. angustifolia*) y cubierta de plástico calibre 800 de 8 m de ancho, con protección UV. En la parte baja de las paredes laterales se colocó la entrada de aire a la cámara de secado, incluyendo el empleo de 7 aletas de calentamiento, de 1 m x 1 m x 0.2 m de alto, en cada uno de los tres modelos evaluados.

Las uniones o vértices de las estructuras están atornilladas a ensambles tubulares, por lo que la estructura es desmontable. Además, no está anclada al suelo, por lo que es movable.



Figura 26. Estructura del secador solar modelo Dos aguas.

La construcción de los tres modelos permite hacer algunas anotaciones. El modelo más difícil de construir es el "Dos aguas", por requerir una mayor cantidad de ensambles. Sin embargo, es el que tiene mayor estabilidad al movimiento y soporta mejor las corrientes de aire. Sus dimensiones parecen adecuadas. El modelo de "Una agua" es de dificultad intermedia en su construcción, es el más inestable en cuanto a movimiento y parece el más susceptible a las corrientes de aire. Si desea usarlo, es recomendable incluir dos postes intermedios en lugar de uno, esto por ambos lados de las paredes laterales e incluyendo dos bambúes intermedios en el techo; ya que se observó acumulación de agua en la parte superior. El modelo más fácil de construir es el "Triangular", requiere de menos ensambles y tiene mayor estabilidad al movimiento. Si se quiere reproducir este modelo, se recomienda que los lados frontales sean de 3.0 metros, en lugar de 2.6 m, debido a que la canaleta de sujeción de la película plástica viene de 3.0 metros.

En la evaluación de los modelos se observó que es muy importante el sistema de aireación, por lo que se recomienda mejorarlo en otros diseños.

## 6.2 Evaluación de los modelos de secadores solares

Para la evaluación de los modelos de secadores solares se realizó un estudio de la capacidad de secado por modelo y por nivel, considerando como punto de comparación, el contenido de humedad a que se encontraban los niveles de todos los modelos al momento que uno de ellos registró una humedad del grano igual o menor al 12%.

Cuadro 4. Descriptivo del contenido de humedad de cada nivel.

Nivel y modelo		Media	Intervalo de confianza para la media al 95%	
			LI	LS
<b>Nivel 1 (0.5 m)</b>	Un agua	22.81	10.01	35.61
	Dos aguas	19.27	10.33	28.20
	Triangular	22.06	12.92	31.20
	Total	21.38	18.32	24.44
<b>Nivel 2 (1.0 m)</b>	Un agua	17.45	12.28	22.63
	Dos aguas	15.10	7.31	22.89
	Triangular	17.33	8.25	26.41
	Total	16.63	14.43	18.83
<b>Nivel 3 (1.5 m)</b>	Un agua	13.61	10.09	17.14
	Dos aguas	11.38	8.96	13.79
	Triangular	11.21	9.95	12.47
	Total	12.07	10.94	13.20

La evaluación se llevó a cabo durante los meses de diciembre 2010 a febrero 2011. Se realizaron tres ensayos completos, utilizando café de la variedad %Oro Azteca+. Cada ensayo requirió de tres quintales de café cereza (alrededor de 750 kg). El café despulpado, fermentado, lavado y escurrido se colocó y extendió homogéneamente en cada una de las tres camas de secado, seleccionadas al azar por nivel en cada uno de los modelos evaluados. Para el modelo triangular no fue necesaria la selección de camas, dado que su capacidad es de nueve, tres por nivel.

### 6.2.1 Comparación entre niveles para un mismo modelo

El análisis de varianza nos indica que en cada modelo, al menos un nivel es diferente a los otros dos ( $p < 0.05$ ), en cuanto al contenido de humedad (Cuadro 5).

Cuadro 5. ANOVA del contenido de humedad por nivel.

Modelo		Suma de Cuadrados	gl.	Cuadros Medios	F	Sig.
Un agua	Inter-grupos	128.115	2	64.058	5.840	.039
	Error	65.814	6	10.969		
	Total	193.929	8			
Dos aguas	Inter-grupos	93.476	2	46.738	5.912	.038
	Error	47.437	6	7.906		
	Total	140.914	8			
Triangular	Inter-grupos	177.654	2	88.827	9.810	.013
	Error	54.326	6	9.054		
	Total	231.980	8			

Al revisar los datos, se observa que el nivel que alcanza un porcentaje de humedad menor o igual al 12% con mayor rapidez, es el nivel superior (1.5 m de altura), de manera consistente en cada uno de los tres modelos evaluados.

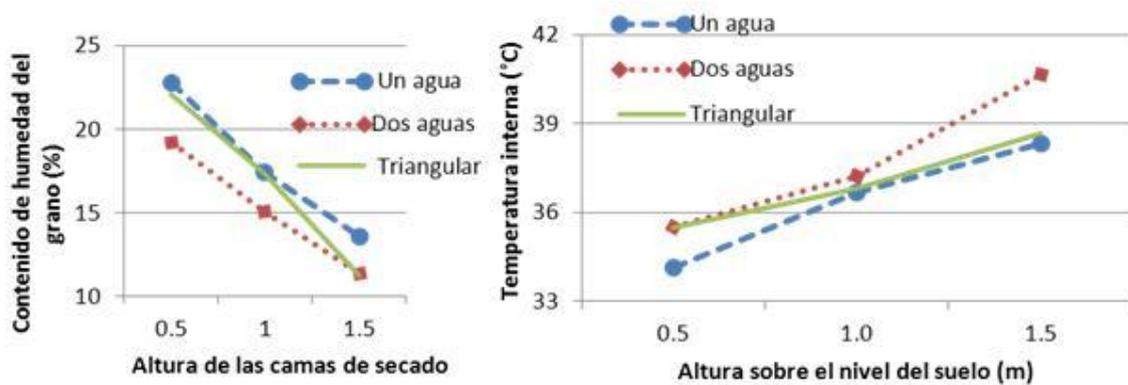


Figura 27. Humedad media por nivel y modelo.

El grano de café del nivel intermedio (1 m de altura), es el segundo en alcanzar la humedad requerida. Aunque no se encontraron diferencias significativas (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ) entre los niveles superior e intermedio para un mismo modelo. El nivel inferior (0.5 m de altura), es el último en llegar al contenido de humedad requerido. No obstante, los datos muestran que no hay diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) de este nivel con el nivel intermedio para ninguno de los tres modelos evaluados. Sin

embargo, se encontró diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre los niveles inferior y superior en los tres modelos evaluados.

Cuadro 6. Separación de medias por Tukey.

Modelo	Tratamiento Nivel (I)	Tratamiento Nivel (J)	Diferencia de medias (I-J)	Sig.
Un agua	0.5 m	1.0 m	5.36000	.197
		1.5 m*	9.20000	<b>.033</b>
	1.0 m	0.5 m	-5.36000	.197
		1.5 m	3.84000	.390
	1.5 m	0.5 m*	-9.20000	<b>.033</b>
		1.0 m	-3.84000	.390
Dos aguas	0.5 m	1.0 m	4.16667	.243
		1.5 m*	7.89000	<b>.032</b>
	1.0 m	0.5 m	-4.16667	.243
		1.5 m	3.72333	.308
	1.5 m	0.5 m*	-7.89000	<b>.032</b>
		1.0 m	-3.72333	.308
Triangular	0.5 m	1.0 m	4.73333	.212
		1.5 m*	10.85333	<b>.011</b>
	1.0 m	0.5 m	-4.73333	.212
		1.5 m	6.12000	.103
	1.5 m	0.5 m*	-10.85333	<b>.011</b>
		1.0 m	-6.12000	.103

\* Diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) del nivel J con el respectivo nivel I.

### 6.2.2. Comparación entre modelos para un mismo nivel

La tabla del análisis de varianza nos indica que alguna diferencia entre modelos solo se pueden sostener, con una confianza del 94%, para el nivel superior (1.5 m del nivel del suelo) de las camas de secado.

Cuadro 7. ANOVA del contenido de humedad entre modelos para un mismo nivel.

Nivel	F. V.	Suma de Cuadrados	gl.	Cuadros Medios	F	Sig.
0.5 m	Inter-grupos	20.963	2	10.481	0.593	0.582
	Error	106.035	6	17.673		
	Total	126.998	8			
1.0 m	Inter-grupos	10.526	2	5.263	0.573	0.592
	Error	55.104	6	9.184		
	Total	65.631	8			
1.5 m	Inter-grupos	10.806	2	5.403	5.036	0.052
	Error	6.437	6	1.073		
	Total	17.243	8			

Al realizar la separación de medias por Tukey ( $\alpha = 0.10$ ), se observa que para el nivel tres, el modelo triangular y el de una agua son estadísticamente diferentes en cuanto al secado del café pergamino. El nivel superior del modelo triangular seca más rápidamente. El modelo de ~~dos~~ <sup>dos</sup> aguas es igualmente eficiente en el secado que los otros dos modelos.

Cuadro 8. Subgrupo homogéneo nivel superior (1.5 m de altura).

Modelos	N	Subconjunto para alfa=0.10	
		A	B
Triangular	3	11.2100	
Dos aguas	3	11.3767	11.3767
Una agua	3		13.6133

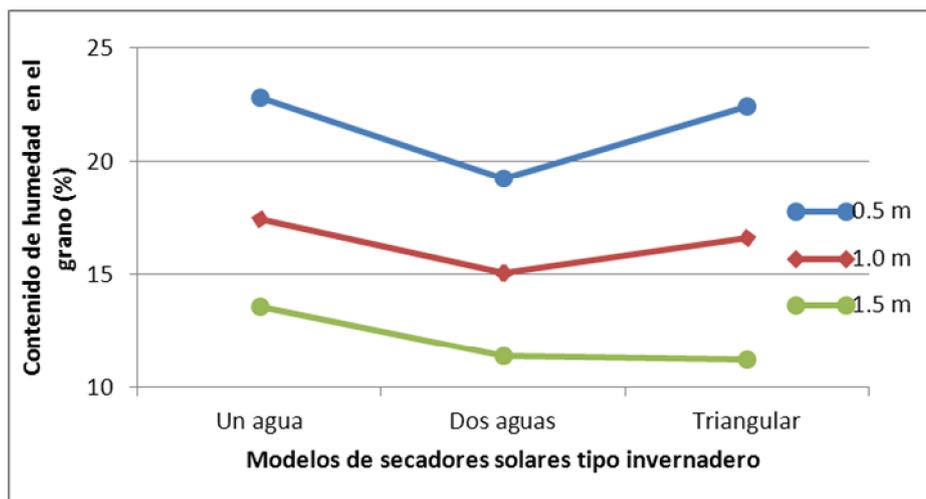


Figura 28. Humedad media en cada modelo por nivel.

### 6.2.3 Relación entre humedad relativa interna y humedad del grano

La humedad del ambiente está directamente asociada con la pérdida de humedad del grano. A menor humedad relativa interna (HRI), mayor pérdida de humedad en el grano de café. A mayor temperatura del aire, menor humedad relativa. A continuación se grafica el contenido de humedad relativa al interior de cada

modelo y su relación con la humedad del grano en sus diferentes niveles (HG N1, HG N2, HG N3).

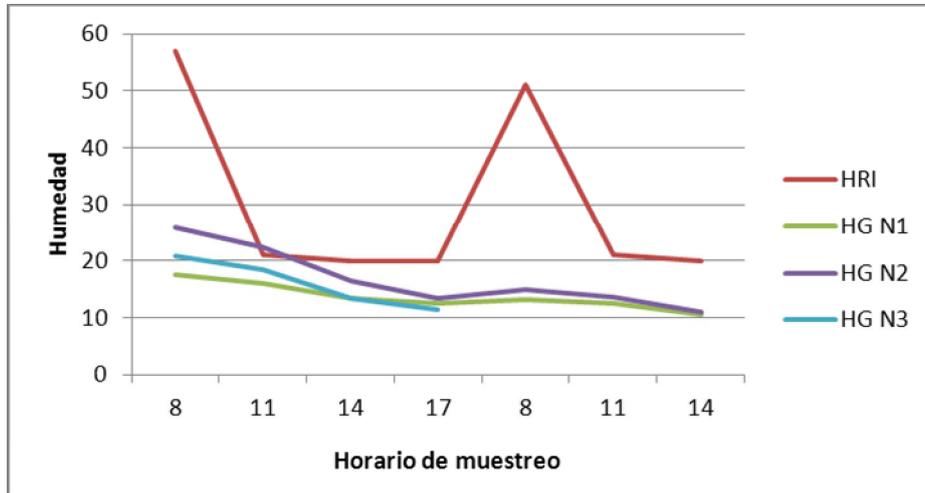


Figura 29. Relación de humedad del grano con humedad relativa interna en modelo %In agua+

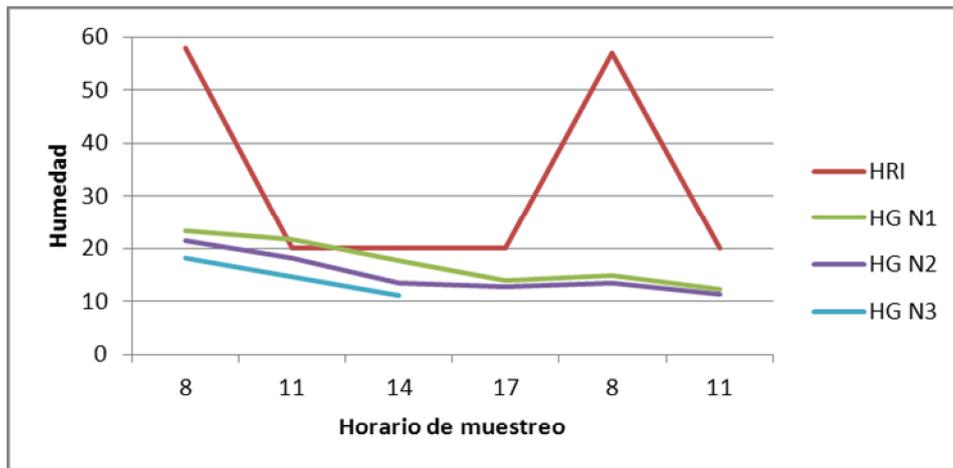


Figura 30. Relación de humedad del grano con humedad relativa interna en modelo %Dos aguas+

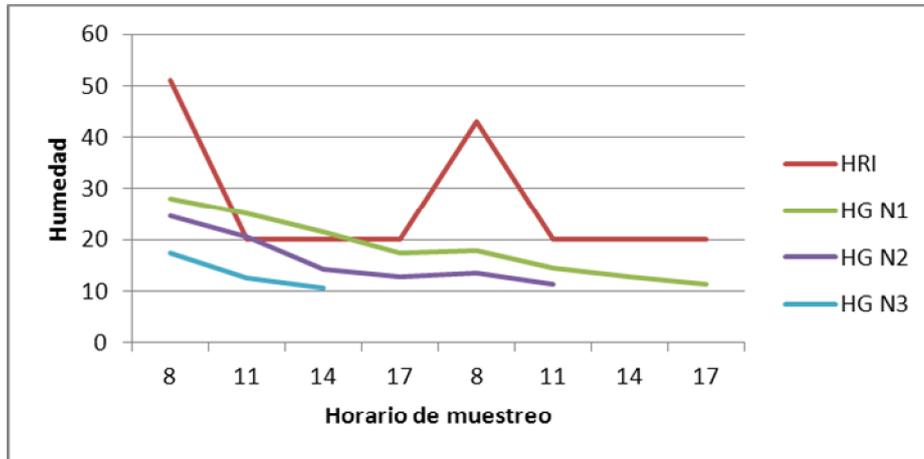


Figura 31. Relación de humedad del grano con humedad relativa interna en modelo triangular.

Como podemos observar en las figuras anteriores, al aumentar la humedad relativa, aumenta ligeramente el contenido de humedad del grano, independientemente del nivel en que se encuentre.

## 7. CONCLUSIONES

Conforme los objetivos del trabajo, las hipótesis planteadas y los resultados obtenidos, se puede concluir que:

El café pergamino se seca igualmente dentro de un modelo de secador solar, independientemente del nivel sobre el suelo en que se coloque la cama de secado.

Los secadores solares tipo invernadero son una alternativa viable para el secado del café pergamino. Los tres modelos propuestos fueron capaces de secar café pergamino hasta un contenido de humedad igual o menor al 12%. Dependiendo de las condiciones climáticas, el tiempo de secado varía de 3 a 12 días.

Los tres modelos de secadores solares tipo invernadero propuestos en este trabajo son igualmente eficientes ( $p < 0.05$ ) en el secado del café pergamino. La única diferencia significativa ( $p < 0.10$ ) que puede establecerse entre ellos, es si se compara el desempeño del nivel superior (1.5 m de altura) entre los diferentes modelos. En este caso, puede afirmarse ( $p = 0.052$ ) que el nivel superior del modelo triangular seca más rápido el café pergamino que el nivel superior del modelo en forma de agua.

El nivel sobre el suelo en que se coloca la cama de secado, dentro de los secadores solares tipo invernadero, tiene una influencia significativa ( $p < 0.05$ ) en el tiempo de secado del café pergamino. Entre más cercana al techo se encuentre la cama de secado, menor será el tiempo requerido para que el café pergamino alcance una humedad igual o menor al 12%.

Se recomienda una segunda parte del trabajo, donde se evalúen diferentes cargas de café pergamino por modelo y diferentes mecanismos para facilitar la aireación del grano.

## 8. LITERATURA CITADA

- Álvarez, M. (2002). Plantemos Bambú Guadua para cosechar casas. Eco portal. [www.ecoportel.net](http://www.ecoportel.net).
- ASOCIACIÓN NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR, A. C. (2005). La tecnología solar. *La revista solar*. 4-10p.
- Berrueta, S.V., Limón, A.F., Fernández. Z. J. y Soto, P.M. (2003). Participación
- CEFP (2001). El Mercado del café en México. *Centro de estudios de la finanzas publicas*. Cámara de diputados. 054. 3p
- CERTIMEX (2009). Normas para la producción, procesamiento y la comercialización de productos ecológicos. *CERTIMEX - 01- 2009*. 39p.
- Cruz, D. (2008). Secadoras solares tipo domo para café pergamino, la experiencia en Huehuetenango, Guatemala C.A. *café y caffè*.7p
- Danish Technological Institute (DTI). (2002). *Test of Solar Dryers in Ghana*. Jensen, O.S. & Kristensen, S.E. (Editors). Denmark.
- Duran, J., Godfrin, E. (2004). Aprovechamiento de la energía solar en la Argentina y en el Mundo. *Boletín energético #16*. 44p.
- Fajardo, P.I., Sanzu, J.R. (2003). Evaluación de la calidad física del café en los proceso de beneficiado húmedo tradicional y ecológico. *Cenicafe*. 54(4) 286p.
- Garcia, T.(2010) Quintal de café, a 230 dólares. *El Sol de Córdoba*.26 de octubre del 2010.[www.oem.com.mx/elsoldecordoba/notas/n1832015.htm](http://www.oem.com.mx/elsoldecordoba/notas/n1832015.htm)
- Green, M.G. & Schwarz, D. (2001). Solar drying equipment: notes on three driers. Infogate. July 2001. Pag. 1-5.
- Juárez de Sousa e Silva. Secado de café. (2003). [www.post-colheita.com.br](http://www.post-colheita.com.br). *post-colheita*.2 p.
- Kamaruddin, A. (2007). Disemination of GHE solar dryer in Indonesia. *ISESCO Science and Technology Vision*. 3(3)102-105.

- Leopold, O.N., Kamaruddin, A. & Dyah, W. (2003). Study on *Solar Dryer with Rotating Rack for Cocoa Beans*. Environmental of Research Center, Bogor Agricultural University. Indonesia.
- Lopez, E. (2010). Secado de café en lecho fluidizado. *Revista ingeniería e investigación*. 26(1).25p
- O'Ryan, R., Larra, L. (2003). Contaminación del aire en Santiago: Estado actual y Soluciones. *Perspectivas en política economía y gestión*. 4(1):7p
- Ordoñez, V. (1999). Perspectiva del bambú para la construcción en México. *Madera y bosque*. Vol.5. 5-7p
- Oti-Boateng, P., Axtell, B. (1998). Técnicas de secado. *Libro de consulta sobre tecnologías aplicadas al ciclo alimentario*. (2). 70p
- Paswan, M.K. & Mohit. (2010). Experimental analysis of solar dryers. *Arab Research Institute for Science and Engineering*. (1)1-9.
- PROARCA (1994). Manual de buenas practicas operativas de producción mas limpia en el sector beneficiado de café. [www.proarca.org](http://www.proarca.org). 15-16 p.
- Restrepo, V.H., Burbano, J.J. (2005). Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos. *Scientia Et Technica*. 11(27)127-132.
- Roa, M., Oliveros, C., Ramírez C. (2000). Utilice la energía solar para secar correctamente el café. *CENICAFE*. (281).2p
- Sampaio, C.P. , Nogueira, R. M. , Roberto , Silva J. S. (2007). Development of a dryer pneumatic system for grain movement. *Biosystem engeneering*. (98) 33-38
- SICAMAGE (2004). Servicio de información y censo agropecuario del ministerio de agricultura y ganadería del Ecuador. URL <http://web.catie.ac.cr/guadua/usos.htm>).
- Toledo, V. M., Moguel, P. (1996). En busca de u café sostenible en Mexico: LA IMPORTANCIA DE LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA Y CULTURAL. *Ponencia presentada al Primer Congreso del Café Sostenible. Smithsonian Migratory Bird Center Washington, D.C., septiembre 16-18, 1996*

## 9. ANEXOS

### ANEXO 1. Materiales

#### Presupuestos para la elaboración de camas de secado

Cantidad	Unidad	Concepto	Subtotal (\$)
1	pza.	Peinazo de 2" para el bastidor (la pieza tiene 6 m de longitud)	90
2	m <sup>2</sup>	Malla 0.5 cm	50
2	m	Peinazo de 3" para soportes	65
4	pza.	Peinazo de de 2" y 5 cm de longitud	5
1		Mano de obra para construir la cama	30
6	m	Solera de 1 cm de ancho	20
14	pza	Pija de media pulgada	10
TOTAL X CAMA			270
NUM. DE CAMAS TOTAL = 45		TOTAL X CAMAS	12150
Aletas de calentamiento			
20m plástico			300
Mano de obra			675
Madera de pino			2700
			TOTAL X ALETAS
			3675

ANEXO 2. Presupuestos para la elaboración de Modelos.

Modelo Triangular.

Cantidad	Unidad	Concepto	Subtotal (\$)
8	pza	Bambú de 2.6 m	56
6	pza	Bambú de 3.4 m	48
1	pza	Bambú de 7.0 m	15
4	pza	Ensamble de base (equilátero), con anillo de sujeción al suelo	160
2	pza	Ensamble superior en equis	80
2	pza	Ensamble en T, para unión inferior intermedia	80
1	pza	Ensamble sup. Interm. Tubo con dos salientes a la mitad en ángulo de 90° entre ellos	40
42	m2	Plástico calibre 720 (6 metros) para cubierta superior	700
18	m2	Plástico calibre 720 para lados frontal y posterior	300
21	m2	Velo térmico para el piso	64
21	m2	Plástico negro para el piso	105
36	pza	Tornillo de 6 pulgadas con dos rondanas y tuerca	360
50	m	Canaleta y zigzag para fijar plástico	250
<b>TOTAL MODELO TRIANGULAR</b>			<b>2258</b>

Modelo un agua.

Cantidad	Unidad	Concepto	Subtotal (\$)
4	pza	Ensamble de base de 3 segmentos con 90° entre cada uno de ellos, con arillo de sujeción	160
2	pza	Ensamble en T, para unión inferior intermedia, con arillo de sujeción	80
2	pza	Ensamble superior de altura menor con 3 segmentos, dos en ángulo de 90° y el tercero en ángulo de 90° con un segmento y 101.5° con el otro	80
1	pza	Ensamble superior intermedio de altura menor con 4 segmentos. Los 3 primeros formando una T y el cuarto en ángulo de 101.5° respecto al segmento intermedio	40
2	pza	Ensamble superior de altura mayor con 3 segmentos, dos en ángulo de 90° y el tercero en ángulo de 90° con un segmento y 78.5° con el otro	80
1	pza	Ensamble superior intermedio de altura mayor con 4 segmentos. Los 3 primeros formando una T y el cuarto en ángulo de 78.5° respecto al segmento intermedio	40
3	pza	Bambú de 1.8 m	15
3	pza	Bambú de 2.5 m	18
2	pza	Bambú de 3.43 m	16
11	pza	Bambú de 3.5 m	88
55	m2	Plástico calibre 720 (6 metros) para cubierta	1000
24	m2	Plástico calibre 720 para lados frontal y posterior	400
28	m2	Velo térmico para el piso	64
28	m2	Plástico negro para el piso	105
48	pza	Tornillo de 6 pulgadas con dos rondanas y tuerca	480
60	m	Canaleta y zigzag para fijar plástico	300
<b>TOTAL MODELO UNA AGUA</b>			<b>2966</b>

Modelo dos aguas.

Cantidad	Unidad	Concepto	Subtotal (\$)
4	pza	Ensamble de base de 3 segmentos con 90° entre cada uno de ellos, con arillo de sujeción al suelo	160
6	pza	Ensamble en T para unión inferior intermedia, con anillo de sujeción	240
4	pza	Ensamble superior con 4 segmentos, los 3 primeros en ángulo de 90° entre cada uno de ellos y el cuarto, colocado por fuera del cubo formado por los 3 primeros segmentos, en ángulo de 19.5° con respecto a cualquiera de los segmentos anteriores	160
4	pza	Ensamble superior intermedio con 5 segmentos. Los 3 primeros formando una T, los 2 últimos en ángulo de 19.5°. Unir la parte de 2 segmentos a la T, cuidando se formen ángulos rectos entre las dos partes	160
2	pza	Ensamble superior con 4 segmentos. Los 3 primeros con ángulos interiores de 70.5°. El cuarto segmento en ángulo de 90° con los tres segmentos anteriores	80
2	pza	Ensamble superior intermedio con 5 segmentos. Los 3 primeros con ángulos interiores de 70.5°. Los otros 2 segmentos formando ángulos rectos con los 3 primeros y un ángulo de 180° entre ellos.	80
2	pza	Ensamble de 5 segmentos. Los primeros 4 en X de 90°. El quinto perpendicular a los 4 primeros	80
2	pza	Ensamble de 6 segmentos. Los 4 primeros en X de 90°. Los otros dos perpendiculares a los 4 primeros	80
12	pza	Bambú de 1.8 m	60
18	pza	Bambú de 2.3 m	108
12	pza	Bambú de 1.95 m	60
8	pza	Bambú de 2.1 m	48
4	pza	Bambú de 0.7 m	8
60	m2	Plástico calibre 720 (6 metros) para cubierta	1000
30	m2	Plástico calibre 720 para lados frontal y posterior	500
28	m2	Velo térmico para el piso	64
28	m2	Plástico negro (4 x 7 m)	105
110	pza	tornillo de 6 pulgadas con dos rondanas y tuerca	1100
70	m	Canaleta y zigzag para fijar plástico	350
TOTAL MODELO DOS AGUAS			4443

TOTAL PROYECTO

25492

Anexo 3.

**PROPUESTA Y EVALUACIÓN DE MODELOS DE SECADORES SOLARE**

**SHUMEDAD DEL GRANO**

Fecha:				hora:		
Modelo	Nivel	Peso de grano	Tiempo de secado	Temperatura de desecación	Programa de desecación	Porcentaje de humedad
Un-agua	Bajo					
	Medio					
	Alto					
Dos-aguas	Bajo					
	Medio					
	Alto					
Triangular	Bajo					
	Medio					
	Alto					

**TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE**

Fecha:			Hora:		
Modelo	Nivel	Temperatura Interior (°C)	Hum. Rel. Interior (%)	Temperatura Exterior (°C)	Hum. Rel. Exterior (%)
Un-Agua	Bajo				
	Medio				
	Alto				
Dos aguas	Bajo				
	Medio				
	Alto				
Triangular	Bajo				
	Medio				
	Alto				

MUESTREÓ: \_\_\_\_\_

ANALIZÓ: \_\_\_\_\_