

**“CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR
PARABÓLICO EN MATERIAL NO HIGROSCÓPICO”**

**MARÍA CATALINA BAHAMÓN MEDINA
JUAN CARLOS TORRES AROS**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
INGENIERIA AGRICOLA
NEIVA
2013**

**“CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE SECADOR SOLAR PARABÓLICO
EN MATERIAL NO HIGROSCÓPICO”**

**MARÍA CATALINA BAHAMÓN MEDINA
JUAN CARLOS TORRES AROS**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO AGRICOLA**

**Director
Ph.D. JOSE DUVAN HENAO CUELLAR**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
INGENIERIA AGRICOLA
NEIVA
2013**

Nota de aceptación

JOSE DUVAN HENAO CUELLAR
Director del trabajo

NESTOR CERQUERA PEÑA
Jurado

NELSON GUTIERREZ GUZMAN
Jurado

Neiva, Enero 2013.

DEDICATORIA

Este trabajo, se lo dedico a DIOS, por haberme permitido llegar hasta aquí y sobre todo por darme la vida a través de mis queridos PADRES.

Mis papitos, JAVIER BAHAMÓN y YOLANDA MEDINA, quienes creyeron en mi después de tanta espera; pero con mucho amor, esfuerzo y dedicación me sacaron adelante dándome ejemplos dignos de superación y entrega; además en gran parte gracias a ellos, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final. Va por ellos, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí una persona con valores para poder desenvolverme como; ESPOSA, MADRE Y PROFESIONAL.

Mis hermanas, PAULA CAMILA Y ANA CAROLINA, por estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar como profesional.

Mi esposo, DANEYSON CHARRY HORTA, el hombre que me entrego todo su amor y ha estado a mi lado dándome cariño, confianza y apoyo incondicional para seguir adelante y cumplir otra etapa en mi vida.

Mi HIJO, SAMUEL ALEJANDRO, que es el motivo y la razón que me ha llevado a seguir superándome día a día, para alcanzar mis más apreciados ideales de superación, él fue quien en los momentos más difíciles me dio su amor y comprensión para poderlos superar, quiero también dejarle una enseñanza que cuando se quiere alcanzar algo en la vida, no hay tiempo ni obstáculo que lo impida para poderlo LOGRAR.

Mi Familia (abuelas, tío y primos) porque con su apoyo sincero e incondicional confiaron siempre en mí y no los defraude.

Mi compañero de tesis, JUAN CARLOS, porque sin el equipo que formamos, no habiéramos logrado esta meta tan anhelada.

Mis mejores amigos, Juan Sánchez "Juanito" y Julián Bolaños "Mi Morenazo" por haberme brindado una amistad sincera llena de confianza y respeto por nosotros mismos.

*"La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar". **Thomas Chalmers***

María Catalina Bahamón Medina.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a DIOS. Gracias por darme la vida y brindarme las infinitas posibilidades para ser feliz. Gracias por la familia que tengo y por mis amigos.

A mi madre, EVELIA AROS, no encuentro palabras para decirte cuánto te amo y cuánto te agradezco todo lo que haces por mí. Porque tu interminable amor, tu entrega total, tus sufrimientos y tus desvelos, con nada se pagan. Perdóname por todas las angustias y malos ratos que te he hecho pasar, perdona mi intolerancia, mi negligencia, mi mal humor y mis arrebatos. Mamita preciosa, tú eres mi luz, mi timón, mi guía, mi camino, mi destino, mi inspiración, mi motivo, mi razón de vivir, mis ganas de hacer y mis deseos de ser. Eres todo para mí. Eres mi vida, porque sin ti nada sería de mí.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles por su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, mi padre, ANGEL TORRES (Q.E.P.D.). Sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mi vida, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

Juan Carlos Torres Aros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo expresan sus agradecimientos a:

Director Ph.D José Duvan Henao Cuellar, quien con su experiencia como docente ha sido la guía idónea, durante el proceso que ha llevado el realizar esta tesis, brindado el tiempo necesario, como la información para que este anhelo llegue a ser felizmente culminado.

Universidad Surcolombiana en la Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Agrícola, y en ella a los distinguidos docentes quienes con su profesionalismo y ética puesto de manifiesto en las aulas enrumban a cada uno de los que acudimos con sus conocimientos que nos servirán para ser útiles a la sociedad.

Bernardo Murcia, quien con su experiencia como productor cacaotero brindo toda su colaboración y confianza para poder realizar toda la investigación del proyecto en su Finca Villa Stefany.

Gladys Quino Narvárez, Secretaria Del Programa De Ingeniera Agrícola por ser tan servicial, su colaboración y apoyo en todos los procesos académicos y administrativos del proceso de formación como Ingenieros Agrícolas.

A los compañeros de Ingeniería Agrícola que de una u otra manera nos colaboraron y motivaron para la realización de proyecto de grado. Gracias por haber compartido los mejores momentos universitarios.

A todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron en la realización del presente trabajo.

GRACIAS

¡DIOS LOS BENDIGA!

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCION	3
1.1. ANTECEDENTES	4
1.2. OBJETIVOS	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Fundamentos físicos	6
2.1.1. El sol y su energía	6
2.1.2. Radiación solar	6
2.1.3. Efecto invernadero	11
2.2. Cacao “<i>Theobroma cacao L</i>”	11
2.2.1. Beneficio del grano de cacao “ <i>Theobroma cacao L</i> ”	11
2.3. Secadores	13
2.3.1. Secadores solares	13
2.3.2. Periodos de secamiento de un producto	17
2.3.3. Razón de humedad	19
2.3.4. Cinética de secado	19
2.4. Materiales higroscópicos	20
2.5. Clima del municipio de Rivera (Huila)	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1. Localización	22
3.2. Selección de tipos de secadores a implementar	23
3.3. Etapas de beneficio de cacao “<i>Theobroma cacao L</i>”	27
3.3.1. Etapa de recolección	28
3.3.2. Etapa de apertura y desgrane de mazorcas	28
3.3.3. Etapa de fermentación	29
3.3.4. Etapa de secado	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33

4.1. Etapa de recolección	33
4.2. Etapa de apertura de mazorcas	33
4.3. Etapa de fermentación	33
4.4. Determinación del contenido humedad inicial del cacao	38
4.5. Etapa de secado	38
4.6. Hipótesis y variables	53
4.6.1. Análisis de varianza (ANOVA)	53
5. CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFIA	56
ANEXO	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción de la radiación con la atmósfera terrestre	7
Figura 2. Esfera celeste mostrando el movimiento aparente del sol y el ángulo de declinación solar (IGNACIO, 2008)	8
Figura 3. La masa atmosférica que los rayos solares atraviesan. (SOLÍS, 2005).....	9
Figura 4. Inclinação del secador tipo túnel (IGNACIO, 2008)	9
Figura 5. Circulación de Aire. (VARGAS, 2006).....	16
Figura 6. Curva de secado de granos (CONTRERAS, 1995).	18
Figura 7. Comparación con las isotermas experimentales de humedad de equilibrio con las teóricas calculadas (VILLAMIZAR y HERNANDEZ, 1989) 18	18
Figura 8. Localización del proyecto.....	22
Figura 9. Construcción de secador solar parabólico.	25
Figura 10. Vista interna del secador solar en aluminio.	25
Figura 11. Vista frontal del secador	25
Figura 12. Vista lateral del secador.....	25
Figura 13. Secador solar parabólico	26
Figura 14. Secador pasera en madera.	27
Figura 15. Pasera de estudio.	27
Figura 16. Turbo Tag T-700B.....	27
Figura 17. Termo-higrómetro model: 303C	27
Figura 18. Etapa de recolección	28
Figura 19. Apertura de mazorcas.....	28
Figura 20. Desgrane de mazorcas.....	28
Figura 21. Cubrimiento de la masa fermentación.	29
Figura 22. Remoción de la masa de fermentación.....	29
Figura 23. Temperatura de grano en fermentación.....	29
Figura 24. Cintas medidoras de pH	29
Figura 25. Secado simultaneo de los secadores solares.....	30
Figura 26. Balanza electrónica SG 8000	31

Figura 27. Horno universal Memmert UM 200	31
Figura 28. Determinador de humedad marca MT-16™	32
Figura 29. Contenido de humedad ideal	32
Figura 30. Alteración en los parámetros físicos (T°_A , T°_F , T°_G y pH)	35
Figura 31. Alteraciones en los parámetros físicos (T°_A , T°_F , T°_G y pH) vs t_f ...	36
Figura 32. Alteración en los parámetros físicos (T°_A , T°_F , T°_G y pH) vs T_f	37
Figura 33. Curvas de secado (Ensayo I).....	42
Figura 34. Cambios de temperatura de aire durante la etapa de secado (Ensayo I)	42
Figura 35. Curvas de secado. (Ensayo II).....	43
Figura 36. Cambios de temperatura de aire durante la etapa de secado (Ensayo II)	43
Figura 37. Curvas de secado (Ensayo III).....	44
Figura 38. Cambios de temperatura de aire durante la etapa de secado (Ensayo III).....	44
Figura 39. Representación $\ln MR$ Vs t_s para el ensayo I.....	49
Figura 40. Representación $\ln MR$ Vs t_s para el ensayo II	49
Figura 41. Representación $\ln MR$ Vs t_s para el ensayo III	50

ÍNDICES DE TABLAS

Tabla 1. Corrección de ángulo de inclinación.....	10
Tabla 2. Características y tipos de secador solar	14
Tabla 3. Factores climáticos del municipio de Rivera	21
Tabla 5. Mazorcas sanas y dañadas en la etapa de recolección.....	33
Tabla 6. Peso del grano en la etapa de apertura de mazorcas.....	33
Tabla 7. Variación de la temperatura durante la fermentación (ensayo I).....	34
Tabla 8. Variación de la temperatura durante la fermentación (ensayo II)	35
Tabla 9. Variación de la temperatura durante la fermentación (ensayo III)	37
Tabla 10. Contenido de humedad	38
Tabla 11. Temperatura y contenido de humedad en cada secador solar (ensayo I) 39	
Tabla 12. Temperatura y contenido de humedad en cada secador solar (ensayo II)40	
Tabla 13. Temperatura y contenido de humedad en cada secador solar (ensayo III)	41
Tabla 14. Humedad de equilibrio.....	45
Tabla 15. Razón de humedad (ensayo I).....	46
Tabla 16. Razón de humedad (ensayo II).....	47
Tabla 17. Razón de humedad (ensayo III).....	48
Tabla 18. Intervalos de las pendientes (k)	51
Tabla 19. Constantes de difusividad para los secadores solares	52
Tabla 20. Tiempo de secado en cada secador solar.....	53
Tabla 21. Resumen de análisis.....	54
Tabla 22. Análisis de varianza	54

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

<i>Letras Griegas</i>	<i>Definición</i>	<i>Unidades</i>
δ	Ángulo declinación solar	°
α	Altura solar	°
φ	Latitud	°
β_c	Ángulo de inclinación del secador tipo túnel	°

<i>Símbolos</i>	<i>Definición</i>	<i>Unidades</i>
d_n	Número de día del año	-
D_{eff}	Difusividad efectiva	$m^2 \cdot s^{-1}$
H	Contenido de humedad	%
H.R.	Humedad Relativa	%
L	Capa del grano	m
LnMR	Logaritmo natural MR	adimen
M_t	Contenido de humedad en cada instante	%
M_0	Contenido de humedad inicial	%
M_e, X_{eq}	Contenido de humedad de equilibrio	%
MR	Razón de humedad	adimen
P_i	Peso inicial	gr
P_f	Peso final	gr
t_F	Tiempo de fermentación	hr
t_S	Tiempo de secado	hr
T°_A	Temperatura Ambiente	°C
T°_F	Temperatura del Fermentador	°C
T°_G	Temperatura del Grano	°C
T°_{AS}	Temperatura de Aire de Secado	°C
W_h	Ángulo Horario	°

RESUMEN

Este proyecto se evaluó en la finca Villa Stefanny ubicada en el municipio de Rivera (Huila), donde se construyó un secador solar parabólico en material no higroscópico (aluminio) con un área de 0.40 m x 0.80 m, un ángulo de inclinación de 45° en su parábola y una capacidad de 6 Kg de grano. Dicho secador se evaluó junto con dos secadores solares en material higroscópico, parabólico en guadua – madera y pasera de madera con el fin de disminuir el tiempo de secado y conservar la calidad del producto.

El beneficio de cacao (*Theobroma cacao L*), se realizó en tres ensayos para diferentes épocas; ensayo I (mayo 01 al 13 de 2012), ensayo II (mayo 15 al 26 de 2012) y ensayo III (mayo 27 a junio 07 de 2012). Esta investigación sirvió como parámetro para evaluar la cinética de secado con los datos obtenidos en los ensayos: humedad inicial (I. 57 %, II. 58%, III. 50%), humedad final (I.II.III. = 7%) y tiempo de secado en promedio de los ensayos: secador aluminio = 80 hrs, secador guadua- madera = 106 hrs, secador pasera = 98 hrs.

Con base a la obtención de varios periodos de secado, se aplicó la segunda Ley de Fick para los ensayos en los secadores, mostrando los valores promedios de difusividad de la siguiente : ensayo I, aluminio = $1.63 \times 10^{-08} \text{ m}^2/\text{s}$ guadua- madera = $2.42 \times 10^{-08} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y pasera = $1.14 \times 10^{-08} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; ensayo II, aluminio = $1.39 \times 10^{-08} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ guadua-madera= $2.77 \times 10^{-08} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y pasera = $1.23 \times 10^{-08} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; y ensayo III, aluminio = $3.92 \times 10^{-08} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ guadua-madera= $2.98 \times 10^{-08} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y pasera = $2.46 \times 10^{-08} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; con esto se concluyó que se obtuvo la mayor difusividad para el ensayo III en el secado de aluminio y la menor para el ensayo I del secador de pasera.

Palabras claves: secador solar, beneficio de cacao, material no higroscópico, material higroscópico, cinética de secado, tiempo de secado, difusividad.

ABSTRACT

This project was evaluated on the farm Villa Stefanny located in the municipality of Rivera (Huila), where he built a parabolic solar dryer hygroscopic material (aluminum) with an area of 0.40 m x 0.80 m, an inclination angle of 45 ° in his parable and a capacity of 6 kg of grain. This dryer was evaluated along with two solar drying hygroscopic material parabolic guadua-madera and pasera of wood in order to reduce the drying time and maintaining the product quality.

The benefit of cocoa (*Theobroma cacao* L), was conducted in three trials for different times; test I (May 1st to 13th, 2012), test II (May 15th to 26th, 2012) and test III (May 27th to June 07th, 2012). This research served as a parameter to evaluate the drying kinetics data obtained in the tests: initial moisture (57% I., II. 58%, III. 50%), final moisture (I.II.III. = 7%) and an average drying time trial: dryer aluminum = 80 hrs, dryer guadua-madera = 106hrs, dryer pasera = 98 hrs.

Based on obtaining various drying periods, we applied Fick's second law for trials in the dryers, showing average diffusivity values as follows: test I, aluminum = $1.63 \times 10^{-08} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ guadua-madera = $2.42 \times 10^{-08} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ and pasera = $1.14 \times 10^{-08} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; test II, aluminum = $1.39 \times 10^{-08} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ guadua-madera = $2.77 \times 10^{-08} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ and pasera = $1.23 \times 10^{-08} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; and test III, aluminum = $3.92 \times 10^{-08} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ guadua-madera = $2.98 \times 10^{-08} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ and pasera = $2.46 \times 10^{-08} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; with this it was concluded that higher diffusivity obtained for testing III in drying and reduced to aluminum test I pasera dryer.

Keywords: solar dryer, benefit of cocoa, hygroscopic material, desiccant, drying kinetics, drying time, diffusivity.

1. INTRODUCCION

La Tierra recibe del sol aproximadamente 2 cal/cm^2 cada minuto; esta energía se emplea en el calentamiento de la misma, la destilación del agua de los océanos y los procesos químicos de las plantas. La renovación del oxígeno que respiramos dependen del Sol; nuestros combustibles fósiles son principalmente energía solar almacenada y las especies vivas de hoy representan el resultado de una evolución de miles de millones de años que ha sido mantenida por la constante luz solar (BRAVO, 1997).

La energía del Sol, se puede utilizar correctamente para beneficio de la salud, ya que es un tipo de energía limpia pues no requiere combustibles fósiles para su conversión en electricidad o en calor. Para ello, se han creado métodos o procedimientos que aseguran un buen proceso a través de equipos especialmente diseñados como el secador solar, donde los rayos luminosos del Sol son transformados en calor a través del efecto invernadero en un llamado colector solar. Existen tipos como carpa, armario y túnel; los cuales son construidos en materiales higroscópicos, madera o guadua; y no higroscópicos, como metales (ALMADA et al., 2005).

El secado es uno de los métodos más comunes para preservar o conservar los alimentos. Este método consiste en reducir o disminuir el contenido de agua de un alimento determinado a un nivel en donde el producto pueda conservarse por periodos prolongados. Esto varía dependiendo del producto que se requiera secar y también de la temperatura. También se entiende por secado a la reducción del contenido de agua de un producto; este proceso se conoce como deshidratación y para que éste se lleve a cabo se necesita suministrar calor de evaporación y remover el aire húmedo del ambiente (CER-UNI, 1998).

El beneficio de cacao se puede definir como la serie de operaciones sucesivas que comienzan con la cosecha y apertura de las mazorcas maduras para la obtención de los granos (desgrane), continúa con la fermentación, secado y limpieza, terminando con la selección, clasificación y almacenamiento del grano (RODRÍGUEZ, 2006). El secado es una operación esencial en el proceso de beneficio de cacao porque el grano debe contener alrededor del 6% de humedad para que su almacenamiento se prolongue durante varios meses y se pueda prevenir los ataques causados por hongos y bacterias (LIENDO, 2005).

El problema radica en la eficiencia y calidad del secado del cacao "***Theobroma cacao L***", de acuerdo con los secadores construidos en materiales higroscópicos (parabólico en guadua - madera, y paseras de

madera), estos al tener precipitaciones altas y temperaturas bajas absorbe mayor humedad y se la transmite al grano provocando un mayor tiempo de secado; es por esto que se construye un secador solar parabólico teniendo como lecho material no higroscópico (Aluminio). Además presenta la facilidad en la construcción de éste, ya que es completamente desarmable y portátil, lo que le brinda gran importancia y aplicabilidad, ya que puede ser utilizado en diferentes sitios trasladándolo de un lugar a otro con mayor facilidad.

1.1. ANTECEDENTES

Las experiencias que existen a nivel mundial sobre secadores solares contruidos en materiales no higroscópicos (Aluminio) son varios, los cuales están hechos para secar diferentes productos agrícolas con el fin de reducir costos y mejorar la economía del agricultor.

Gutiérrez (2010) encontró un *Deshidratador de alimentos con colectores solares planos y aceite de coco, como fluido de trabajo*. Se considera un sistema combinado de un banco de colectores solares, que previamente calienta el aceite térmico de coco hasta una temperatura aproximadamente de 150 °C, que circula sobre los intercambiadores de calor que, colocados en la parte inferior de cada extremo de la cámara de secado, donde se colocan los productos a deshidratar. La vista frontal de la cámara secadora, está diseñada con material de placa de acero inoxidable Tipo AISI 316 grado alimenticio de acuerdo a la Sección VIII, División 1, del Código ASME, espesor de 0.45 mm. Las dimensiones son de 4.00 m de ancho, un largo de 6.00 m y una altura de 2.00 m pero se le agregan 0.5 m de radio a la media circunferencia. Este material cubre la parte interna de la cámara de secado. En seguida contiene una capa de aislamiento térmico de espuma de polio metano de 47 kg/m³, con grado R-5 de aislamiento, para conservar el calor y minimizar las pérdidas de calor por las paredes. Este aislamiento se cubre con una superficie de lámina metálica de aluminio dúctil calibre 26 en las parte exterior, para reflejar los rayos solares. Este material también, evita que el calor no pierda densidad y se aproveche en menos tiempo de la mezcla del aire caliente y húmedo

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Construir un secador solar parabólico en material no higroscópico (Aluminio), evaluando el comportamiento del secado de cacao "*Theobroma cacao L*", teniendo en cuenta las características climatológicas de La Finca Agroturística Villa Stefany ubicada en la vereda Termópilas del municipio de Rivera (Huila).

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las etapas de Beneficio, previo del material sometido a secamiento.
- Construir un secador solar parabólico en Aluminio con un área de 0.40 m x 0.80 m, y evaluar la eficiencia de este con respecto a los secadores de materiales higroscópicos (parabólico en guadua- madera y pasera de madera).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS

2.1.1. El sol y su energía

Según IQBAL (1983) el sol es la estrella de mayor importancia y la que aporta la energía necesaria para la vida de la tierra, del cual dista, en promedio, unos 150 millones de kilómetros. Dentro del sol se producen continuamente reacciones de fusión nuclear, a una escala gigantesca, a causa de lo cual se liberan inmensas cantidades de energía, donde permite que el sol emita hacia el espacio, en forma de ondas electromagnéticas, la energía liberada por los procesos nucleares. Esta energía, al abandonar el sol y viajar por el espacio sufre una dispersión progresiva, que es cada vez mayor cuanto más lejos del sol se considere. Además de las enormes cantidades de energía liberadas por el sol, solo llegan a la tierra aproximadamente unas 2 billonésimas partes, pero a esta pequeña cantidad de energía se pueden atribuir casi la totalidad de los procesos meteorológicos y biológicos que se desarrollan en la Tierra. El sol es la fuente primordial de la energía que nuestro planeta ha recibido en el pasado, recibe en el presente y recibirá en el futuro. De acuerdo con CARVAJAL (2009) el sol siempre ha sido un objeto de adoración, ha dado luz, calor y seguridad a la humanidad.

La energía solar, según CALVIN (2000) generada en el centro del Sol tarda un millón de años para alcanzar la superficie solar. Cada segundo se convierten 700 millones de toneladas de hidrógeno en cenizas de helio. En el proceso se liberan 5 millones de toneladas de energía pura; por lo cual, el Sol cada vez se vuelve más ligero.

2.1.2. Radiación solar

Según SOLÍS (2005), la distancia Tierra-Sol, el diámetro solar y su temperatura es lo que determina el flujo de energía casi constante que incide en la superficie terrestre y aunque existen varios modelos para calcularlo, el valor comúnmente aceptado es de 1.354 W/m^2 . Este valor se define como el flujo de energía proveniente del Sol que incide sobre una superficie de un metro cuadrado, ubicada fuera de la atmósfera terrestre, perpendicular a los rayos solares y a una distancia media de la Tierra al Sol y es conocido como Constante Solar.

Además de los gases que conforman la atmósfera terrestre, la radiación encuentra diferentes “obstáculos” que hacen variar su intensidad. Las nubes, por ejemplo, desvían los rayos solares y provocan que la intensidad de éstos al llegar a la superficie terrestre sea menor. A partir de estos fenómenos se puede clasificar a la radiación solar, como radiación directa o difusa (figura 1).

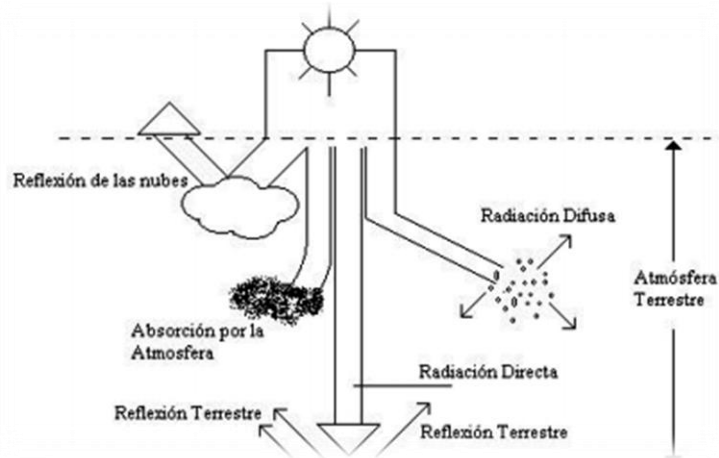


Figura 1. Interacción de la radiación con la atmósfera terrestre (REQUENA et al., 2011)

2.1.2.1. Radiación directa

Según SOLIS (2005), la radiación solar es la que llega en línea recta a la superficie de la tierra sin haber sido difundida por la atmósfera; forma sombras definidas ante algún obstáculo y puede enfocarse por medios ópticos.

2.1.2.2. Radiación difusa

De acuerdo con SOLIS (2005), la radiación solar que se dispersa al atravesar la atmósfera por causa de moléculas de aire, vapor de agua, polvo, etc., de tal modo que llega a la superficie de la tierra como si procediera de todo el cielo. No da sombras nítidas ni puede enfocarse con un instrumento óptico.

La suma de estos dos tipos de radiación se conoce como la Radiación Global. Según ZAMBRANO (2003), nos indica que la superficie de la tierra recibe un total de 51% de la radiación global, de los cuales 26 partes lo hacen en forma de radiación directa y 25 como radiación difusa; del mismo 51%, 5 partes se ceden hacia el exterior, por lo que tan solo el 46% constituye la radiación que efectivamente alcanza a la superficie terrestre.

Aspectos básicos de la radiación solar

El secado de la madera depende de la transferencia de calor y masa entre el aire y la madera (BEKTHA et al., 2006), siendo importante transferir energía calorífica al aire necesaria para la remoción de humedad de la madera. La cantidad de energía necesaria para el calentamiento del aire de secado requiere del área de incidencia y la eficiencia del secador tipo túnel, considerando la inclinación y la radiación del lugar.

Declinación solar (δ)

Según MONTERO (2005), el eje rotatorio de la tierra forma con el eje normal al plano de la elíptica un

ángulo constante igual a 23.5° . Debido a esto, el ángulo de los rayos solares con el plano del ecuador, denominado *declinación solar*, δ , varía entre 23.45° (solsticio de verano) y -23.45° (solsticio de invierno), expresado mediante la *ecuación 1* y como se ve en la (figura 2).

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right]$$

Ecuación 1

Donde,

d_n = el número de día del año (1 para el 1 Enero y 365 para el 31 Diciembre)

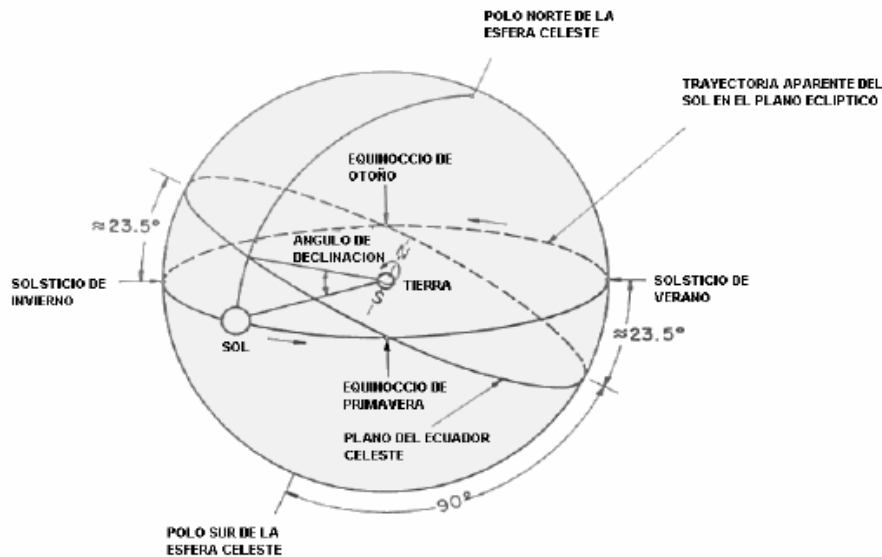


Figura 2. Esfera celeste mostrando el movimiento aparente del sol y el ángulo de declinación solar (IGNACIO, 2008)

Ángulo de inclinación de los rayos solares

Según SOLÍS, (2005), el ángulo de inclinación de los rayos solares es importante, debido a que la radiación solar es menos intensa cuando el ángulo de incidencia es mayor. Al medio día, cuando los rayos solares caen perpendicularmente a la superficie terrestre “*ángulo de incidencia nulo*” son más intensos que al atardecer y/o amanecer „*ángulo de incidencia máximo*”. La cantidad de masa atmosférica que atraviesa los rayos solares varía con el ángulo de incidencia (figura 3).

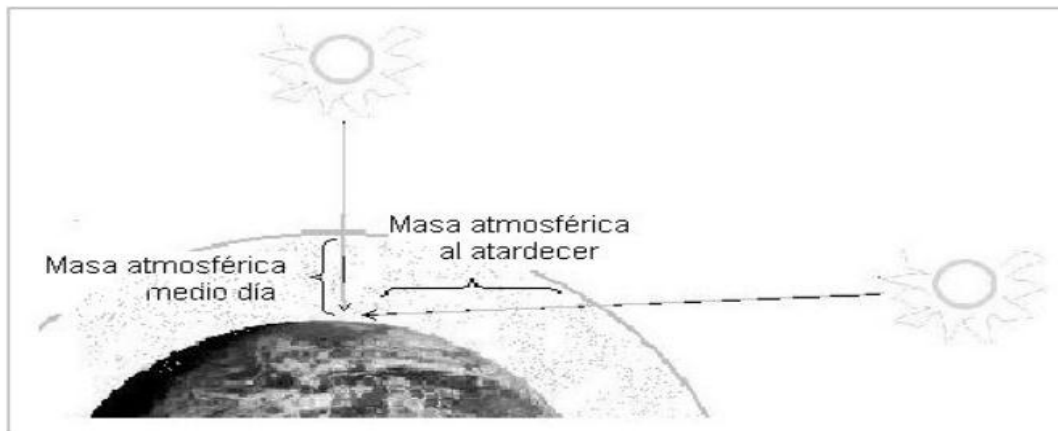


Figura 3. La masa atmosférica que los rayos solares atraviesan. (SOLÍS, 2005).

Inclinación del secador solar tipo túnel

Según IGNACIO (2008), para estimar la inclinación del secador y captar la máxima radiación solar posible, es necesario conocer la altura del sol (figura 4), de tal forma que la incidencia de los rayos del sol sea normal a la superficie del secador.

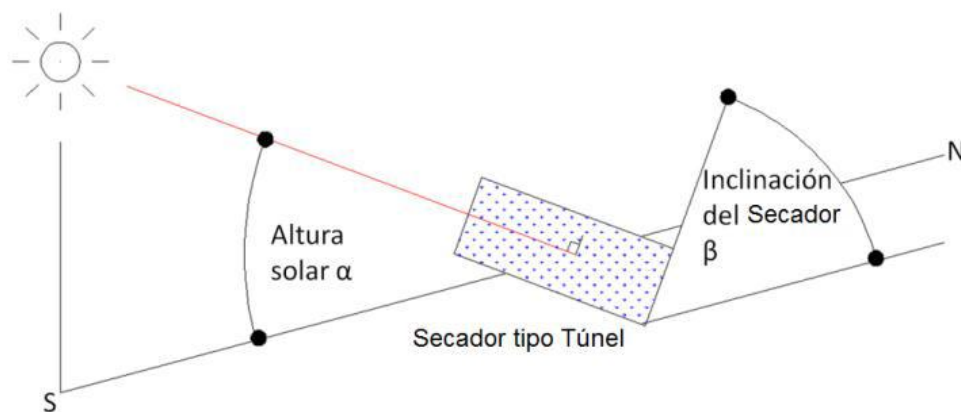


Figura 4. Inclinación del secador tipo túnel (IGNACIO, 2008)

Determinación altura solar (α)

Según MONTERO (2005), la altura solar α (también llamada elevación solar) es la altura angular del sol sobre el horizonte celestial del observador. Este es el ángulo que varía entre (0-90°), la altura solar es el complemento del ángulo cenital y se calcula mediante la siguiente (ecuación 2).

$$\alpha = \sin^{-1}[(\cos \varphi) \cdot (\cos \delta) \cdot (\cos w_h) + (\sin \varphi) \cdot (\sin \delta)]$$

Ecuación 2

Donde,

φ : latitud del lugar de estudio

w_h : $15(\text{Hora Deseada}-12)$

δ : declinación solar en grados

α : altura solar

El ángulo horario (ω) es igual a cero al medio día solar y adquiere un valor de 15° de longitud por cada hora, siendo negativo en las mañanas y positivo por las tardes; entre las 10 am- 2 pm se adquiere el mayor brillo solar, MONTERO (2005).

Determinación ángulo de inclinación del secador tipo túnel

Según RIVERA (2004), el ángulo de inclinación del secador tipo túnel se determina con la siguiente *ecuación 3*.

$$\beta_c = 180 - (90 + \alpha)$$

Ecuación 3

Donde,

β_c : Ángulo de inclinación del secador tipo túnel

α : altura solar

El ángulo de inclinación de los secadores solares sobre un plano horizontal se determina en función de la latitud geográfica y del período de utilización de la instalación, de acuerdo con los valores de *tabla 1*:

Tabla 1. Corrección de ángulo de inclinación

PERÍODO DE UTILIZACIÓN	INCLINACIÓN DE LOS SECADORES SOLARES
Anual, con consumo constante	β_c°
Preferentemente en invierno	$(\beta+10)^\circ$
Preferentemente en verano	$(\beta - 10)^\circ$

Fuente: RIVERA (2004).

2.1.3. Efecto invernadero

Según SOLÍS (2005) el efecto invernadero obtiene su nombre de las estructuras de vidrio que se utilizan en la agricultura para “atrapar” la energía solar. El vidrio, al igual que algunos otros materiales, es transparente a las ondas de luz visible y opaco a rayos ultravioleta e infrarrojos. Las ondas cortas de la luz solar atraviesan el vidrio y se absorben en las plantas y el suelo. A su vez las plantas y suelo emiten ondas largas infrarrojas que no pueden atravesar el vidrio, esta energía queda “atrapada” en el invernadero y eleva la temperatura del ambiente.

2.2. CACAO “*Theobroma cacao L*”

Según Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario (2012), el cacao es originario de la cuenca alta del Amazonas, la cual comprende tres países Colombia, Perú y Ecuador. Es un árbol de origen americano, de tronco liso, flores pequeñas y fruto de forma elíptica, de 20 cm de largo aproximadamente, éste contiene semillas, de las cuales se obtiene el chocolate.

El cacao ocupa el tercer lugar después del azúcar y el café en el mercado mundial de materias primas. Una distinción es hecha entre el cacao ordinario, que representa el 95% de la producción mundial y que proviene de las variedades Forastero, y el cacao fino o aromático, que proviene de las variedades Criollo o Trinitario (el 5 % de la producción mundial). La producción principal de cacao se concentra en África del oeste y representa cerca del 70% de la producción mundial, Colombia ocupa el noveno puesto en la producción. zb

2.2.1. Beneficio del grano de cacao “*Theobroma cacao L*”

Según FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS (2007) el manejo de poscosecha del grano de cacao se constituye un aspecto de máxima importancia para presentar al mercado un producto de calidad. Si se ejecuta sistemáticamente los pasos que se describen a continuación se lograra entregar un producto de la mejor condición.

2.2.1.1. Recolección

Se debe recolectar únicamente frutos maduros los cuales se deben hacer con herramientas adecuadas como la tijera podadora; el machete no se debe

utilizar ya que puede herir al árbol o dañar los granos de la mazorca (FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS, 2007).

2.2.1.2. Partida de la mazorca

Una vez recolectadas las mazorcas se amontonan, separándose las que pueden estar enfermas y la que hayan alcanzado el grado de madurez requerido, la quiebra o partida suele hacerse con un machete corto, con un mazo de madera y con un partidor de lámina sin filo (FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS, 2007).

2.2.1.3. Fermentación

Según FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS (2007) es el paso fundamental en el beneficio de cacao. En este proceso se desarrolla el aroma y el sabor del producto y contribuye a formar la apariencia del grano. Este proceso se debe realizar en cajones contruidos en madera los cuales deben estar en un sitio centrado y cubierto. La masa se debe remover cada 24 horas para permitir la liberación de CO₂ generando en el proceso y garantizar una fermentación uniforme entre los granos. El tiempo de fermentación debe ser de 5 – 6 días o de 120-144 horas contadas a partir del depósito del grano en los recipientes.

2.2.1.4. Secado

Según FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS (2007) para que el producto pueda ser almacenado con la seguridad de que no se afectará por causa del ataque de hongos, es necesario acondicionar su humedad a un contenido de agua cercano al 7%. De otro lado, debe tenerse en cuenta que durante el proceso de secado del grano, continúa el desarrollo de algunos de los procesos de transformación física y química, que no alcanzan a completarse mientras el grano está en la pila de fermentación, es así que durante esta etapa se termina la oxidación y transformación de los polifenoles desapareciendo por completo el color violeta de las almendras, con lo cual el grano se torna totalmente marrón, generando las características organolépticas deseables.

Las condiciones más favorables de secado se obtienen cuando éste se realiza con el calor del sol, que es la fuente más barata y adecuada. Si se utiliza secado artificial debe tenerse cuidado para que la temperatura no sobrepase los 60°C. El proceso debe ser lento y a bajas temperaturas al principio del secado por lo cual el primer día de asoleada, es aconsejable

utilizar la plena exposición solamente durante las primeras y las últimas horas. Posteriormente no habrá inconveniente para hacer el secado durante todo el día. Ello garantiza que el grano que se hinchó durante la fermentación no se deshidrate de manera brusca, tomando una contextura aplanada y enjuta. Para el secado al sol se utilizan estructuras como las paseras, casa elbas, camillas de madera o carros corredizos tipo elba. No se deben usar patios de cemento ni áreas pavimentadas pues sobre todo en estas últimas, se produce contaminación por elementos nocivos.

En el proceso de secado se debe revolver la masa de cacao frecuentemente para la distribución pareja del calor y el secado uniforme.

2.2.1.5. Selección

En esta etapa se deben eliminar toda clase de impurezas tales como granos mohosos, partidos, vanos, sin almendra y objetos ajenos al grano de cacao.


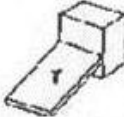





2.3. SECADORES

2.3.1. Secadores Solares

Recientemente se han realizado intentos para mejorar la efectividad de las técnicas tradicionales de secado al sol, resultando evidente la necesidad de que el producto a secar sea encerrado y secado bajo techo, lo cual limita la exposición del producto a la radiación solar y por consiguiente el resultado obtenido es satisfactorio (RIVERA, 2004).

Existen diferentes tipos y modelos de secadoras como lo indica la tabla 2, pero las características de cada modelo de secador está íntimamente ligado con el producto que se pretende secar, esto significa que es importante conocer las propiedades del producto como tendencia a ser atacado por los hongos, curvas de secado, rangos de temperatura apropiados, degradación con la radiación, disposición del producto en el secador etc (ERAZO y CAPERA, 2011).

Tabla 2. Características y tipos de secador solar

TIPO DE SECADOR	DESCRIPCION	ESQUEMA DEL MODELO BASICO
Cabina(Gabinete) directa	La cámara de secado es de vidrio y no usa un colector solar por separado	
Cabina(Gabinete) indirecta	Se usa un colector solar que esta separado de la cámara de secado y que no tiene superficies transparentes	
Modelo combinado	La cámara de secado está hecha de vidrio parcial o totalmente, y usa un colector solar por separado	
Túnel	Normalmente se usa un armazón metálico con 1 ó 2 capas de plástico vidriado. Generalmente se trata de un secador directo, pero puede ser indirecto si el plástico de la capa mas interna es negra	
Túnel bajo	Secador directo semejante al anterior pero se construye más cercano al suelo y normalmente solo contiene una sola capa de producto	
Tienda	Secador solar con un marco recto en lugar de curvado	
Arcón (bin)	Cualquier secador, pero normalmente indirecto, con flujo de aire forzado por convección que puede secar capas profundas (normalmente 300mm ó más) de producto.	

Fuente: RIVERA, (2004).

2.3.1.1. Cubiertas

Las cubiertas son fundamentales en los secadores solares, debido a que disminuye la interacción de macroorganismos y microorganismos. Dentro de las ventajas más relevantes encontramos la protección contra las precipitaciones y el control de flujo de aire.

Un material transparente usado como cubierta permite la entrada de la radiación solar y minimiza las pérdidas de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente por la parte superior. (CIFUENTES, 2009).

Según PEGGY Y BARRIC, (1998), las nuevas láminas de material plástico más fuertes y resistentes se encuentran disponibles en unos cuantos países del África, Asia o Latinoamérica, los materiales más usados para cubiertas en los secadores solares son:

- Inhibidores de rayos ultravioletas (UVI) aptos para la horticultura
- Polivinílico flurado (PVF) como el melinex y el E.I. Dupont Tedlar.
- Polimetilmetacrilato (PMMA)
- Policarbonato (PC)
- Fibra de vidrio reforzada con poliéster (GRP)

2.3.1.2. Secador tipo túnel

El secado solar (dependiendo de las características del producto a secar), los recursos disponibles y la situación socioeconómica es una alternativa a considerar, sobre todo a nivel rural en remplazo a métodos tradicionales como el secado de productos al aire libre, también se usan materiales no convencionales como guadua, madera, arcilla entre otros para la construcción de este tipo de secadores solares.

Estos secadores son utilizados en zonas de ladera, donde presentan dificultades de energía eléctrica, topografía ondulada, vías de acceso no revestidas “no pavimentadas”, acceso limitado de materiales convencionales para la construcción, etc. Para el secador solar tipo túnel comprende las siguientes ventajas:

- a. La temperatura y la irradiación es elevada y por lo tanto la humedad es menor, esto trae como consecuencia un menor tiempo de secado.
- b. Los aislantes plásticos “agrolene”, sirven como barreras contra la presencia de insectos y moho.
- c. Material para la construcción de fácil acceso.
- d. Comparativamente es más barato de construir que un secador mecánico
- e. Protección contra lluvias

2.3.1.3. Condiciones del secado solar

Según CER-UNI (1998), determina elementos para las condiciones de este secado:

- Características del producto: Aquí se tiene presente el contenido inicial de producto y el contenido final de humedad que deseamos obtener. También se considera el estado físico como es la forma, el tamaño, su superficie, etc. También la sensibilidad a la temperatura.

- Otro elemento a considerar son las características del secador, básicamente su nivel de tecnificación (si se utiliza fuente de energía adicional). Aquí también se considera el volumen que se va a secar.
- Por último, se debe considerar las características meteorológicas como son la humedad relativa, la temperatura, la radiación solar, velocidad del viento, precipitación, etc. El contenido de humedad en un producto es expresado en base húmeda.

Circulación del aire

Según DELGADO et al., (2004), el calentamiento de aire en el secador solar se realiza mediante la circulación del aire a través de una cámara de calentamiento formada por una cubierta de policarbonato celular transparente y una superficie captadora hecha de chapas de acero ennegrecidas, que en conjunto forman un cuerpo o cámara de absorción de la radiación solar que entra por la cubierta, con intenso efecto de invernadero, como se muestra en la figura 5.

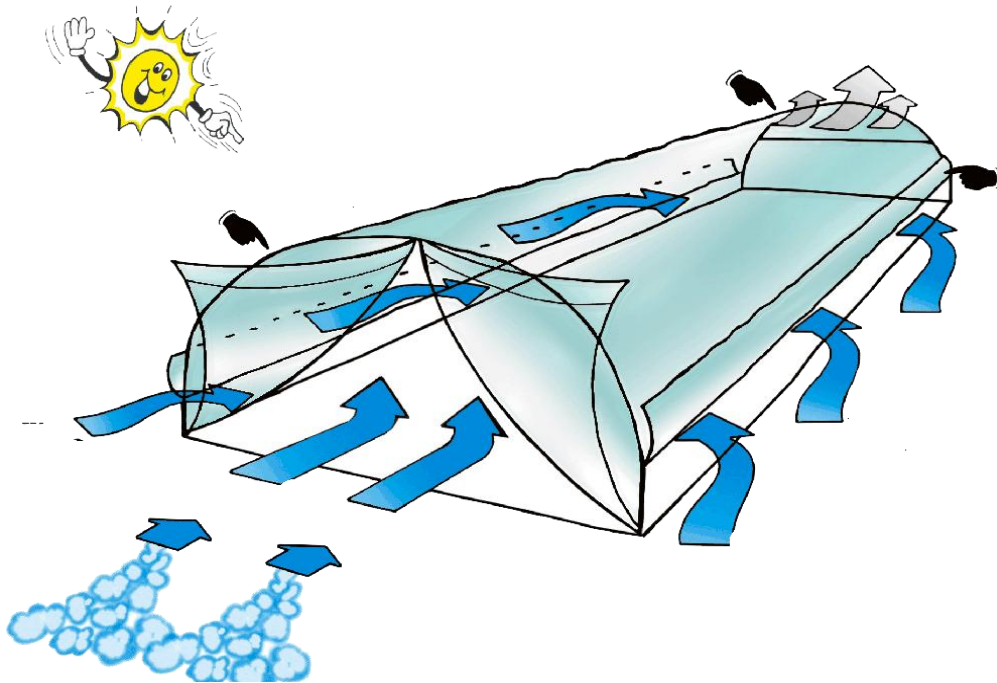


Figura 5. Circulación de Aire. (VARGAS, 2006).

De acuerdo con DELGADO et al., (2004), al inicio del proceso una masa de aire con humedad relativa ambiental se hace entrar a una cámara de secado con paredes térmicamente aisladas, y su humedad relativa disminuye rápidamente al hacerse circular a través de la cámara superior de

calentamiento. El secado del material (colocado en bandejas o capas en carros portadores a lo largo de la cámara de secado, ubicada debajo y a lo largo de la cámara de calentamiento) se realiza por el paso continuo del aire caliente a través del material, que produce un intenso proceso de intercambio de calor y masa, durante el cual la humedad superficial del material se incorpora al aire por evaporación, en la medida en que el aire transfiere su calor.

La sucesiva recirculación a una velocidad definida, impulsado por un ventilador centrífugo y un sistema de conductos de distribución, a través de las capas del producto que se debe secar, hará que a medida que la humedad relativa del producto disminuya, la del aire aumente, llegando a un punto en el que será necesario renovar este aire para restablecer el gradiente de humedad entre ambas masas y asegurar la continuidad del proceso.

2.3.2. Periodos de secamiento de un producto

Según CONTRERAS (1995), existen cuatro periodos en el proceso de secado de granos, los cuales se representan en la Figura 6, y son:

- a. De A-B. es la etapa de extracción de humedad de la superficie del grano, en ella la velocidad de evaporación aumenta según el grano se va calentando.
- b. De B-C. la pérdida ocurre desde la superficie. Ésta pérdida ocurre por el fenómeno de convección. El punto C es el de contenido de humedad crítico (X_{cr}) que ocurre cuando la velocidad de difusión del producto es menor que la velocidad con que se está evaporando en la superficie. Es el periodo de velocidad constante.
- c. De C-D depende de las características del producto y comprende el movimiento de humedad dentro del producto hacia la superficie por difusión. Es el periodo de velocidad decreciente.
- d. De D-E es el periodo final del proceso. En éste periodo la capacidad del aire secante utilizado en el proceso es mínimo, porque las condiciones ambientales en éste momento son las únicas que influyen en el proceso. Es el periodo de equilibrio. Donde E es el punto de humedad de equilibrio (X_{eq}).

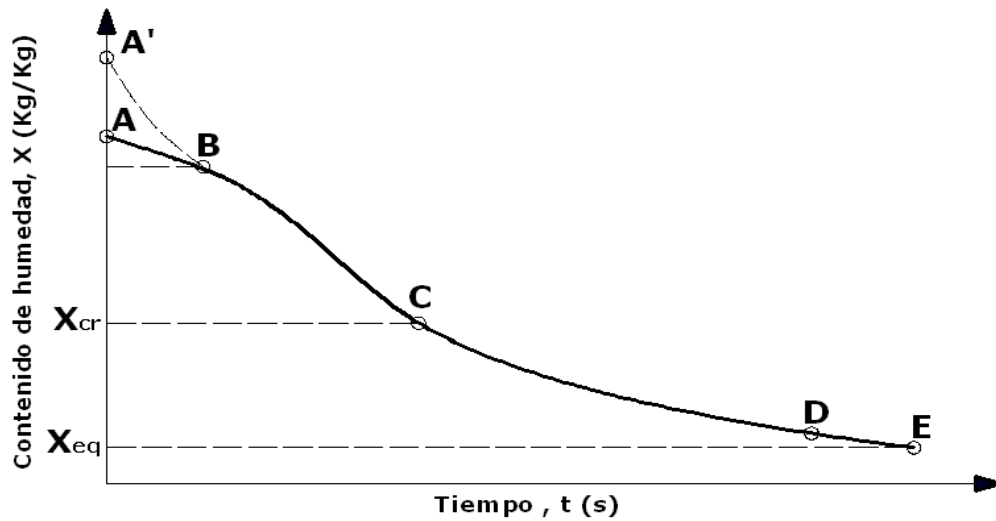


Figura 6. Curva de secado de granos (CONTRERAS, 1995).

Humedad de equilibrio del cacao

Según VILLAMIZAR y HERNÁNDEZ (1989), en la figura 7 se utiliza para hallar la humedad de equilibrio del cacao; donde muestran las curvas comparativas experimentales y calculadas, pudiéndose observar un buen ajuste entre ellas, particularmente en niveles de baja humedad relativa (menores a 50%); los valores hallados de M_{eq} se ubicaron dentro de los rangos reportados por otros investigadores.

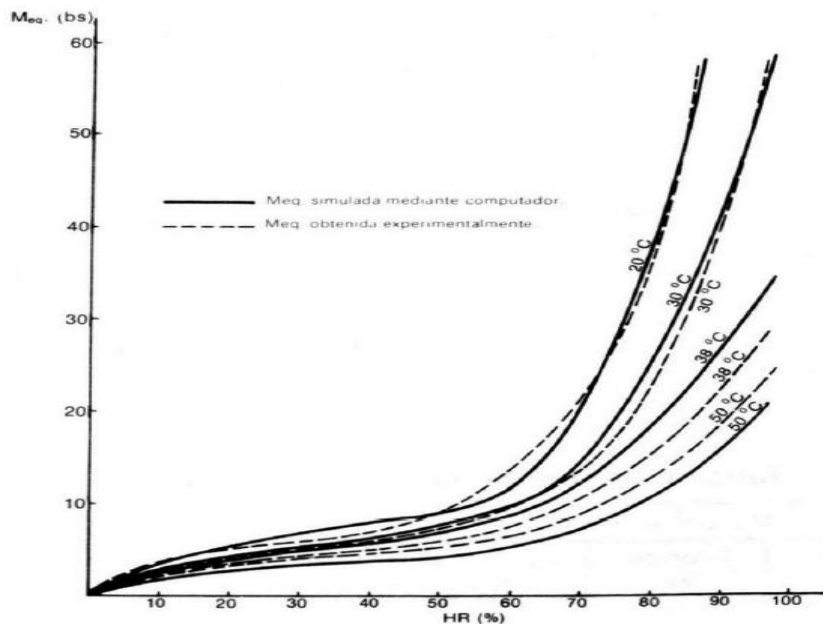


Figura 7. Comparación con las isotermas experimentales de humedad de equilibrio con las teóricas calculadas (VILLAMIZAR y HERNANDEZ, 1989)

2.3.3. Razón de humedad MR

Según MONTERO (2005), la razón de humedad, se expresa generalmente según la *ecuación 4*.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

MR: Razón de humedad (*dec. o %*),
M_t: Contenido de humedad en cada instante (%),
M₀: Contenido de humedad inicial (%)
M_e: Contenido de humedad de equilibrio (%).

2.3.4. Cinética de secado

Según HERNÁNDEZ et al., (2011), para modelar la cinética de secado del grano se hace uso de la ecuación de la segunda ley de Fick, cuya solución en el caso de una placa plana, considerando que la migración de la humedad es causada por la difusión, sin encogimiento, y bajo coeficientes de difusión y temperatura constantes, *ecuación 5*:

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad \text{Ecuación 5}$$

M_R = Razón de humedad (%),
M: Contenido de humedad en cada instante (%),
M₀: Contenido de humedad inicial (%)
M_e: Contenido de humedad de equilibrio (%).
D_{eff} = Difusividad efectiva (m.s⁻²)
t = Tiempo (seg)
L = Espesor de Capa (m)

Normalmente, la *ecuación 5* se puede simplificar al primer término de la serie, y para ese caso queda como:

$$\ln \frac{M}{M_0} = \ln \frac{8}{\pi} - \left[\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

Los valores del logaritmo natural de la relación de humedad, se pueden ajustar a una línea recta, cuya pendiente está relacionada con la difusividad efectiva de la siguiente forma:

$$Pendiente = \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}$$

Ecuación 7

2.4. MATERIALES HIGROSCÓPICOS

Según SUPERCONTROLS S.A. (2007) define higroscópico a todo material que tiene las células que absorben el agua, causando una variación de sus dimensiones. De tipo diferente es la absorción hidrófila, que consiste en la absorción de agua entre las células, de la cual no deriva ninguna variación de las dimensiones. Los materiales higroscópicos siempre tienden a alcanzar un equilibrio con el ambiente que los rodea. Es justamente las variaciones de las dimensiones de los materiales, debida a un cambio de la humedad relativa, que puede condicionar la manejabilidad de los materiales y los procesos de elaboración, hasta en mayor medida que la temperatura.

La protección de los materiales higroscópicos se puede garantizar solamente mediante la estabilidad del ambiente en que se han colocado. Este objetivo se consigue mediante la deshumidificación cuando el aire se convierte en aire demasiado húmedo y mediante la humidificación cuando el aire está demasiado seco.

Si se toma del ambiente externo un pedazo de madera en equilibrio con el contenido de humedad que se encuentra en el aire y se lo lleva a un ambiente calentado y con un contenido menor de vapor de agua, la madera empieza a ceder parte de su humedad al aire seco del ambiente. Al perder la madera su humedad, se “encoge” causando la formación de grietas o deformaciones. El mismo daño se puede detectar en el papel, en los tejidos, en algunos materiales plásticos, en la cera, en las frutas y en las verduras y en otros materiales que tienen la propiedad de absorber y ceder la humedad.

Según MONTERO (2005), Los productos agrícolas difieren de otros materiales frecuentemente secados (textil, piedra, papel, etc), conocidos estos últimos como no higroscópicos.

Los materiales no higroscópicos se caracterizan por tener la humedad ligeramente retenida en su interior, de forma que se considera “desligada” del producto y por tanto, es posible secarlos hasta valores de contenido de humedad iguales a cero.

Sin embargo, en los materiales agrícolas (higroscópicos) la humedad contenida está usualmente “atrapada” en pequeños capilares cerrados, siendo imposible llegar hasta valores de humedad iguales a cero y por tanto, siempre existe un contenido de humedad residual.

2.5. Clima del municipio de Rivera (Huila)

El municipio de Rivera se encuentra caracterizado por 5 unidades climáticas, que están ubicados desde la margen del río Magdalena hasta los límites geográficos de los municipios de Algeciras, Neiva, y el Departamento del Caquetá. En la tabla 3, se muestra la clasificación de los pisos térmicos existentes en el municipio de Rivera.

Tabla 3. Factores climáticos del municipio de Rivera

PISOS TÉRMICOS	ALTURA (m.s.n.m)	ÁREA (Km²)	PRECIPITACIÓN (m.m)	VEREDAS
. CSa: Clima Cálido Seco (25 – 28°C)	< 500	13	1.200- 1.300	Arenoso, Rio Frio Y Albadan.
. CSb: Clima Cálido Seco (25 – 28°C)	1000	67	1.500–1.600	Arenoso, Rio Frio, Albadan, Los Medios, Bajo Pedregal, Riverita Y El Dinde.
CH: Clima Cálido y Húmedo (26-28°C)	500- 1000	74	2.000- 3000	Ulloa, El Dinde, Guadual, Alto Pedregal, Llanitos, La Honda, Sectores De Riverita, Bajo Pedregal Los Medios, Viso Y Mesitas, Salado, TERMÓPILAS, El Pindo y el resguardo Indígena de Paniquita.
MH: Clima Medio y Húmedo (18-24 °C)	1000-2000	70	1.000 – 2000	La Medina, Monserrate, Buena Vista, Honda Alta, Alto Guadual, La Junta, Arrayanal, Agua Fria, Agua Caliente, Tambillo, Loma Larga Y Un Sector De Las Veredas Rio Blanco Y Rio Negro.
FMH: Clima Frío Muy Húmedo (12-18°C)	2.000- 3000	146	2000 – 4000	Rio Blanco y Rionegro, y en esta zona se ubica el sector de la SIBERIA, ecosistema estratégico de reserva hídrica para los municipios de Neiva, Campoalegre, Algeciras, Rivera y San Vicente del Caguan Caquetá.

Fuente: IGAC, 1994.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACION

Este proyecto de investigación se desarrolló en el periodo comprendido en abril 01 de 2012 a junio 08 de 2012 en la parcela demostrativa de CasaLuker que tiene un área de 1ha en la Finca Agroturística Villa Stefany, de la vereda Termópilas del municipio de Rivera (Huila), a 10 minutos del casco urbano por vía carretable. Su coordenada se localiza $2^{\circ}46'21.46''$ N $75^{\circ}14'37.80''$ O; con una elevación de 803 m.s.n.m. La Casa de Campo hace parte de la Asociación de Productores de Cacao de Rivera ASOPROCAR, con gran reconocimiento en el Departamento del Huila como una asociación líder en productividad, calidad, comercialización y emprendimiento (Murcia, 2005).

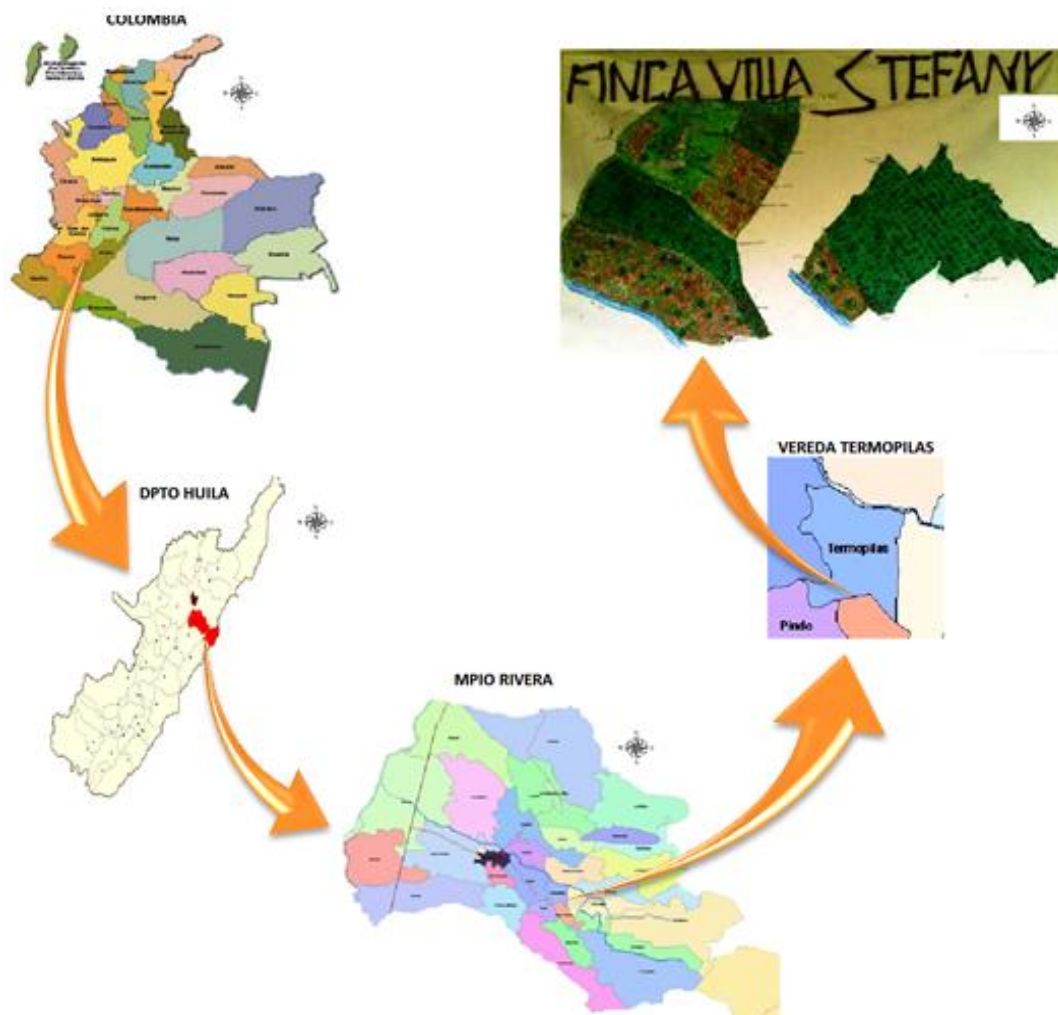


Figura 8. Localización del proyecto

3.2. SELECCIÓN DE TIPOS DE SECADORES A IMPLEMENTAR

Se tiene como referencia un secador solar parabólico en material higroscópico (guadua-madera) y un secador de pasera (madera), para construir un secador parabólico en material no higroscópico (aluminio); debido a que los secadores de material higroscópico alteran la humedad del grano no dejando avanzar en la pérdida de la misma, es decir, al presentarse precipitaciones o temperatura ambiente baja durante la etapa de secado el material adsorbe la humedad debido a células que atrapan el agua causando una variación de sus dimensiones y esto hace que el grano adquiera humedad.

Con el secador solar parabólico construido en material no higroscópico (aluminio) sucede lo contrario debido a que sí se presentan precipitaciones y temperatura baja el grano no altera la pérdida de humedad durante el proceso; además se corrige el ángulo de inclinación de la parábola del secador guadua-madera para obtener una mejor eficiencia en el secado de aluminio.

3.2.1. Diseño y construcción del secador solar no higroscópico

3.2.1.1. Parámetros de diseño

Se calculó parámetros derivados de la radiación solar, para hallar la inclinación de la parábola del secador de aluminio.

Primero se determinó la declinación solar (δ) mediante la *ecuación 1* de Cooper (1969) descrita anteriormente.

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

d_n = el número de día del año (1 para el 1 Enero y 365 para el 31 Diciembre)

Entonces se reemplazó así:

d_n = 151 (Abril 31 de 2012)

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} (151 + 284) \right]$$

$$\delta = 21.90^\circ$$

Seguendo con la determinación de la altura solar (α) con la *ecuación 2*:

$$\alpha = \sin^{-1}[(\cos \varphi) \cdot (\cos \delta) \cdot (\cos w_h) + (\sin \varphi) \cdot (\sin \delta)]$$

Ecuación 2

Donde,

φ : latitud del lugar de estudio (Finca Villa Stefany= 2°46'21.46")

w_h : 15° (14-12) (hora deseada es 2 pm) → w_h : 30°

δ : declinación solar en grados ($\delta = 21.90^\circ$)

α : altura solar

Entonces se reemplazó así:

$$\alpha = \sin^{-1} \left[(\cos 2^\circ 46' 21.46'') \cdot (\cos 21.90^\circ) \cdot (\cos 30^\circ) + (\sin 2^\circ 46' 46'') \cdot (\sin 21.90^\circ) \right]$$

$$\alpha = 55.15^\circ$$

Por último se determina el ángulo de inclinación del secador tipo túnel con la *ecuación 3* y se reemplazó así:

$$\beta_c = 180 - (90 + \alpha)$$

Ecuación 3

$$\beta_c = 180 - (90 + 55.15^\circ)$$

$$\beta_c = 34.58^\circ$$

El ángulo de inclinación de los secadores solares sobre un plano horizontal se determina en función de la latitud geográfica y del período de utilización de la instalación, de acuerdo con los valores de tabla 1 y preferentemente para invierno:

Entonces se reemplazó así:

$$\beta_c = (34.58 + 10)^\circ$$

$$\beta_c = 44.58^\circ \approx 45^\circ$$

3.2.1.2. Construcción del secador no higroscópico

El secador solar parabólico en material no higroscópico (aluminio) tiene un área de 0.40 m x 0.80 m, y la cubierta se forró con un polietileno "normal" (sin aditivos) de espesor 150 micras (600 galgas), es decir, para el común un polietileno de calibre 6 para invernadero; donde la radiación solar es recibida aproximadamente menor a 148 kcal/cm². La placa del secador se construyó con un marco de 0.40 m x 0.80 m que se ajusta con una malla de zaranda en acero inoxidable teniendo los diámetros de los alambres de 1,25 mm a 5 mm de distancia con referencia SAE 1010 - 1050 a 1075. Toda la estructura se ajustó con remaches de 1/8" para una mejor fijación (figuras 9, 10, 11 y 12, ver anexo. Secador parabólico).

El secador solar se construyó con el fin de tener mayor ventilación ya que la entrada de aire seco es por debajo y la salida de aire húmedo se colocó por arriba para que en el proceso de secado se obtengan resultados satisfactorios.



Figura 9. Construcción de secador solar parabólico.

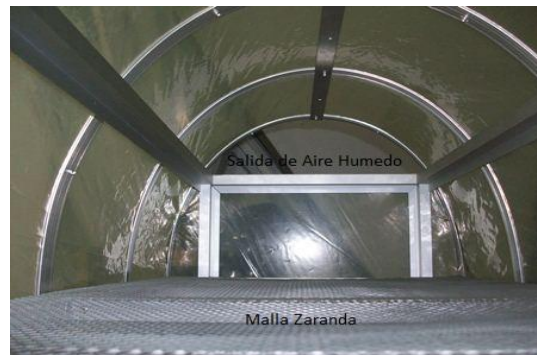


Figura 10. Vista interna del secador solar en aluminio.

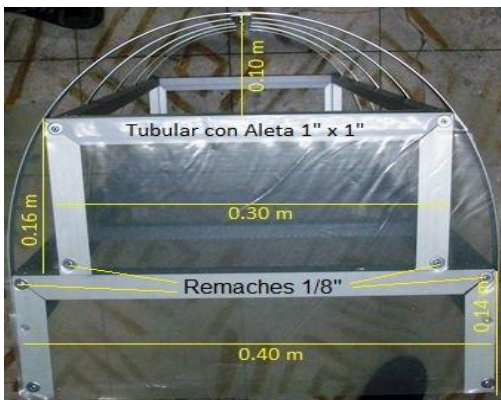


Figura 11. Vista frontal del secador

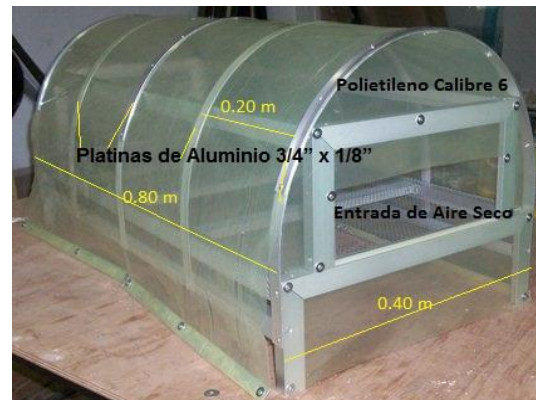


Figura 12. Vista lateral del secador

3.2.2. Selección de secadores para evaluación comparativa

Para poder evaluar la eficiencia del secador solar parabólico en material no higroscópico (aluminio), se utilizaron dos secadores solares en material higroscópico

3.2.2.1. Secador parabólico en guadua-madera

El secador solar en guadua-madera tiene un área de 0.50 m x 1.0 m y una altura de 0.40 m; la base fue construida con tablas unidas de maderas y forradas con polisombra negra de calibre 10, los parales también son de madera. La cubierta es parabólica y está formada por latas de 0.02 m de ancho en guadua a 0.20 m una de la otra y colocándole un polietileno de calibre 6 para forrar dicha cubierta (figura 13).

El secador parabólico en material higroscópico (guadua-madera) pertenece al Laboratorio de Secado de Productos Biológicos de la Facultad de Ingeniería Agrícola.



Figura 13. Secador solar parabólico en guadua-madera

3.2.2.2. Secador solar de pasera en madera

El Secador solar de pasera se encontraba en la Finca Villa Stefanny en el municipio de Rivera (Huila). Es un secador que comprende 5 paseras construidas en tablas unidas de madera y se deslizan sobre rieles; cada una de ellas tiene un área de 3.0 m x 3.0 m y una altura de 0.15m (figura 14). La pasera que se utilizó para la investigación fue la segunda pasera (de abajo hacia arriba) (figura 15).



Figura 14. Secador pasera en madera.



Figura 15. Pasera de estudio.

3.3. ETAPAS DE BENEFICIO DE CACAO “*Theobroma cacao L*”

El manejo de Poscosecha de cacao “*Theobroma cacao L*” denominado beneficio constituye un aspecto de máxima importancia donde se ejecutan los pasos que se describen a continuación, para lograr la entrega de un producto de la mejor condición de acuerdo al método utilizado por el cacaotero. El proceso de beneficio se realizó en 3 repeticiones seguidas cada 15 días donde se llevó a cabo registros de toma de datos: temperatura ambiente de la finca, temperatura del fermentador, temperatura de aire y temperatura de grano en cada secador tomadas con las Turbo Tag T-702B (figura 16); humedad relativa ambiente se registró con el termo-higrómetro Model: 303C (figura 17).

Estos datos se tomaron para cada una de las etapas del proceso de beneficio del cacao: recolección, selección, apertura de mazorcas, fermentación y secado del grano; siendo la etapa de secado el enfoque principal de este trabajo.



Figura 16. Turbo Tag T-702B.

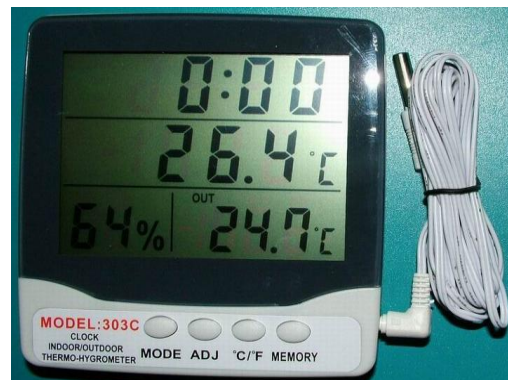


Figura 17. Termo-higrómetro model: 303C

3.3.1. Etapa de recolección

La recolección se realizó en la parcela demostrativa de CasaLuker en la Finca Villa Stefanny, donde se seleccionó las mazorcas en los estados de maduración y sobre maduración; esta última se recolecta porque le ocasiona pérdidas al cacaotero al no aprovecharlas debido a que en la próxima recolección la mazorca no estaría en condiciones aceptables para utilizar el grano. Esta fase se realizó con las herramientas adecuadas para no ocasionarle daños a la planta (figura 18).



Figura 18. Etapa de recolección

3.3.2. Etapa de apertura y desgrane de mazorcas

Al estar ya recolectadas todas las mazorcas en el lugar específico de desgrane, se comenzó a realizar el quiebre de cada una de las mazorcas con un machete (figura 19) para empezar a realizar el adecuado desgrane (figura 20).



Figura 19. Apertura de mazorcas



Figura 20. Desgrane de mazorcas

3.3.3. Etapa de Fermentación

Es la etapa fundamental en el beneficio, ya que aquí es donde incide la calidad del grano; es por ello que se llevó a cabo un control de registros con el fin de determinar el grado de fermentación de cada uno de los muestreos realizados. Este proceso se realizó en el lugar asignado por el propietario de la finca para su respectivo control, allí tiene un cajón de madera donde se colocó toda la masa y se adecuó de acuerdo a la cantidad que se recogió en el desgrane para que quedara alta y gruesa más o menos de 0.70 m x 0.30 m x 0.30; luego se cubrió con hojas de plátano por el haz (figura 21), ya que estas ayudan a mantener el calor y por tanto las levaduras trabajan mejor y se obtiene un mayor grado de fermentación, además es cubierto con costales de fique. La masa se removió por primera vez a las 48 h y se continúa cada 24 h hasta completar el tiempo de fermentación que son 144 h (6 días) (figura 22); en este lapso de tiempo se tomaron y registraron datos de temperatura de grano con un termómetro BARNANT 100 Modelo: 600-2820 (figura 23) en diferentes puntos de la masa y el pH con las cintas medidoras de pH (figura 24); realizado antes de cada remoción.



Figura 21. Cubrimiento de la masa fermentación.



Figura 22. Remoción de la masa de fermentación.

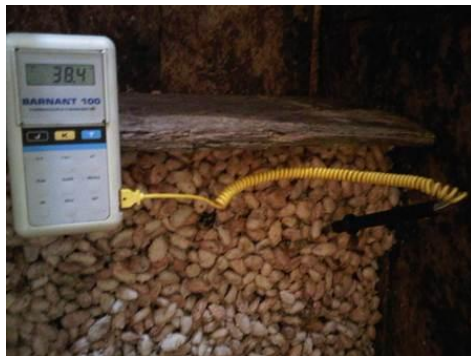


Figura 23. Temperatura de grano en fermentación



Figura 24. Cintas medidoras de pH

3.3.4. Etapa de Secado

Terminado el proceso de fermentación, se dejan reposar los granos fermentados y luego se colocan en cada uno de los secadores seleccionados para el proceso; es aquí donde comienza simultáneamente el secado del grano (figura 25). Para cada uno de los secadores se llevó a cabo una muestra de 6 Kg formándose una capa de 2.5 cm. En el secador de pasera el grano se distribuyó en la misma área de los 2 secadores parabólicos.

Esto se desarrolló con el fin de evaluar la eficiencia de acuerdo al tiempo de secado con un control de registros, donde se tomaron datos de temperatura de aire y en el grano con las Turbo Tag T-702B para cada secador; con el fin de comparar los datos de acuerdo a los muestreos realizados. En esta etapa se revolvió la masa de cacao cada 3 hr para la distribución uniforme de secado.



Figura 25. Secado simultaneo de los secadores solares

3.3.4.1. Determinación del contenido humedad inicial del cacao

Después de terminada la etapa de fermentación, se calculó el contenido de humedad inicial del grano en cada uno de los ensayos realizados.

Se realizó el correspondiente procedimiento en el laboratorio de Procesos y Control de calidad de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Surcolombiana; en donde se tomó tres muestras de granos de cacao colocados en cajas de petry, cada una de 20 gr como peso inicial (P_i) del mismo; las muestras se pesaron en la balanza electrónica de marca SCIENTECH BOUDER modelo SG 8000 con capacidad 8000 gr + 0.1 gr (figura 26), posteriormente se llevó al horno universal Memmert referencia UM 200 (figura 27) a una temperatura de 100°C por 24 hrs.

Ya cumplido el tiempo determinado se sacaron las cajas de petry dejándolas reposar en el desecador de vidrio y continuamente se pesaron los granos en la misma balanza electrónica, obteniendo el peso final (P_f) de las muestras.



Figura 26. Balanza electrónica SG 8000



Figura 27. Horno universal Memmert UM 200

Posteriormente se utilizó la fórmula de contenido de humedad (ecuación 5) para la obtención de datos.

$$\%H = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde,

$\%H$: Contenido de humedad

P_i : Peso inicial

P_f : Peso final

Se calcula el promedio de los pesos finales de las muestras de laboratorio con cada una de los ensayos realizados durante el proceso (ecuación 6):

$$P_f = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad \text{Ecuación 9}$$

• **Ensayo I:**

$$P_f = \frac{(8.65\text{gr} + 8.60\text{gr} + 8.55\text{gr})}{3}$$

$$P_f = \frac{25.8 \text{ gr}}{3}$$

$$P_f = 8.60\text{gr}$$

Entonces se reemplaza en la ecuación del contenido de humedad,

$$\%H = \frac{20 \text{ gr} - 8.6 \text{ gr}}{20 \text{ gr}} * 100$$

$$\%H = 57 \%$$

La Finca Villa Stefanny pertenece a la Asociación de productores de cacao de Rivera (ASOPROCAR), en donde cuentan con un determinador de humedad de granos de marca MT-16™ Portable Grain Moisture Tester Part No. 08155 (figura 28), el cual es el equipo que se utilizó para determinar la humedad del grano durante el proceso de secado.

El contenido de humedad inicial no se realizó con el determinador de humedad (higrómetro) (figura 28), porque ningún equipo que determine la humedad por medio de lectura indirecta tiene la capacidad de arrojar datos del granos en baba, debido a que presenta un contenido de humedad bastante alto y no es posible la lectura; es por tal razón que se hizo dicha determinación con la prueba de laboratorio.

La humedad de los granos de cacao se empezó a medir cuando culminó la etapa de fermentación e inició el proceso de secado en los tres secadores. La toma de datos se hizo con el determinador de humedad, donde se tomó una muestra y se depositó los granos de cada secador en el equipo para medir la humedad cada 3 horas hasta alcanzar el 7% de humedad, la cual es la requerida para el grano seco (figura 29).



Figura 28. Determinador de humedad de marca MT-16™



Figura 29. Contenido de humedad ideal

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Etapa de Recolección

En las recolecciones realizadas para la investigación se mostró que en el ensayo III hubo poca cosecha y por esta razón se presentó un número menor de mazorcas recolectadas con relación a los ensayos I y II (Tabla 5).

Tabla 4. Mazorcas sanas y dañadas en la etapa de recolección

FECHA DE RECOLECCIÓN	SANAS		DAÑADAS		No. MAZORCAS RECOLECTADAS	X	S	Cv
	No.	%	No.	%				
Mayo -01- 2012	412	96.5	15	3.5	427	368	374.80	1.02
Mayo-15-2012	387	94.6	22	5.4	409			
Mayo-27-2012	237	88.4	31	11.6	268			

4.2. Etapa de Apertura de Mazorcas

En la apertura de mazorcas durante los tres ensayos realizados se presentó menor cantidad de grano en el ensayo III debido a la poca recolección que se hizo (Tabla 6). Y se muestra un coeficiente de variación heterogéneo debido a su resultado.

Tabla 5. Peso del grano en la etapa de apertura de mazorcas

FECHA APERTURA DE MAZORCAS	PESO DEL GRANO (Kg)	X	S	Cv
Mayo 02 de 2012	45	37.36	38.58	1.02
Mayo 16 de 2012	42			
Mayo 28 de 2012	26			

4.3. Etapa de Fermentación

La etapa de fermentación para el ensayo I muestra en la tabla 7 que la temperatura promedio del ambiente fue de 26.8°C y la del beneficiadero se mantuvo en 24.8 °C por observación continua durante seis días.

Tabla 6. Variación de la temperatura durante la fermentación (ensayo I)

t_F (hr)	T°_A (°C)	T°_B (°C)	T°_G (°C)	pH
0	25.5	23.7	21.6	3.0
24	27.3	24.6	28.2	3.5
48	28.3	26.3	33.4	4.0
72	26.6	25.2	44.2	4.2
96	26.1	24.1	42.6	4.0
120	26.5	24.7	41.2	4.5
144	27.2	24.9	35.3	5.0

t_F : tiempo de fermentación (hr)

T°_B: Temperatura del beneficiadero (°C)

T°_A: Temperatura Ambiente (°C)

T°_G: Temperatura del Grano (°C)

En el ensayo I la figura 30 muestra que la temperatura del grano fue creciente durante las 72 horas alcanzando una estabilidad de 42.6°C, donde coincide con OLIVEROS et al. (2011) obteniendo temperaturas superiores a los 40°C, y se ubicaron en los máximos por encima de los resultados encontrados por GRAZIANI et al. (2003) con 41.3°C y TORRES et al. (2004) 37.3°C. Los días cuarto, quinto y sexto, comenzando a decrecer a partir de este y en el último día hasta una temperatura superior a la del ambiente que, como se dijo, fue durante la semana de observación (ensayo I) de 26.8°C en promedio.

En referencia al pH, la masa inicial de almendras comienza el proceso de fermentación con pH ácido de 3.0; el grano en los tres primeros días tiene una rápida disminución del pH en forma lineal, lo que ha sido atribuido al metabolismo del ácido cítrico por acción de las levaduras según GRAZIANI et al. (2003), luego se mantiene estable. De igual manera en los últimos días de fermentación el pH aumento hasta 5.0 ubicándose cerca del rango establecido como aceptable por OLIVEROS et al.(2003).

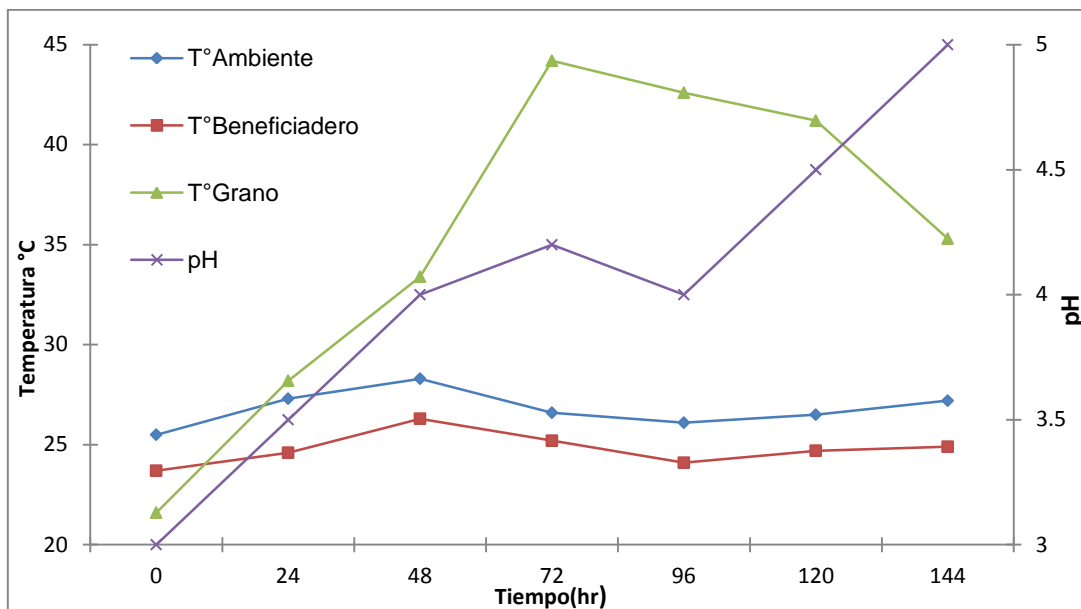


Figura 30. Variación en los parámetros físicos (T°_A , T°_B , T°_G y pH) Vs t_F

El ensayo II, la figura 31 la temperatura ambiente no fue estable en los siete días de experimentación; con leves altibajos fue en descenso desde los 31.3°C, registrados al comienzo de las observaciones (día 0) hasta mostrar un valor de 27.7°C en el último día. En cuanto a la temperatura del beneficiadero, fue estable en los primeros cuatro días con un promedio de temperatura de 28.5°C (ver tabla 8). La temperatura a partir de entonces descendió abruptamente hasta registrar en el séptimo y último día 25.7°C (tabla 8). La temperatura del grano fue creciente hasta el tercer día de observación, en el que se registra 38.8°C, siendo este el rango más alto del ensayo similar a 37.3°C por TORRES et al. (2004). Pero a la vez resulta siendo inferior a las temperaturas dadas por GRAZIANI et al. (2003) con 41.3

Tabla 7. Variación de la temperatura durante la fermentación (ensayo II)

t_F (Hr)	T°_A (°C)	T°_B (°C)	T°_G (°C)	pH
0	31.3	28.7	25.6	3.5
24	33.2	28.7	26.6	4
48	28.9	28.3	33.1	4.5
72	30.8	28.2	38.8	5
96	26.8	25.8	38.1	5.5
120	28.8	26.2	30.8	5.5
144	27.7	25.7	29.7	6

Respecto al pH aquí puede darse una interpretación análoga, a la dicha en el ensayo I, con relación al proceso en los cuatro días iniciales ya que la acidez disminuye linealmente y se mantiene estable en el día quinto, tomando un pH de 5.5 hasta el día siguiente; a partir del cual los granos disminuyeron linealmente hasta alcanzar un pH de 6, valor cercano a los reportados por TORRES et al. (2004) al finalizar el proceso de fermentación.

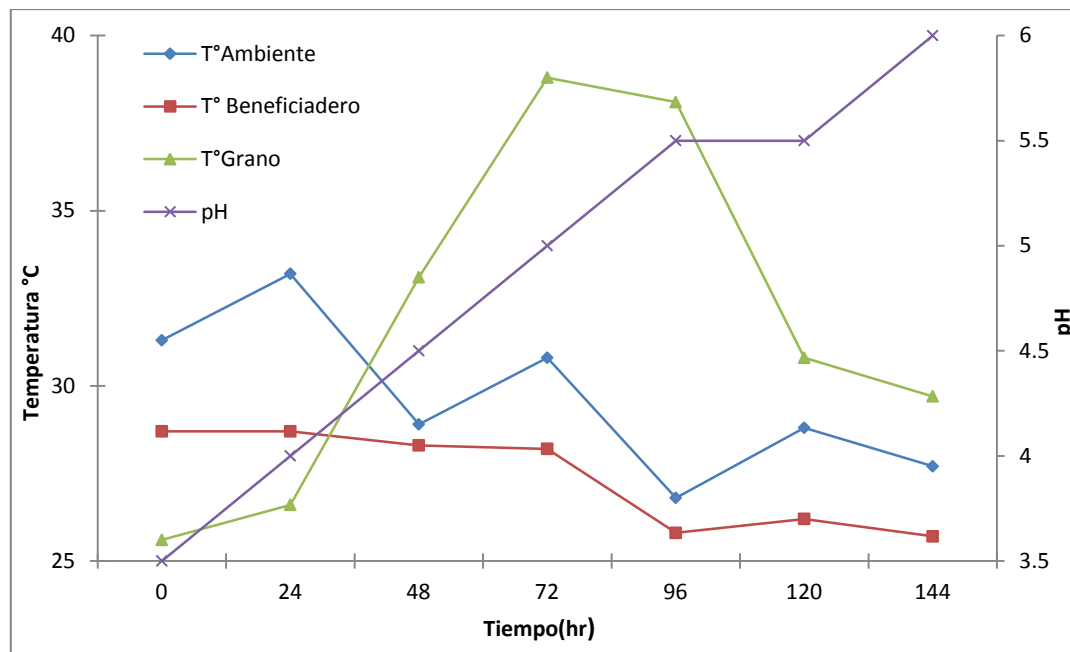


Figura 31. Variación en los parámetros (T°_A , T°_B , T°_G y pH)

Con referencia al último ensayo (ensayo III), la temperatura ambiente (ver tabla 9 y figura 32) en los cinco primeros días fue de 29.4°C, pero en el último día hubo un incremento significativo de 5 °C (ver tabla 9); hablando de la temperatura del beneficiadero, esta fue estable durante todos los días de observación con un promedio de 27.9°C. Respecto a la temperatura del grano ésta creció linealmente en las 96 horas de observación, aumentó de 27.7°C a 41°C, luego decrece en forma lineal hasta un valor de 34.1°C. Este ensayo arrojó resultados totalmente diferentes a los anteriores debido a que su temperatura máxima se alcanza en las 96 horas, en cambio TORRES et al. (2004), GRAZIANI et al. (2003) y OLIVEROS et al. (2011) la temperatura máxima se obtuvo a las 72 horas de observación.

En cuanto al pH, la muestra de granos al inicio de la fermentación es bastante ácida obteniendo un pH inicial de 3.5, valores similares obtenidos por GRAZIANI et al. (2003). Durante el proceso se mantienen dos valores estables que corresponden a los días 3 y 5 con pH de 4.5 y 5.0

respectivamente, esto se pudo presentar porque el primer volteo de masa se realizó a las 72 horas de fermentación debido a que se obtuvo poca cantidad de grano. Pero de igual manera el pH de la masa aumento a 5.5, ubicándose en el rango establecido por OLIVEROS et al.(2011) de 5.2 - 5.5.

Tabla 8. Variación de la temperatura durante la fermentación (ensayoIII)

t_F (Hr)	T°_A ($^{\circ}C$)	T°_B ($^{\circ}C$)	T°_G ($^{\circ}C$)	pH
0	29.8	28.4	27.7	3
24	28.5	26.8	30.5	3.5
48	28.6	27.7	33.2	4.5
72	31.5	28.6	35.6	4.5
96	28.9	28.7	41	5
120	29.1	26.7	36.6	5
144	34.4	28.2	34.1	5.5

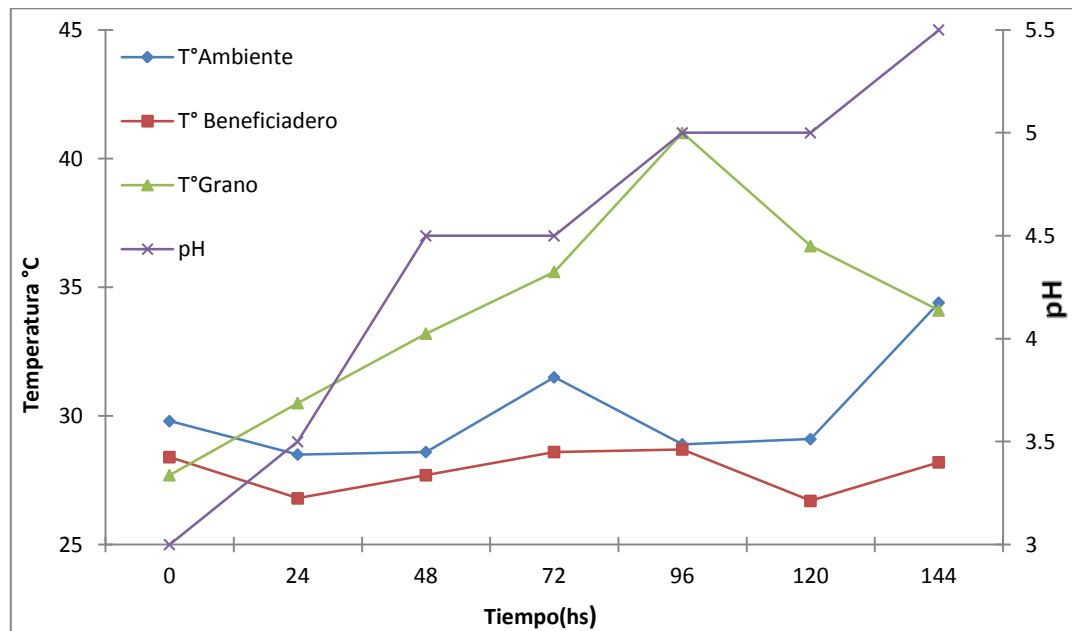


Figura 32. Variación en los parámetros físicos (T°_A , T°_B , T°_G y pH)

4.4. Determinación del contenido humedad inicial del cacao

El procedimiento correspondiente para la determinación de humedad se hizo en cada ensayo, donde se obtuvo los datos de laboratorio con el fin de conocer el contenido de humedad inicial del grano al empezar la etapa de secado (tabla 5).

Con los resultados obtenidos se notó que en el ensayo III se presentó un contenido de humedad inicial menor con respecto a los demás ensayos, quizá una de las razones para que esto haya sucedido fue porque en el ensayo III la etapa de fermentación fue de 12 horas más que en los demás ensayos.

Tabla 9. Contenido de humedad

ENSAYO	P_i (gr)	P_f (gr)	H (%)
I	20	8.65 - 8.60 - 8.55	57
II	20	8.40 - 8.42 - 8.38	58
III	20	9.40 - 9.50 - 11.10	50

4.5. Etapa de secado

A continuación se presentan las tablas con los registros de datos tomados para la etapa de secado cada 3 horas de temperatura ambiente (T°_A), temperatura de aire de secado (T°_{AS}) y contenido de humedad (H), efectuados en el ensayo I (mayo 8 de 2012), ensayo II (mayo 21 de 2012) y ensayo III (junio 4 de 2012) en los 3 secadores solares.

Se omitieron los registros tomados a las 12:00 y 3:00 am debido a que no se adquirieron los datos del contenido de humedad del grano ni humedad relativa ambiente.

Tabla 10. Temperatura y contenido de humedad en cada secador solar (ensayo I)

t_s (hr)	T°_A ($^{\circ}C$)	SECADOR SOLAR PARABÓLICO (GUADUA - MADERA)		SECADOR SOLAR DE PASERA (MADERA)		SECADOR SOLAR PARABÓLICO (ALUMINIO)	
		T°_{AS} ($^{\circ}C$)	H (%)	T°_{AS} ($^{\circ}C$)	H (%)	T°_{AS} ($^{\circ}C$)	H (%)
0	33.3	46.2	57.0	35.4	57.0	39.6	57.0
3	26.8	24.3	55.0	25.9	55.1	23.7	54.8
6	24.2	22.0	52.5	25.0	52.4	21.8	51.5
15	21.0	19.7	50.3	22.0	49.8	19.8	46.9
18	26.0	29.8	47.6	29.0	47.4	30.3	43.1
21	30.7	40.9	44.2	40.2	43.1	38.7	40.4
24	33.3	37.3	41.1	35.2	40.3	38.2	38.5
27	27.1	25.5	37.2	28.3	36.8	23.9	33.7
30	24.5	23.0	35.9	24.8	34.7	22.5	30.4
39	20.5	19.3	34.6	21.6	33.6	19.1	28.3
42	26.1	29.6	33.2	28.1	32.5	31.8	27.1
45	29.7	37.5	32.6	33.2	30.1	36.6	26.9
48	31.7	40.8	30.1	36.1	27.9	39.7	25.3
51	27.6	26.5	28.5	28.6	26.1	23.3	23.6
54	24.2	23.1	27.3	25.3	25.0	23.7	22.6
63	21.3	20.5	26.2	22.6	24.2	19.6	20.9
66	25.2	27.4	25.1	25.7	22.5	33.6	19.7
69	31.7	36.8	23.0	31.5	20.7	37.5	18.2
72	33.8	43.4	21.4	41.0	18.1	43.4	16.4
75	27.3	30.9	20.1	27.6	16.8	23.8	15.7
78	24.7	23.4	19.3	24.8	15.9	22.4	15.2
87	21.2	19.9	19.0	21.2	14.2	20.1	14.8
90	25.8	24.7	18.0	27.3	13.7	27.3	12.9
93	30.9	38.3	16.9	41.6	12.9	39.6	11.9
96	32.2	40.1	15.7	38.0	11.4	23.7	9.2
99	27.4	30.3	14.9	27.8	9.8	21.8	7.0
102	23.1	23.4	14.6	25.5	9.5		
111	21.0	19.5	13.7	22.2	8.8		
114	24.3	23.9	13.0	30.1	7.0		
117	30.3	40.9	11.9				
120	31.6	32.6	8.9				
123	27.5	26.3	7.0				

t_s : tiempo de secado (hr)
 T°_A : Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
 T°_{AS} : Temperatura aire de secado ($^{\circ}C$)
H: Contenido de humedad (%)

Tabla 11. Temperatura y contenido de humedad en cada secador solar (ensayo II)

t_s (hr)	T°_A ($^{\circ}C$)	SECADOR SOLAR PARABÓLICO (GUADUA - MADERA)		SECADOR SOLAR DE PASERA (MADERA)		SECADOR SOLAR PARABÓLICO (ALUMINIO)	
		T°_{AS} ($^{\circ}C$)	H (%)	T°_{AS} ($^{\circ}C$)	H (%)	T°_{AS} ($^{\circ}C$)	H (%)
0	29.6	39.9	58.0	27.2	58.0	31.9	58.0
3	26.1	23.5	53.2	24.7	54.0	22.8	53.2
6	24.2	22.3	51.6	24.0	51.2	21.8	51.0
15	20.6	19.1	47.6	21.4	48.2	19.1	46.5
18	24.7	26.5	44.6	29.9	45.1	27.3	43.2
21	27.1	34.5	41.6	35.0	42.3	34.7	38.0
24	30.4	33.0	38.7	38.3	39.6	34.5	34.2
27	26.1	24.3	35.2	27.4	35.1	23.7	30.1
30	24.0	22.0	33.1	24.0	33.3	22.0	28.0
39	19.4	16.9	32.1	20.0	32.0	17.2	25.1
42	26.1	30.8	31.0	24.4	30.6	36.3	23.6
45	29.1	38.2	28.7	36.8	27.2	34.5	21.4
48	33.2	48.5	24.9	44.0	23.9	49.0	18.7
51	27.7	25.5	23.1	27.7	22.8	24.4	16.9
54	26.4	25.0	22.6	26.2	22.0	25.3	16.0
63	21.6	20.3	22.0	22.9	21.6	19.8	14.9
66	27.3	29.8	21.3	29.1	20.2	37.2	14.0
69	29.6	36.4	20.2	37.3	18.1	36.1	13.6
72	30.8	43.8	19.1	44.5	16.7	46.7	12.0
75	26.4	24.7	18.0	28.4	15.8	23.7	10.8
78	24.4	22.1	17.6	25.2	15.3	22.3	9.7
87	20.7	19.6	17.6	21.7	14.9	19.5	8.2
90	24.2	26.7	17.3	24.4	14.4	26.4	7.0
93	29.8	42.8	14.9	29.9	12.5		
96	33.2	38.0	12.8	31.4	10.3		
99	27.5	25.5	11.5	26.7	8.5		
102	24.9	23.0	11.1	25.1	7.9		
111	20.9	18.6	10.8	21.9	7.5		
114	25.8	26.5	10.2	25.2	7.0		
117	32.5	45.0	9.6				
120	29.6	32.8	8.2				
123	27.5	27.2	7.0				

Tabla 12. Temperatura y contenido de humedad en cada secador solar (ensayo III)

t_s (hr)	T°_A ($^{\circ}C$)	SECADOR SOLAR PARABÓLICO (GUADUA - MADERA)		SECADOR SOLAR DE PASERA (MADERA)		SECADOR SOLAR PARABÓLICO (ALUMINIO)	
		T°_{AS} ($^{\circ}C$)	H (%)	T°_{AS} ($^{\circ}C$)	H (%)	T°_{AS} ($^{\circ}C$)	H (%)
0	36.0	52.5	50.0	40.3	50.0	46.7	50.0
3	27.1	24.7	44.8	26.9	45.1	24.8	40.8
6	25.8	22.3	42.7	25.1	42.9	23.2	37.5
15	21.4	19.8	39.6	22.0	40.6	20.4	34.4
18	28.7	35.3	37.2	33.1	38.2	36.3	31.2
21	34.1	43.1	35.5	58.2	33.6	43.2	27.8
24	36.2	43.3	33.4	38.5	25.8	43.7	22.8
27	28.2	25.2	28.2	29.1	20.7	25.1	16.6
30	24.5	21.5	26.3	25.1	19.4	22.5	15.1
39	21.2	19.8	25.1	21.9	18.8	20.2	14.2
42	27.3	31.6	23.0	36.0	16.3	30.3	13.1
45	29.6	41.1	19.6	35.6	13.1	36.8	12.0
48	30.8	40.6	15.1	36.1	10.9	37.8	10.0
51	28.4	26.5	12.2	29.9	9.4	32.0	7.0
54	22.1	20.4	11.7	24.2	8.7		
63	21.6	20.4	11.6	22.7	8.0		
66	22.4	24.8	10.0	23.9	7.0		
69	28.5	40.2	8.0				
72	32.6	42.4	7.0				

Se observa en la figura 33 que el grano del secador de aluminio llegó al contenido de humedad ideal del 7% a las 99 horas de secado, logrando un menor tiempo con relación a los otros 2 secadores, alcanzando una diferencia de 19.51% en el tiempo de secado con respecto a el secador guadua-madera que llegó a la humedad ideal a las 123 horas, y del 12.19% de tiempo con el de pasera que se demoró 114 horas.

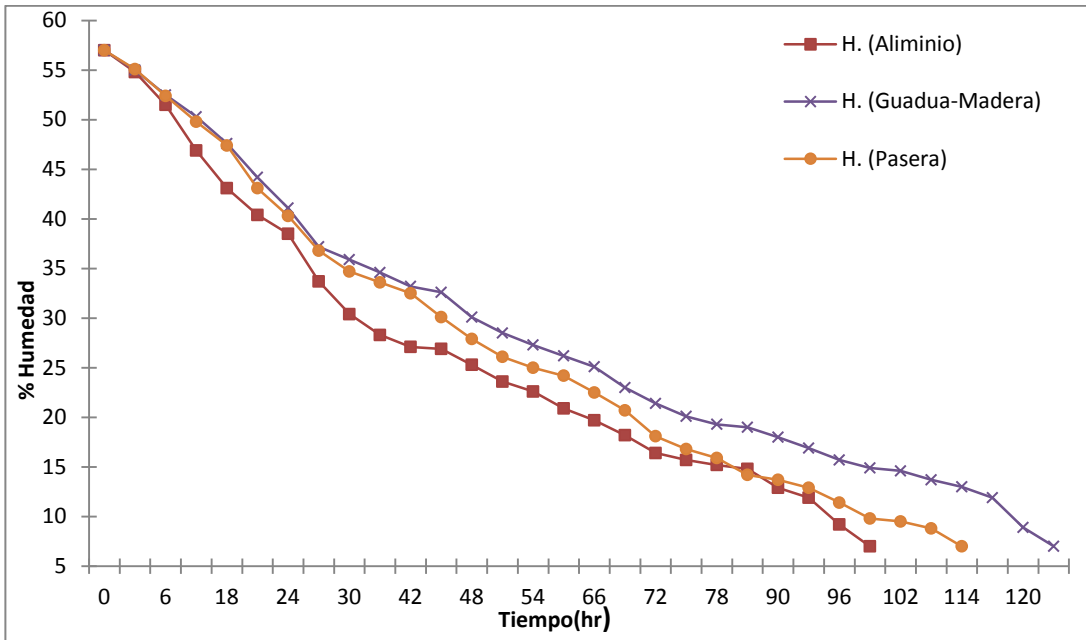


Figura 33. Curva de secado (ensayo I)

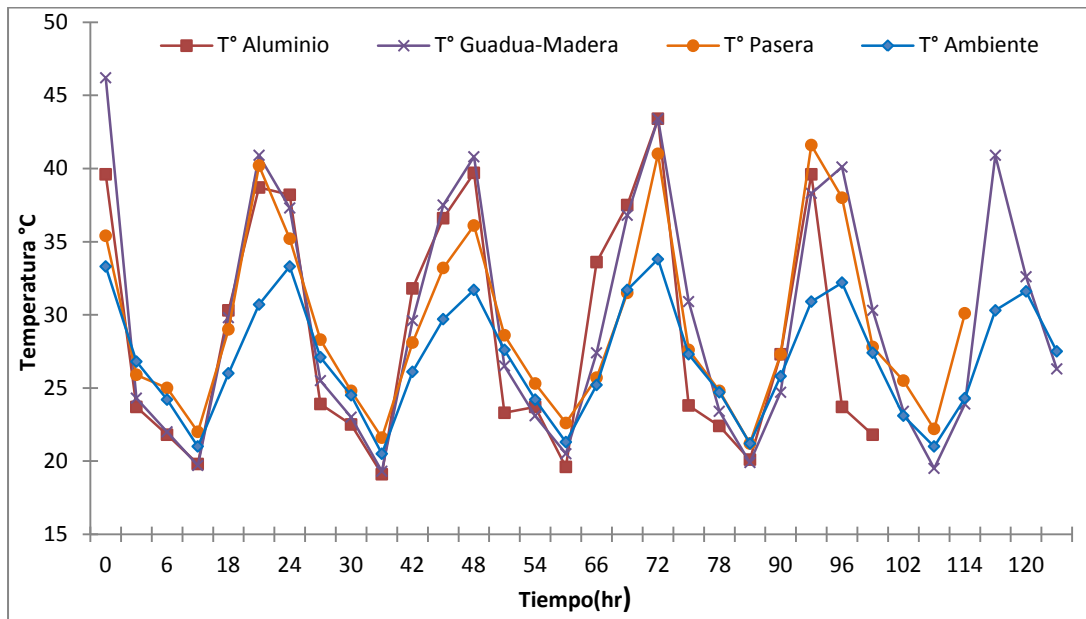


Figura 34. Cambios de temperatura aire durante la etapa de secado (ensayo I)

El ensayo II inicia con un contenido de humedad de 58%. La figura 35 se presenta una similitud en los secadores de material higroscópico, donde el secador de guadua-madera demoró 123 horas y el secador de pasera 114 horas dando una diferencia de tiempo con 7.32%, en cambio el secador de aluminio logró un menor tiempo de secado (99 horas) equivalente a un 27.83% con el de guadua-madera.

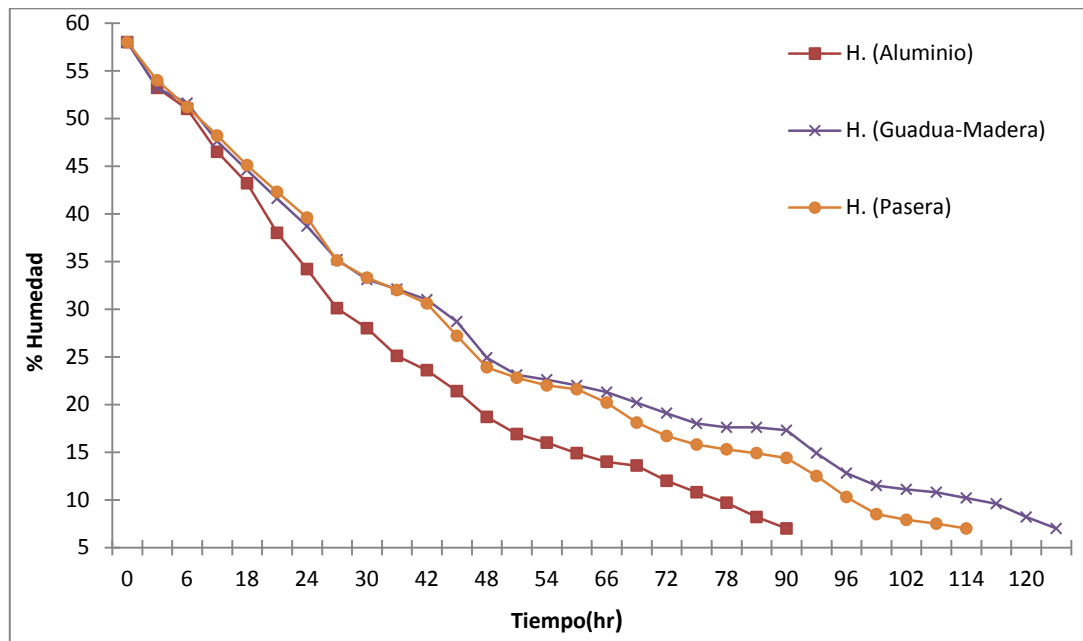


Figura 35. Curva de secado (ensayo II)

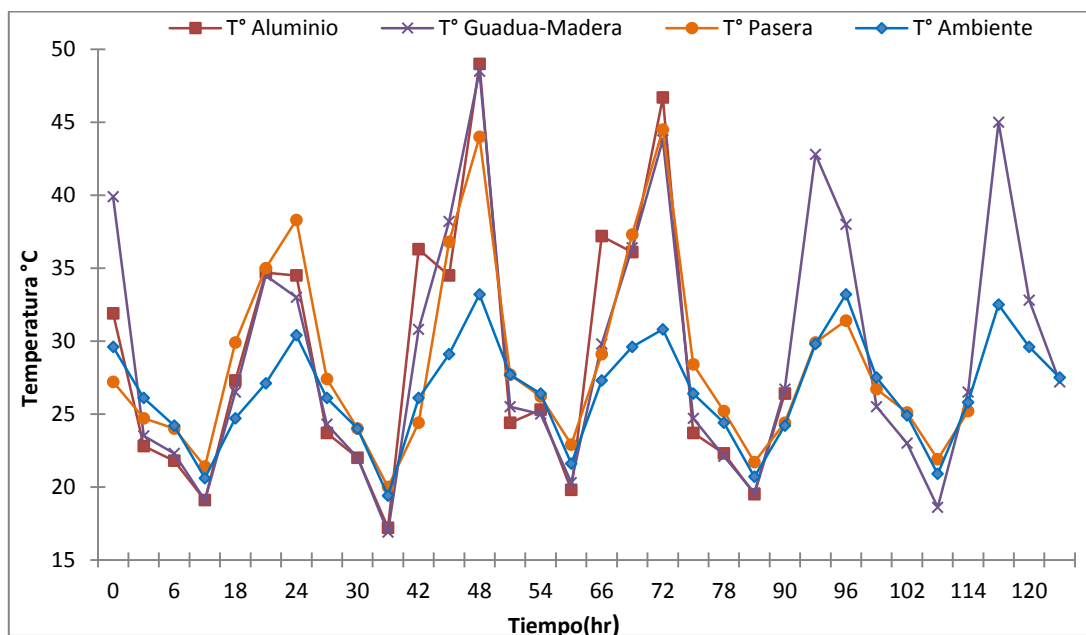


Figura 36. Cambios de temperatura aire durante la etapa de secado (ensayo II)

El ensayo III muestra en la figura 37 un comportamiento diferente a los anteriores ensayos, debido a su contenido de humedad inicial (50%) y a su corto tiempo de secado, donde el secador de aluminio tardo tan sólo 51 horas, y los secadores de pasera y guadua-madera tardaron 66 y 72 horas respectivamente.

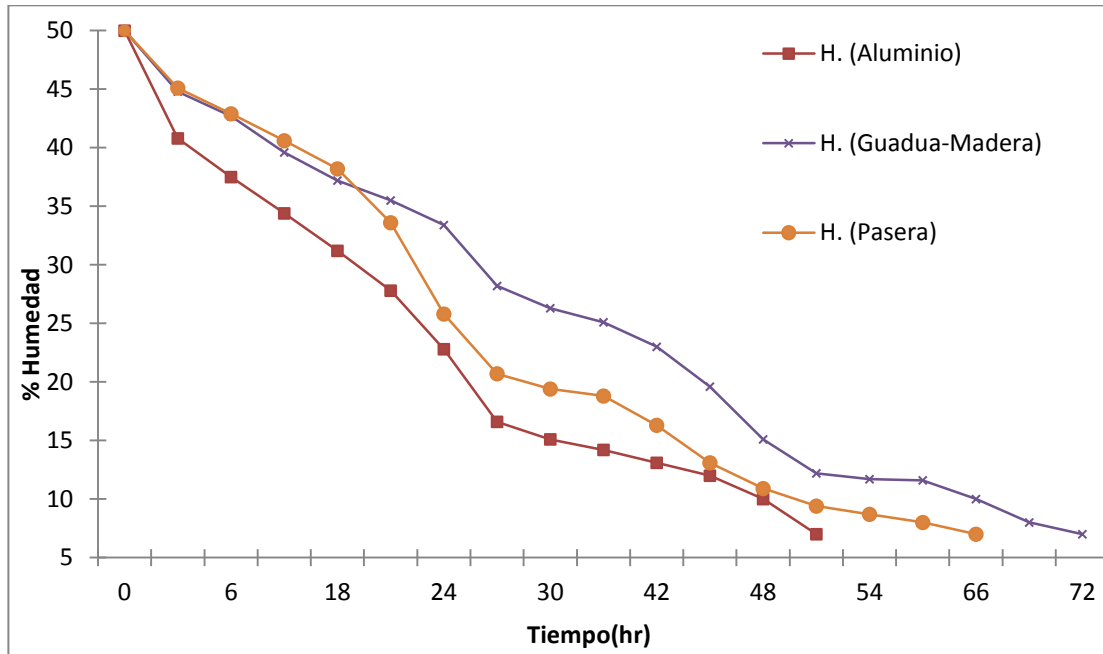


Figura 37. Curva de secado (ensayo III)

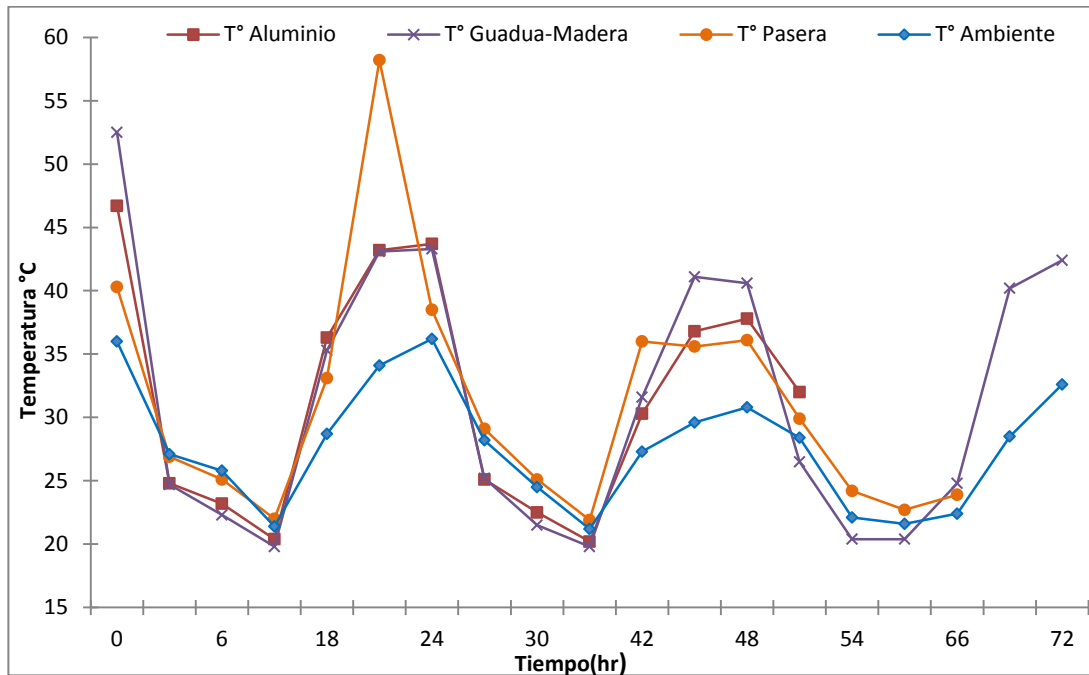


Figura 38. Cambios de temperatura aire durante la etapa de secado (ensayo III)

La razón de humedad (MR) se halló por medio de la ecuación 4, donde es necesario tener una humedad de equilibrio (M_e) del grano; ésta se obtuvo por medio de la figura 7. Se utilizó para ello la humedad relativa y temperatura aire de secado promedio de los secadores en los 3 ensayos.

Tabla 13. Humedad de equilibrio

Ensayo	SECADOR ALUMINIO			SECADOR GUADUA – MADERA			SECADOR PASERA		
	\bar{x} H.R (%)	\bar{x} T° _{AS} (°C)	Me	\bar{x} H.R (%)	\bar{x} T° _{AS} (°C)	Me	\bar{x} H.R (%)	\bar{x} T° _{AS} (°C)	Me
1	57.00	29.00	6.50	58.00	31.00	6.50	58.00	29.00	6.50
2	60.00	29.00	6.50	60.00	30.00	6.50	60.00	28.00	6.50
3	49.00	32.00	6.00	52.00	31.00	6.00	52.00	31.00	6.00

Muestra de cálculo:

1. Tiempo = 0 hr para los 3 secadores

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

$$MR = \frac{57.00 - 6.50}{57.00 - 6.50}$$

$$MR = 1$$

2. Tiempo = 54 hr secador de aluminio

$$MR = \frac{22.60 - 6.50}{57.00 - 6.50}$$

$$MR = 0.32$$

3. Tiempo = 111 hr secador de guadua-madera

$$MR = \frac{19.50 - 6.50}{57.00 - 6.50}$$

$$MR = 0.14$$

Tabla 14. Razón de humedad (ensayo I)

t _s (hr)	H R (%)	SECADOR SOLAR PARABÓLICO (GUADUA - MADERA)				SECADOR SOLAR DE PASERA (MADERA)				SECADOR SOLAR PARABÓLICO (ALUMINIO)			
		T° _{AS} (°C)	H (%)	MR	LnMR	T° _{AS} (°C)	H (%)	MR	LnMR	T° _{AS} (°C)	H (%)	MR	LnMR
0	50.30	46.20	57.00	1.00	0	35.40	57.00	1.00	0	39.60	57.00	1.00	0
3	59.00	24.30	55.00	0.96	-0.04	25.90	55.10	0.96	-0.04	23.70	54.80	0.96	-0.04
6	62.30	22.00	52.50	0.91	-0.09	25.00	52.40	0.91	-0.10	21.80	51.50	0.89	-0.12
15	78.30	19.70	50.30	0.87	-0.14	22.00	49.80	0.86	-0.15	19.80	46.90	0.80	-0.22
18	66.70	29.80	47.60	0.81	-0.21	29.00	47.40	0.81	-0.21	30.30	43.10	0.72	-0.32
21	54.00	40.90	44.20	0.75	-0.29	40.20	43.10	0.72	-0.32	38.70	40.40	0.67	-0.40
24	44.30	37.30	41.10	0.69	-0.38	35.20	40.30	0.67	-0.40	38.20	38.50	0.63	-0.46
27	55.70	25.50	37.20	0.61	-0.50	28.30	36.80	0.60	-0.51	23.90	33.70	0.54	-0.62
30	62.30	23.00	35.90	0.58	-0.54	24.80	34.70	0.56	-0.58	22.50	30.40	0.47	-0.75
39	77.30	19.30	34.60	0.56	-0.59	21.60	33.60	0.54	-0.62	19.10	28.30	0.43	-0.84
42	65.30	29.60	33.20	0.53	-0.64	28.10	32.50	0.51	-0.66	31.80	27.10	0.41	-0.90
45	48.00	37.50	32.60	0.52	-0.66	33.20	30.10	0.47	-0.76	36.60	26.90	0.40	-0.91
48	38.70	40.80	30.10	0.47	-0.76	36.10	27.90	0.42	-0.86	39.70	25.30	0.37	-0.99
51	48.30	26.50	28.50	0.44	-0.83	28.60	26.10	0.39	-0.95	23.30	23.60	0.34	-1.08
54	54.70	23.10	27.30	0.41	-0.89	25.30	25.00	0.37	-1.00	23.70	22.60	0.32	-1.14
63	82.30	20.50	26.20	0.39	-0.94	22.60	24.20	0.35	-1.05	19.60	20.90	0.29	-1.25
66	73.30	27.40	25.10	0.37	-1.00	25.70	22.50	0.32	-1.15	33.60	19.70	0.26	-1.34
69	43.00	36.80	23.00	0.33	-1.12	31.50	20.70	0.28	-1.27	37.50	18.20	0.23	-1.46
72	34.00	43.40	21.40	0.30	-1.22	41.00	18.10	0.23	-1.47	43.40	16.40	0.20	-1.63
75	52.00	30.90	20.10	0.27	-1.31	27.60	16.80	0.20	-1.59	23.80	15.70	0.18	-1.70
78	56.70	23.40	19.30	0.25	-1.37	24.80	15.90	0.19	-1.68	22.40	15.20	0.17	-1.76
87	75.30	19.90	19.00	0.25	-1.40	21.20	14.20	0.15	-1.88	20.10	14.80	0.16	-1.81
90	64.70	24.70	18.00	0.23	-1.48	27.30	13.70	0.14	-1.95	27.30	12.90	0.13	-2.07
93	47.70	38.30	16.90	0.21	-1.58	41.60	12.90	0.13	-2.07	39.60	11.90	0.11	-2.24
96	38.70	40.10	15.70	0.18	-1.70	38.00	11.40	0.10	-2.33	23.70	9.20	0.05	-2.93
99	50.70	30.30	14.90	0.17	-1.79	27.80	9.80	0.07	-2.73	21.80	7.00	0.01	-4.62
102	58.33	23.40	14.60	0.16	-1.83	25.50	9.50	0.06	-2.82				
111	83.70	19.50	13.70	0.14	-1.95	22.20	8.80	0.05	-3.09				
114	71.70	23.90	13.00	0.13	-2.05	30.10	7.00	0.01	-4.62				
117	54.00	40.90	11.90	0.11	-2.24								
120	47.00	32.60	8.90	0.05	-3.05								
123	51.70	26.30	7.00	0.01	-4.62								

t_s: Tiempo de secado (hr)

H: Contenido de humedad (%)

H.R: Humedad Relativa (%)

T°_{AS}: Temperatura aire de secado (°C)

MR: Razón de humedad (adim)

LnMR: Logaritmo natural MR

Tabla 15. Razón de humedad (ensayo II)

t _s (hr)	H R (%)	SECADOR SOLAR PARABÓLICO (GUADUA - MADERA)				SECADOR SOLAR DE PASERA (MADERA)				SECADOR SOLAR PARABÓLICO (ALUMINIO)			
		T° _{AS} (°C)	H (%)	MR	LnMR	T° _{AS} (°C)	H (%)	MR	LnMR	T° _{AS} (°C)	H (%)	MR	LnMR
0	53.00	39.90	58.00	1.00	0	27.20	58.00	1.00	0	31.90	58.00	1.00	0
3	70.00	23.50	53.20	0.91	-0.10	24.70	54.00	0.92	-0.08	22.80	53.20	0.91	-0.10
6	74.00	22.30	51.60	0.88	-0.13	24.00	51.20	0.87	-0.14	21.80	51.00	0.86	-0.15
15	83.00	19.10	47.60	0.80	-0.23	21.40	48.20	0.81	-0.21	19.10	46.50	0.78	-0.25
18	77.00	26.50	44.60	0.74	-0.30	29.90	45.10	0.75	-0.29	27.30	43.20	0.71	-0.34
21	66.00	34.50	41.60	0.68	-0.38	35.00	42.30	0.70	-0.36	34.70	38.00	0.61	-0.49
24	51.00	33.00	38.70	0.63	-0.47	38.30	39.60	0.64	-0.44	34.50	34.20	0.54	-0.62
27	60.00	24.30	35.20	0.56	-0.58	27.40	35.10	0.56	-0.59	23.70	30.10	0.46	-0.78
30	73.00	22.00	33.10	0.52	-0.66	24.00	33.30	0.52	-0.65	22.00	28.00	0.42	-0.87
39	76.00	16.90	32.10	0.50	-0.70	20.00	32.00	0.50	-0.70	17.20	25.10	0.36	-1.02
42	58.00	30.80	31.00	0.48	-0.74	24.40	30.60	0.47	-0.76	36.30	23.60	0.33	-1.10
45	49.00	38.20	28.70	0.43	-0.84	36.80	27.20	0.40	-0.91	34.50	21.40	0.29	-1.24
48	36.00	48.50	24.90	0.36	-1.03	44.00	23.90	0.34	-1.09	49.00	18.70	0.24	-1.44
51	55.00	25.50	23.10	0.32	-1.13	27.70	22.80	0.32	-1.15	24.40	16.90	0.20	-1.60
54	48.00	25.00	22.60	0.31	-1.16	26.20	22.00	0.30	-1.20	25.30	16.00	0.18	-1.69
63	79.00	20.30	22.00	0.30	-1.20	22.90	21.60	0.29	-1.23	19.80	14.90	0.16	-1.81
66	65.00	29.80	21.30	0.29	-1.25	29.10	20.20	0.27	-1.32	37.20	14.00	0.15	-1.93
69	41.00	36.40	20.20	0.27	-1.32	37.30	18.10	0.23	-1.49	36.10	13.60	0.14	-1.98
72	35.00	43.80	19.10	0.24	-1.41	44.50	16.70	0.20	-1.62	46.70	12.00	0.11	-2.24
75	61.00	24.70	18.00	0.22	-1.50	28.40	15.80	0.18	-1.71	23.70	10.80	0.08	-2.48
78	64.00	22.10	17.60	0.22	-1.53	25.20	15.30	0.17	-1.77	22.30	9.70	0.06	-2.78
87	78.00	19.60	17.60	0.22	-1.53	21.70	14.90	0.16	-1.81	19.50	8.20	0.03	-3.41
90	71.00	26.70	17.30	0.21	-1.56	24.40	14.40	0.15	-1.87	26.40	7.00	0.01	-4.63
93	50.00	42.80	14.90	0.16	-1.81	29.90	12.50	0.12	-2.15				
96	46.00	38.00	12.80	0.12	-2.10	31.40	10.30	0.07	-2.61				
99	49.00	25.50	11.50	0.10	-2.33	26.70	8.50	0.04	-3.25				
102	57.00	23.00	11.10	0.09	-2.42	25.10	7.90	0.03	-3.61				
111	78.00	18.60	10.80	0.08	-2.48	21.90	7.50	0.02	-3.94				
114	67.00	26.50	10.20	0.07	-2.63	25.20	7.00	0.01	-4.63				
117	58.00	45.00	9.60	0.06	-2.81								
120	56.00	32.80	8.20	0.03	-3.41								
123	53.00	27.20	7.00	0.01	-4.63								

Tabla 16. Razón de humedad (ensayo III)

t _s (hr)	H R (%)	SECADOR SOLAR PARABÓLICO (GUADUA - MADERA)				SECADOR SOLAR DE PASERA (MADERA)				SECADOR SOLAR PARABÓLICO (ALUMINIO)			
		T° _{AS} (°C)	H (%)	MR	LnMR	T° _{AS} (°C)	H (%)	MR	LnMR	T° _{AS} (°C)	H (%)	MR	LnMR
0	54.00	52.50	50.00	1.00	0	40.30	50.00	1.00	0	46.70	50.00	1.00	0
3	49.00	24.70	44.80	0.88	-0.13	26.90	45.10	0.89	-0.12	24.80	40.80	0.79	-0.23
6	50.00	22.30	42.70	0.83	-0.18	25.10	42.90	0.84	-0.18	23.20	37.50	0.72	-0.33
15	70.00	19.80	39.60	0.76	-0.27	22.00	40.60	0.79	-0.24	20.40	34.40	0.65	-0.44
18	48.00	35.30	37.20	0.71	-0.34	33.10	38.20	0.73	-0.31	36.30	31.20	0.57	-0.56
21	40.00	43.10	35.50	0.67	-0.40	58.20	33.60	0.63	-0.47	43.20	27.80	0.50	-0.70
24	32.00	43.30	33.40	0.62	-0.47	38.50	25.80	0.45	-0.80	43.70	22.80	0.38	-0.96
27	45.00	25.20	28.20	0.50	-0.68	29.10	20.70	0.33	-1.10	25.10	16.60	0.24	-1.42
30	49.00	21.50	26.30	0.46	-0.77	25.10	19.40	0.30	-1.19	22.50	15.10	0.21	-1.58
39	72.00	19.80	25.10	0.43	-0.83	21.90	18.80	0.29	-1.23	20.20	14.20	0.19	-1.68
42	60.00	31.60	23.00	0.39	-0.95	36.00	16.30	0.23	-1.45	30.30	13.10	0.16	-1.82
45	41.00	41.10	19.60	0.31	-1.17	35.60	13.10	0.16	-1.82	36.80	12.00	0.14	-1.99
48	35.00	40.60	15.10	0.21	-1.58	36.10	10.90	0.11	-2.19	37.80	10.00	0.09	-2.40
51	42.00	26.50	12.20	0.14	-1.96	29.90	9.40	0.08	-2.56	32.00	7.00	0.02	-3.78
54	55.00	20.40	11.70	0.13	-2.04	24.20	8.70	0.06	-2.79				
63	89.00	20.40	11.60	0.13	-2.06	22.70	8.00	0.05	-3.09				
66	78.00	24.80	10.00	0.09	-2.40	23.90	7.00	0.02	-3.78				
69	42.00	40.20	8.00	0.05	-3.09								
72	45.00	42.40	7.00	0.02	-3.78								

En el análisis de resultados del secado solar, se determinó la difusividad del cacao en los 3 secadores solares desarrollados durante 3 ensayos, para ello se obtuvieron primero las pendientes de cada intervalo de acuerdo con la ecuación $k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ calculadas de acuerdo a las curvas presentadas en las en las figuras 39, 40 y 41.

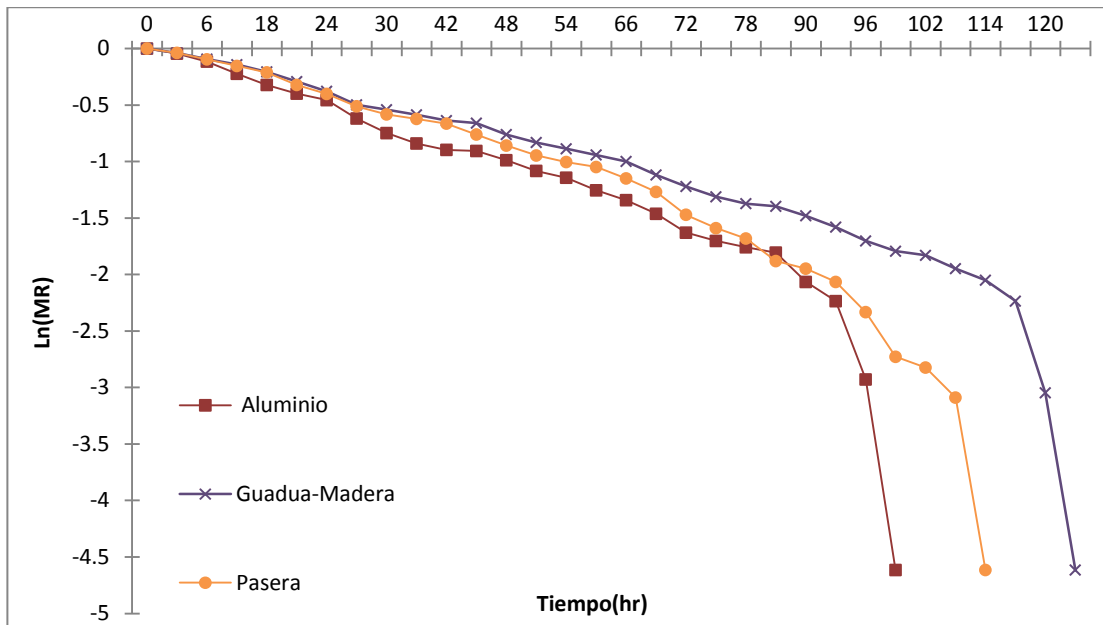


Figura 39. Representación lnMR Vs t_s (ensayo I)

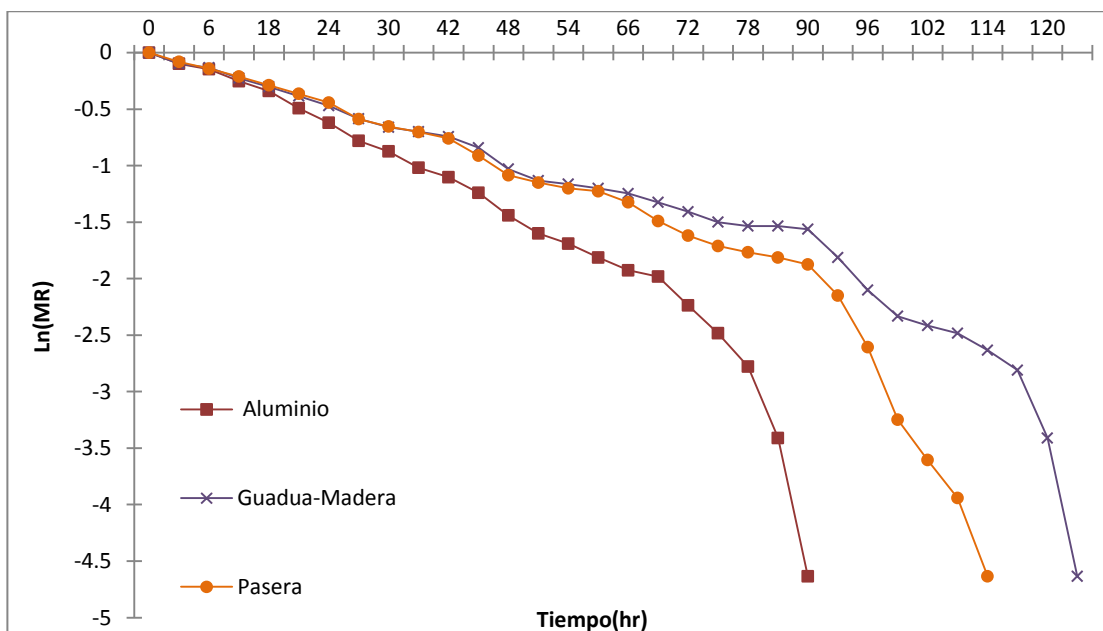


Figura 40. Representación lnMR Vs t_s (ensayo II)

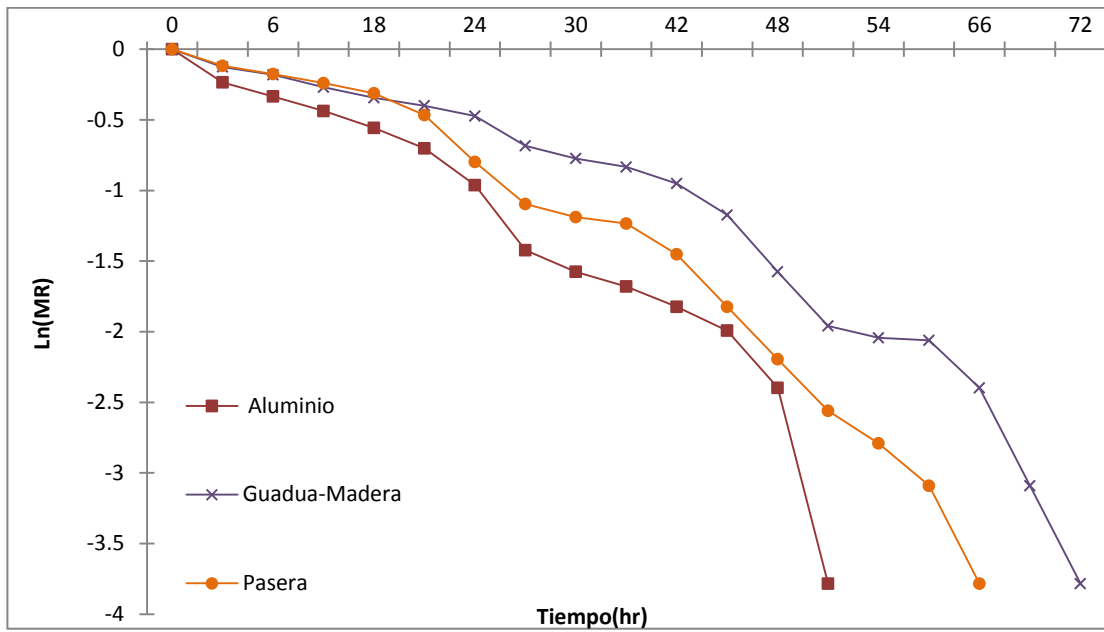


Figura 41. Representación $\ln MR$ Vs t_s (ensayo III)

Tabla 17. Intervalos de las pendientes (k)

Intervalo	Ensayo I			Ensayo II			Ensayo III		
	Guadua-Madera	Pasera	Aluminio	Guadua-Madera	Pasera	Aluminio	Guadua-Madera	Pasera	Aluminio
0-3	0.0135	0.0128	0.0148	0.0326	0.0270	0.0326	0.0419	0.0394	0.0782
3-6	0.0176	0.0191	0.0236	0.0116	0.0203	0.0161	0.0185	0.0193	0.0332
6-15	0.0054	0.0065	0.0120	0.0103	0.0077	0.0118	0.0098	0.0072	0.0115
15-18	0.0212	0.0190	0.0329	0.0253	0.0257	0.0287	0.0247	0.0240	0.0398
18-21	0.0288	0.0370	0.0255	0.0273	0.0251	0.0509	0.0187	0.0514	0.0483
21-24	0.0286	0.0265	0.0192	0.0287	0.0261	0.0429	0.0246	0.1107	0.0868
24-27	0.0399	0.0364	0.0542	0.0384	0.0487	0.0534	0.0702	0.0993	0.1535
27-30	0.0144	0.0239	0.0431	0.0253	0.0217	0.0311	0.0298	0.0309	0.0509
30-39	0.0050	0.0044	0.0102	0.0043	0.0055	0.0161	0.0068	0.0051	0.0116
39-42	0.0170	0.0138	0.0189	0.0146	0.0188	0.0280	0.0388	0.0724	0.0480
42-45	0.0076	0.0323	0.0033	0.0329	0.0507	0.0459	0.0744	0.1240	0.0561
45-48	0.0336	0.0326	0.0272	0.0626	0.0579	0.0666	0.1339	0.1236	0.1352
48-51	0.0234	0.0293	0.0316	0.0343	0.0218	0.0532	0.1279	0.1218	0.4621
51-54	0.0187	0.0193	0.0201	0.0102	0.0168	0.0302	0.0280	0.0768	
54-63	0.0060	0.0049	0.0124	0.0042	0.0029	0.0137	0.0020	0.0333	
63-66	0.0192	0.0337	0.0290	0.0154	0.0324	0.0378	0.1122	0.2310	
66-69	0.0399	0.0398	0.0402	0.0257	0.0555	0.0183	0.2310		
69-72	0.0340	0.0674	0.0557	0.0279	0.0429	0.0851	0.2310		
72-75	0.0304	0.0396	0.0244	0.0304	0.0308	0.0820			
75-78	0.0202	0.0305	0.0186	0.0118	0.0184	0.0985			
78-87	0.0026	0.0222	0.0052	0.00	0.0052	0.0703			
87-90	0.0278	0.0224	0.0867	0.0091	0.0205	0.4079			
90-93	0.0335	0.0393	0.0566	0.0838	0.0917				
93-96	0.0409	0.0890	0.2310	0.0959	0.1523				
96-99	0.0303	0.1318	0.5621	0.0770	0.2140				
99-102	0.0121	0.0318		0.0278	0.1189				
102-111	0.0131	0.0295		0.0075	0.0374				
111-114	0.0341	0.5087		0.0501	0.2310				
114-117	0.0618			0.0590					
117-120	0.2703			0.2003					
120-123	0.5229			0.4079					
\bar{x}_k	0.0475	0.0501	0.0583	0.0481	0.0510	0.0601	0.0680	0.0731	0.0935

Aplicando la ecuación 7, se calculó las constantes de difusividad para los secadores (tabla 19), donde el espesor de la capa es 2.5 cm (0.025m), el tiempo es 3600 seg, y k son los promedios obtenidos en la tabla 18.

Se analiza que el secador parabólico de aluminio se encuentran en los rangos de 8.6612×10^{-09} a $1.9806 \times 10^{-08} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, de 5.8187×10^{-09} a $1.7083 \times 10^{-08} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ para los secados realizados en el secador de pasera en madera y por ultimo 5.9876×10^{-09} a $1.5141 \times 10^{-08} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ del secador parabólico en guadua-madera. Estas difusividades se encuentran por encima del intervalo expresado por Ndukwu (2010) de $6,137 \times 10^{-10}$ a $2,1855 \times 10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ y de acuerdo con Marinos-Kouris et al. (2006), señala que la difusividad de los alimentos normalmente se ubica en un rango de 10^{-13} a $10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, y la mayoría de ellos (82%) están acumulados en la región de 10^{-11} a $10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

Tabla 18. Constantes de difusividad para los secadores solares

Difusividad $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$			
Ensayo	Guadua-Madera	Pasera	Aluminio
I	3.3422×10^{-09}	3.5251×10^{-09}	4.1021×10^{-09}
II	3.3844×10^{-09}	3.5885×10^{-09}	3.3422×10^{-09}
III	4.7846×10^{-09}	5.1434×10^{-09}	6.5788×10^{-09}

4.6. HIPOTESIS Y VARIABLES

4.6.1. Análisis de Varianza (ANOVA)

Para procesar los datos obtenidos en la etapa de secado se realizó un análisis de varianza ANOVA para diseño de un factor donde se comparan las 3 repeticiones teniendo en cuenta el número de horas obtenidas en dicha etapa.

Planteamiento de hipótesis:

$$h_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad \text{Vs} \quad h_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

Donde:

$$h_0 = \text{Hipótesis nula} \quad \text{Vs} \quad h_a = \text{Hipótesis alternativa}$$

$$h_0 = \text{No existe dif. Estadísticas} \quad \text{Vs} \quad h_a = \text{Existe dif. Estadísticas}$$

Si P-valor $> \alpha$, entonces se acepta h_0 y se rechaza h_a

Si P-valor $< \alpha$, entonces se acepta h_a y se rechaza h_0

El estudio se hace con un nivel de confianza NC=95% por tanto $\alpha = 0,05$

Variable respuesta: Tiempo (hr)

Factor: Tipos de Secadores

Donde la variable independiente o factor son los 3 tipos de secadores y la variable respuesta o dependiente es el tiempo de secado del cacao (tabla 18).

Tabla 19. Tiempo de secado en cada secador solar

Factor	Secador Aluminio (hr)	Secador Guadua-Madera (hr)	Secador Pasera (hr)
1	99	123	114
2	90	123	114
3	51	72	66

Tabla 20. Resumen de análisis

GRUPOS	CUENTA	SUMA	PROMEDIO	VARIANZA
Secador Aluminio	3	240	80	651
Secador Guadua-Madera	3	318	106	867
Secador Pasera	3	294	98	768

Tabla 21. Análisis de varianza

Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados libertad	Promedio de cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1,064	2	532	0.70	0.53	5.14
Dentro de los grupos	4,572	6	762			
Total	5,636	8				

El resultado del ANOVA (Análisis de varianza) indica el valor estadístico de la "F." En este caso el valor de la "F" o la variación entre los tres grupos de la muestra (Secador Aluminio, Secador Guadua-Madera y Secador Pasera) es 0.70. Para saber si estos resultados presentan diferencias significativas (es decir, si la probabilidad "P" tiene un valor menor a 0.05), el valor de la "F" necesita ser al menos 5.14 (o sea, el valor crítico de F). Entonces, como el valor de "F" es de 0.70 y no es mayor que el valor crítico se establece que en los tiempos de secado de los tratamientos no existe diferencia significativa.

5. CONCLUSIONES

Las curvas de secado obtenidas en los ensayos, muestran el mismo comportamiento para los tres tipos de secadores evaluados; el menor tiempo de secado se obtuvo con el secador solar parabólico en material no higroscópico, con un tiempo promedio de secado de 80 hr; en los secadores solares pasera y parabólico de guadua-madera los tiempos de secado fueron de 98 hr y 106 hr, respectivamente.

Al realizar las pruebas de humedad inicial del grano se presentó diferencias entre las mezclas de las variedades de cacao existentes en la zona bajo estudio (criollo, híbrido y clones) para los 3 ensayos realizados.

Los valores de contenido de humedad y pH terminada la etapa de fermentación fueron: Ensayo I, 57% y 5.0 pH; Ensayo II, 58% y 6.0 pH; y Ensayo III, 50% y 5.5 pH.

El resultado que arrojó la ANOVA, establece que no existe diferencia significativa en los tres ensayos realizados para la investigación. Sin embargo, en los tiempos de secado promedio se observó diferencias notorias debido a que el secador de aluminio logró su secado en 26 hr menos que en el secador guadua-madera y 18 hr con relación al secador de pasera.

BIBLIOGRAFIA

ALMADA, Martín. CACERES, María Stella. MACHAIN_SINGER, Marta. PULFER, Jean Claude. *Guía de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*. Fundación Celestina Pérez de Almada. Asunción, Paraguay. 2005.

BRAVO, Silvia. Encuentro con una estrella. (Artículo Internet), http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/38/html/sec_6.html (consulta Septiembre 8 de 2012).

BEKHTA, P., IGOR, Ozarki., SAMAN, Alavi., SALIM, Hiziroglu., (2006). A theoretical expression for drying time of thin lumber. *Bioresource Technology*, 97, 1572-1577.

CALVIN, Hamilton. (Artículo de Internet) <http://www.solarviews.com/span/sun.htm> Consulta: Marzo 30 de 2012.

CARVAJAL, Carlos Andrés. El Sol. *Astronomía Autodidacta*. (Artículo de Internet) <http://almaak.tripod.com/temas/sol.htm> Colombia. 2009. (Consulta: Marzo 30 de 2012).

CER-UNI, *Manual de construcción y manejo del secador solar modelo invernadero*. ITDG, UNIFEM, Ficha Técnica 13. Secado Solar. (Artículo de Internet) <http://www.solucionespracticas.org.pe/fichastecnicas/pdf/FichaTecnica13-Secado%20solar.pdf> Lima. 1998. (Consulta: Abril 14 de 2012).

CIFUENTES, C. Gerardo, MARÍN, A. Cesar, MUÑOZ, M. Deyanira., 2009. Comportamiento de la Temperatura del Flujo de Aire en un Absolvedor Solar. Vol. 7 No.2 p. 33. Cali - Colombia. Universidad del Valle. Consultado Abril 17 de 2012. Disponible en: <http://www.unicauca.edu.co/biotecnologia/ediciones/vol72/COMPORTAMIENTO%20DE%20LA%20TEMPERATURA%20DEL%20FLUJO.pdf>

CONTRERAS V., Luz María. Aspectos teóricos de la operación de secado y su aplicación en productos sólidos (En línea), 1995, <http://www.monografias.com/trabajos15/operacion-secado/operacion-secado.shtml> (Consulta Abril 14 de 2012).

DELGADO, María del Carmen. LEIVA, Guillermo. **PERDIGÓN, Zahymy y BERRIZ, Luis**. Familia de secadores solares SecSol. (Artículo de Internet).

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/energia30/HTML/articulo02.htm> Consulta: Abril 14 de 2012.

ERAZO, Wilson. CAPERA, Andrés. Determinación del comportamiento de secado de la *guadua angustifolia* en secador solar tipo túnel. Neiva. 2011.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CACAOTEROS DE COLOMBIA. Caracterización Físicoquímica y Beneficio de cacao "*Theobroma cacao L*" en Colombia. Pág 27. 2007.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Post-cosecha y Beneficio: El secado. 2005. (Artículo de Internet). <http://www.cafedecolombia.com/caficultura/secado.html> Consulta: Abril 14 de 2012. 30p.

FONDO PARA EL FINANCIAMIENTO DEL SECTOR AGROPECUARIO. El Cacao. (Artículo de Internet) http://www.finagro.com.co/html/i_portals/index.php?p_origin=internal&p_name=content&p_id=MI-194&p_options=#MUNDO Consulta: Octubre 18 de 2012.

GRAZIANI, Lucía. ORTIZ, Ligia. ALVAREZ, Naidely. TRUJILLO, America. FERMENTACIÓN DEL CACAO EN DOS DISEÑOS DE CAJAS DE MADERA. (Artículo de Internet) http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0002-192X2003000200005&script=sci_arttext Maracay. 2003. (Consulta: Octubre 26 de 2012)

GUACHAMIN, Christian. Diseño de un secador de granos de cacao fino. (Artículo de Internet) <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/790/1/CD-1238.pdf> . Ecuador. 2007. (Consulta: Abril 14 de 2012)

GUTIERREZ, Javier. Deshidratador de alimentos con colectores solares planos y aceite de coco, como fluido de trabajo. (Artículo de Internet) http://www.cudi.edu.mx/aplicaciones/dias_cudi/10_06_15/Javier_Gutierrez.pdf . Acapulco.2010. . (Consulta: Marzo 30 de 2012).

HERNÁNDEZ, José. FERNÁNDEZ, Antonio. QUINTO, Pedro. FLORES, Fernando. ACOSTA, Roberto. Estudio de la cinética de secado de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) (Artículo de Internet) <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=61420811004> Mexico, 2011. (Consulta: Octubre 26 de 2012).

IGNACIO, Filiberto. Diseño de in secador hibrido para madera acerada. (Articulo de Internet) <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/153/1/tesis%20final%20para%20cdfiloberto.pdf> México, 2008. (Consulta: Marzo 15 de 2012).

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Vancouver, Canada: Academic Press. 1983. 377p

LAIROS, Luis Ángel. TEIXEIRA, Juan Manuel. Diseño y construcción de un deshidratador Indirecto de cacao mediante el uso de aire Calentado por energía solar. (Articulo de Internet) <http://saber.ucv.ve/jspui/bitstream/123456789/622/1/TRABAJO%20ESPECIAL%20DE%20GRADO.pdf> . Venezuela. 2004. (Consulta: Septiembre 11 de 2012)

LIENDO, Rigel. Agronomía de la producción. (Articulo de Internet) http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/inia_divulga/numero%205/liendo_r.pdf . Venezuela. 2005. (Consulta: Abril 14 de 2012)

MARINOS-KOURIS, D. MAROULIS, Z. Transport properties in the drying of solids, in Handbook of drying technology, Chapter 4, 3a ed., 2006.

MONTERO, Irene. Modelado y construcción de un secador solar hibrido para residuos biomásicos. Tesis doctoral. Badajoz. 2005. Universidad de Extremadura. (Articulo de Internet): dialnet.unirioja.es/descarga/tesis/576.pdf (Consulta: Agosto 24 de 2012)

MORENO, M. Gamaliel, 2004. Manual de Instrumentación para una Secadora Solar. Tesis de maestría. México, D.F. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Consultado el abril 19 de 2012. Disponible en: <http://148.206.53.231/UAMI11307.pdf>

MURCIA, Bernardo. (Articulo de Internet)._ <http://villastefanyrivera.jimdo.com/> (Consulta: Abril 14 de 2012).

NDUKWU, M C. OGUNLOWO, A S. OLUKUNLE, O. J. Cocoa Bean (*Theobroma cacao* L.)Drying Kinetics Cinética del Secado de Cocoa (*Theobroma cacao* L.). (Articulo de Internet) http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-58392010000400014&script=sci_arttext Nigeria. 2010. (Consulta: Octubre 26 de 2012).

OLIVEROS, A. AMBERTE, W. CRUZ, M. y MENENDEZ, M. Fermentación del cacao en cajas de samanea saman jacq merril (algarrobo) y albizzia falcataria (albizia) en baracoa. Cuba, 2011. (Articulo de Internet) http://bva.fao.cu/pub_doc/FORESTALES/Revista%20Espec.%202011/FERM

ENTACI%C3%93N%20DEL%20CACAO%20EN%20CAJAS%20DE%20Sama
anea%20saman%20JACQ%20MERRIL%20 ALGARROBO .pdf (Consulta:
Octubre 26 de 2012).

PEGGY, Oti-Boateng y BARRIE Axtell, 1998. TÉCNICAS DE SECADO. 2da edición. Traducido por Martha Mora. 2da ed. Lima – Perú. Intermediate Technology Development Group, ITDG-Perú. ISBN 9972 47n022 1. Consultado el 18 de abril de 2011. Disponible en: <http://www.solucionespracticas.org.pe/index.php>

REQUENA, A. QUINTANILLA, R. BOLARÍN, J.M. VÁZQUEZ, A. BASTIDA, A. ZÚÑIGA, J. Nuevas Tecnologías y Contaminación de Atmósferas, para PYMEs, Pag.1 Universidad de Murcia. Spain. 2011 (Artículo de internet) <http://www.um.es/LEQ/Atmosferas/Ch-III-3/F33s11p1.htm> España. (Consulta: Agosto 24 de 2012).

RIVERA, R. Antonio. Secador Solar por Convección Natural (Construcción, Desarrollo y Análisis). Tesis de maestría. México, D.F. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Consultado el 19 de abril de 2011. Disponible en: <http://tesiuami.izt.uam.mx/uam/aspuam/presentatesis.php?recno=11841&docs=UAMI11841.PDF>

RODRIGUEZ, Nilda. *Beneficio del Cacao (Theobroma cacao L)*. Facultad de Agronomía de U.C.V. Departamento e Instituto de Agronomía. (Artículo de Internet) <http://www.docstoc.com/docs/3170963/BENEFICIO-DEL-CACAO-Theobroma-cacao-L-Cosecho-solo-mazorcas-maduras> Venezuela. 2006, (Consulta: Marzo 30 de 2012).

SCHILLING, Raphael. REGALADO, Luis. (Artículo de Internet). [http://www.catie.ac.cr/BancoMedios/Documentos%20PDF/pcc cosecha apro cacaho.pdf](http://www.catie.ac.cr/BancoMedios/Documentos%20PDF/pcc_cosecha_apro_cacaho.pdf) (Consulta: Junio 17 de 2012).

SOLANO, Jair Fernando. Diseño, construcción y evaluación de un secador desarmable con destino a pequeños y medianos caficultores. Trabajo de grado Ingeniero Agrícola. Neiva: Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería, 2002. 81p.

SOLIS, Ana Paola. Tecnologías para procesar alimentos con energía solar (cocinas, hornos, destiladores, pasteurizadores y secadores solares). Fundación Terra. Barcelona. 2005.

SUPERCONTROLS S.A. ¿Por qué humidificar? Argentina. 2007. (Artículo de Internet). http://www.supercontrols.com.ar/productos/porque_humidificar.html (Consulta: Marzo 30 de 2012).

TORRES, Oneida. GRAZIANI, Lucía. ORTIZ, Ligia. TRUJILLO, América. Efecto del tiempo transcurrido entre la cosecha y el desgrane de la mazorca del cacao tipo forastero de Cuyagua sobre características del grano en fermentación. Cuyagua (Artículo de Internet). https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:TxCG4zKOV8cJ:sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/Agronomia%2520Tropical/at5404/pdf/torres_o.pdf+&hl=es&gl=co&pid=bl&srcid=ADGEEESipx1ytXWLgHCm5KenR3uuWV_43He6dKw1qILhYdyhZ4ksWlnG-c5kWNM7Pa_-F_GzmTsKKQkAwyfHgSLakokWbz_tSc7Ko5lerMPgUE_D_d--dVxf3eqpl_qs_N6Z0NBqVO9mr&sig=AHIEtbTNkBGgly7qyxeFQTeVDbtdhKDX-g (Consulta; Octubre 26 de 2012)

VARGAS, Manuel. Secador Tecnatrop (Artículo de Internet). <http://www.terra.org/cocinas/ficha.php?id=53>. (Consulta: Agosto 24 de 2012).

VILLAMIZAR, Fanny. HERNANDEZ, Determinación de parámetros del proceso de secado del cacao (*Theobroma cacao* L). (Artículo de internet) <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingecoinv/article/viewFile/24483/25074> Colombia. (Consulta: Agosto 24 de 2012).

ZAMBRANO, Hugo Ibsen. Introducción al estudio de las ciencias de la Tierra (Geociencias). Editorial Universidad Surcolombiana. Colombia 2003.

ANEXO