

**EVALUACION PRELIMINAR DE UN SECADOR SOLAR MODULAR
TIPO CAPILLA DE TRES NIVELES PARA CAFÉ (Coffea arabica L.)
EN LA INSPECCION DEL PLACER DE LA VEREDA SAN JOAQUÍN
MUNICIPIO DE SANTA MARIA HUILA**

CAROLINA PALOMINO MENZA

**NEIVA
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA AGRICOLA
2009**

**EVALUACION PRELIMINAR DE UN SECADOR SOLAR MODULAR
TIPO CAPILLA DE TRES NIVELES PARA CAFÉ (Coffea arabica L.)
EN LA INSPECCION DEL PLACER DE LA VEREDA SAN JOAQUÍN
MUNICIPIO DE SANTA MARIA HUILA**

CAROLINA PALOMINO MENZA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el
título de INGENIERA AGRICOLA**

**Director: José Duban Henao Cuéllar
Ph. D. Ingeniero Agrícola**

**NEIVA
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA AGRICOLA
2009**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Neiva, mayo de 2009

DEDICATORIA

A mis padres Raquel Menza y Argemiro Palomino quienes se sacrificaron y dieron todo de si mismos para poder lograr mi sueño y a pesar de todos los tropiezos y obstáculos presentados fueron mi apoyo incondicional y nunca me dejaron desfallecer.

A mi esposo Rubén Darío Montenegro que siempre me brindó su colaboración y sus buenos consejos, quien soportó mis arrebatos de niña consentida y aún así me apoyó sin reparar en nada, me enseñó a crecer espiritual y profesionalmente.

A mi hijo Julián quien me enseñó a ser mamá y a ser una mujer luchadora y persistente por alcanzar sus sueños para poder brindarle lo mejor.

A mis hermanos Iván Javier y Milton Giovanni quienes me colaboraron y me han brindado su apoyo durante toda su vida.

A todos ellos les doy mis más sinceros agradecimientos porque fue por ellos y para ellos que logré mi sueño, ser profesional.

Y finalmente a todos mis profesores y compañeros que de alguna manera estuvieron allí brindando su colaboración.

Carolina Palomino Menza

AGRADECIMIENTOS

A la empresa COFFEE COMPANY, quien me dió la oportunidad de realizar el trabajo de grado en la modalidad de pasantía en el municipio de Santa Maria - Huila con el proyecto denominado “CAFÉ SOSTENIBLE”.

José Duban Henao Cuellar, Ph. D, Ingeniero Agrícola, quien actuó como director del trabajo de grado.

A los profesores Néstor Cerquera y Orlando Guzmán, Ingenieros Agrícolas, docentes Universidad Surcolombiana, área Agroindustria.

John Avelino Mora Rodríguez, Ingeniero Agrícola, quien me apoyó y brindó su colaboración durante la realización del trabajo de grado.

José Miller Sánchez y Oscar Ricardo Cano, Ingenieros Agrícolas, instructores del SENA, área de construcciones rurales.

Bertulfo Delgado Joven, Ingeniero Agrícola, especialista en catación, certificado por la Asociación Americana de Cafés Especiales (SCAA) como Maestro de Catación y por el Instituto de la Calidad del Café (CQI) como Juez Internacional de Catación.

Al caficultor Miller Salazar Polania, quien presto un apoyo absoluto y desinteresado durante la realización de la parte experimental del trabajo de grado, y a la Institución Educativa San Joaquín del municipio de Santa Maria que facilitó los equipos de laboratorio durante la realización del trabajo.

CONTENIDO

I. INTRODUCCION.....	14
JUSTIFICACION.....	16
OBJETIVOS.....	17
Objetivo general.....	17
Objetivos específicos	17
II. MARCO TEORICO	18
2.1 REVISION LITERARIA	18
2.1.1 HISTORIA DEL SECADO	19
2.1.2 IMPORTANCIA DEL SECADO	23
2.1.3 FACTORES QUE INCIDEN EN EL PROCESO DEL SECADO	24
2.1.3.1 Temperatura del aire	25
2.1.3.2 Humedad relativa	25
2.1.3.3 Humedad del grano	25
2.1.3.4 Humedad externa del grano	29
2.1.3.5 Humedad interna del grano	29
2.1.3.6 Humedad inicial del grano	29
2.1.3.7 Humedad final del grano	29
2.1.3.8 Humedad de equilibrio	30
2.1.4 ETAPAS DEL SECADO.....	30
2.1.5 TRANSFERENCIA DE CALOR	31
2.1.5.1 Conducción	32
2.1.5.2 Convección.....	33
2.1.5.3 Radiación	33
2.1.6 LEYES DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.....	33
2.1.6.1 Conducción	33

2.1.6.2 Convección.....	34
2.1.6.3 Radiación	35
2.1.7 RADIACION SOLAR	35
2.1.8 ENERGIA SOLAR.....	37
2.1.8.1 Radiación global.....	37
2.1.8.2 Radiación directa.....	38
2.1.8.3 Radiación difusa.....	39
2.1.8.4 Variación en la radiación solar	39
2.1.8.5 Intensidad sobre una superficie.....	41
2.1.9 COLECTORES DE RADIACION SOLAR	44
2.1.9.1 Colectores solares planos	45
2.1.9.2 Colectores solares focales	48
2.1.9.3 Principio de funcionamiento de los secadores solares.....	49
III. METODOLOGIA	52
3.1 UBICACIÓN DEL SECADOR SOLAR MODULAR	52
3.2 EQUIPOS UTILIZADOS.....	53
3.2.1 Localización.....	53
3.2.2 Materia prima	53
3.2.3 Equipos	53
3.3 DESCRIPCION DEL SISTEMA MODULAR.....	54
3.4 EVALUACION DEL SECADOR.....	62
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	69
V. CONCLUSIONES.....	96
VI. RECOMENDACIONES	99
PLANOS	101
BIBLIOGRAFIA	109

LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA 1 Determinación del valor medio del contenido inicial de humedad (b.h) del café	69
TABLA 2.Contenido de humedad final para las muestras del nivel superior.....	71
TABLA 3.Variación de humedad de las muestras del nivel uno o superior.....	72
TABLA 4. Temperaturas registradas para el nivel uno o superior.....	73
TABLA 5.Contenido de humedad final para las muestras del nivel intermedio.....	75
TABLA 6.Variación de humedad de las muestras del nivel intermedio.....	76
TABLA 7. Temperaturas registradas para el nivel dos o intermedio del sistema...	77
TABLA 8.Contenido de humedad final para las muestras del nivel inferior.....	80
TABLA 9.Variación de humedad de las muestras del nivel inferior.....	80
TABLA 10. Temperaturas registradas para el nivel tres o inferior del sistema.....	82
TABLA 11. Temperaturas máximas y mínimas registradas para las tres posiciones de los termómetros.....	83

TABLA 12. Tiempo de secado para cada uno de los niveles del sistema modular.....86

TABLA 13. Resultado análisis sensorial de café86

LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 1. Etapas del secamiento de granos.....	30
FIGURA 2. Ángulo de incidencia de la radiación solar.....	40
FIGURA 3. Intensidad sobre una superficie inclinada.....	43
FIGURA 4. Posición relativa del Cenit.....	43
FIGRUA 5. Angulo cenit y azimut del sol.....	49
FIGURA 6. Vista frontal del sistema modular.....	52
FIGURA 7. Vista frontal finca el Paraíso.....	52
FIGURA 8. Vista lateral derecha del sistema, construcción del secador.....	54
FIGURA 9. Construcción de la estructura.....	55
FIGURA 10. Orientación del secador.....	56
FIGURA 11. Uniones de la estructura en guadua.....	56
FIGURA 12. Cubrimiento de la guadua en las uniones.....	57

FIGURA 13. Montaje de los bloques el secador.....	57
FIGURA 14. Montaje de las paseras en los bloques.....	58
FIGURA 15. Fijación de la pasera.....	58
FIGURA 16. Movimiento vertical de las paseras.....	59
FIGURA 17. Rotación del café durante el secado.....	59
FIGURA 18. Posición de los niveles.....	60
FIGURA 19. Vista lateral derecha del sistema y posición de las cortinas 1 y 2.. ..	61
FIGURA 20. Vista lateral izquierda del sistema y posición de la cortina 3.....	61
FIGURA 21. Vista lateral derecha del sistema y posición sur-oriente donde no hay cortina.....	62
FIGURA 22. Pesaje del café para cada una de las paseras.....	62
FIGURA 23. Distribución del café en las paseras.....	63
FIGURA 24. Termómetros para medir condiciones ambientales externas.....	63
FIGURA 25. Vista lateral izquierda del secadero y posición de los termómetros..	64
FIGURA 26. Balanza gravimétrica.....	64

FIGURA 27. Vista frontal pasera modelo de simulación.....	65
FIGURA 28. Incorporaron del café en la bolsa con sello hermético.....	65
FIGURA 29. Bolsa con sello hermético.....	66
FIGURA 30. Equipo medidor de humedad.....	66
FIGURA 31. Vista en planta secadero modular.....	101
FIGURA 32. Cimentación.....	102
FIGURA 33. Vista paseras.....	103
FIGURA 34. Vista en planta cubierta del secador.....	104
FIGURA 35. Vista pasera.....	105
FIGURA 36. Vista frontal sistema modular.....	106
FIGURA 37. Vista lateral sistema modular.....	107
FIGURA 38. Vista lateral y frontal soporte paseras.....	108

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
GRAFICA 1.Variación de la humedad b.h del café a través del tiempo de secado de las paseras del nivel uno o superior de cada uno de los bloques del sistema.....	70
GRAFICA 2.Variación de la humedad b.h del café a través del tiempo de secado de las paseras del nivel dos o intermedio de cada uno de los bloques del sistema.....	74
GRAFICA 3.Variación de la humedad b.h del café a través del tiempo de secado de las paseras del nivel tres o inferior de cada uno de los bloques del sistema.....	79
GRAFICA 4.Velocidad de secado del café para cada uno de los tres niveles del sistema modular.....	87
GRAFICA 5.Contenido de humedad b.h del primer bloque del sistema.....	90
GRAFICA 6.Contenido de humedad b.h del segundo bloque del sistema.....	91
GRAFICA 7.Contenido de humedad b.h del tercer bloque del sistema.....	92
GRAFICA 8.Contenido de humedad b.h del cuarto bloque del sistema.....	93
GRAFICA 9.Contenido de humedad b.h del quinto bloque del sistema.....	94

I. INTRODUCCION

Exponer el café al sol es una acción muy realizada por los caficultores, pero este ejercicio depende directamente de los factores climáticos y en la temporada de lluvias este no se seca por varios días, además está expuesto a una infinidad de daños y diversos factores contaminantes.

A pesar de que Colombia recibe bastante radiación solar, en los departamentos productores de café se tiene dificultad para secar el grano al sol, la frecuencia e intensidad de las lluvias se incrementan, presentándose condiciones ambientales demasiado húmedas, aunque existan silos y otros mecanismos de secar productos agrícolas, para los agricultores que hacen esta labor exponiendo el producto al sol, depende de los factores climáticos lograr un secado conveniente y existen épocas críticas que detienen el proceso.

Es de gran importancia, considerar alternativas que ayuden a acelerar el secado del café, con el menor costo posible y que conserven la calidad del producto, sin recurrir al uso de la energía convencional y los combustibles, pues cada día es más evidente que una gran parte de los problemas medio ambientales que inquietan (calentamiento global, residuos sólidos y líquidos, debilitamiento de la capa de ozono) son por el uso indiscriminado de los recursos naturales.

En este sentido, en la actualidad el SENA a través del Centro de Formación Agroindustrial “La Angostura” Regional - Huila ha desarrollado un dispositivo solar para el secado de café, denominado “Secador Solar Modular de Tres Niveles” creado con el objetivo de solucionar el problema anteriormente mencionado.

El trabajo se fundamentó en la evaluación de este nuevo diseño sobre el cual no se conocía su funcionamiento, y así determinar la capacidad, tiempo de secado empleando el sistema modular para continuar con la incorporación de técnicas que mejoren el proceso del secado natural y entregar a los caficultores colombianos parámetros prácticos para la utilización del sistema de manera eficaz.

JUSTIFICACION

Con la idea de mejorar los ingresos de la zona rural colombiana, más específicamente de los pequeños caficultores, generar tecnología y conocimiento, aportando gran beneficio, se crean y evalúan diseños nuevos que de alguna manera contribuyan con el mejoramiento en la fase del beneficio del café, dado que el mundo globalizado y cambiante hace necesaria la adopción de sistemas de mejoramiento continuo para competir y subsistir en el mercado.

Sabiendo que Colombia es un gran productor de café a nivel nacional y mundial, ha llevado a la población a tratar de mejorar y conservar la calidad de su producto. En vista de una gran dificultad para realizar el secado al sol del grano de café, debido a las condiciones ambientales de cada zona, se planteó la necesidad de mejorar el sistema tradicional de secado solar. Esta fase del beneficio del café se ha caracterizado por ser un proceso de largos días y de bastante actividad manual, así mismo, las estructuras actuales que realizan los pequeños productores de café, son estructuras que requieren áreas amplias y planas para su instalación.

La importancia que presenta el trabajo de investigación es reducir el espacio empleado en la instalación de estas estructuras y minimizar el tiempo de secado, haciendo un buen uso del sistema y lograr secar la mayor cantidad de café posible durante la época de producción. Se espera continuar con el empleo de estos sistemas que son de fácil elaboración, económicos, duraderos y al alcance de cualquier productor.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar un sistema secador solar modular de tres niveles para determinar la capacidad y tiempo de secado del sistema.

Objetivos Específicos

- ▶ Estudiar la deshidratación solar de café pergamino (*Coffea arabica L.*), en cada uno de los niveles del sistema modular hasta llegar al rango de humedad establecida por el comercio (10% – 12%).
- ▶ Realizar mediciones de secado, para determinar la variación de humedad del grano de café pergamino (*Coffea arabica L.*) con los cambios de humedad relativa del día y la noche.
- ▶ Determinar la curva de secado para la deshidratación solar de café (*Coffea arabica L.*) con el sistema modular de tres niveles.
- ▶ Determinar la capacidad de secado del sistema modular para un tiempo específico.
- ▶ Realizar gráficas de variación de humedad b.h y velocidad de secado en función del tiempo, para los tres niveles del sistema.

II. MARCO TEORICO

2.1. REVISION LITERARIA

El café es uno de los productos agrícolas que más genera divisas al país. Según Mora (2008)¹ si no hay café, disminuye la economía de cada uno de los municipios del país, con el café hay flujo en la economía interna de la nación.

De acuerdo con López (2006)² la producción colombiana asciende a más de 700.000 toneladas de café pergamino seco al año; por lo tanto, cualquier investigación que se realice para mejorar la producción o su procesamiento es de gran importancia para el sector y la economía nacional.

El grano de café una vez alcanza su madurez se debe cosechar y beneficiar inmediatamente. Una de las operaciones más importantes es el secado, que consiste en eliminar parte del agua del grano, desde 50% b.h de contenido de humedad inicial, hasta un 10 a 12% b.h de contenido de humedad final.

En la mayoría de las fincas cafeteras se seca el café en forma natural, aprovechando la energía del sol, dependiendo del área cultivada y de la capacidad económica del productor.

El uso de deshidratadores solares para el secado del café pergamino responde a una tendencia en el desarrollo de tecnologías, que permiten proteger al grano de las condiciones climatológicas adversas, obtener un grano seco de calidad y lograr el secado en días con radiación solar difusa.

¹ MORA, John A. Ingeniero Agrícola, Coordinador Proyecto Café Sostenible Santa Maria. Neiva, 10 de septiembre de 2008.

² LOPEZ, Elkin. M Sc. En automatización Industrial. Ingeniero químico de la Universidad Nacional de Colombia, Bogota.

Según, Abdala *et al* (2003)³ la experiencia y estimados preliminares indican que el secado tiene una importancia decisiva en la obtención de un grano comercializable de alta calidad. Al secar el grano adecuadamente, se hace fácilmente conservable, al mismo tiempo que se garantiza su buen gusto y aroma.

En este sentido, Abdala *et al* (2003) afirma que el secado, enfrenta en la práctica productiva de las empresas cafeteras otra serie de diferentes problemas que gravitan sobre la calidad del grano y el costo de producción. Entre estas dificultades son frecuentes:

- Las afectaciones al grano que pueden surgir en el secado en plazoletas por lluvias o excesivo rocío nocturno. Para evitar estos problemas se requiere un trabajo manual adicional de recogida y protección del grano, que implica un aumento del uso de mano de obra.

2.1.1 HISTORIA DEL SECADO

Campo y Mipaz (1994)⁴ presentan los siguientes puntos acerca de la historia del secado.

- El secado como un arte primitivo: El secamiento de productos agrícolas, dá sus primeros pasos desde el mismo comienzo de la civilización.

En el campo, el uso de la energía solar y el aprovechamiento del movimiento del aire, constituye el mejor método de remoción de humedad.

³ ABDALA Rodríguez, Jorge Luís.. *et al*. Secado de café pergamino en secadores multipropósito y de tambor rotatorio, Cuba. Centro de investigaciones de energía solar. 2003.

⁴ CAMPO GOMEZ, José Luís y MIPAZ ORTEGA, Pedro. Evaluación y factibilidad de industrialización de un secador de granos por aire caliente forzado y radiación solar directa. Neiva 1994. 2 p. Tesis. Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería.

- Secadores experimentales: Entre la primera y la segunda guerra mundial, se construyeron varias unidades de secado algunas se expusieron comercialmente.

Las secadoras comerciales se utilizaron para secar frutas, vegetales, heno y maíz, en este tipo de secadoras se utilizaba aire caliente.

- Secadores comerciales: Después de la segunda guerra mundial y a través del uso de las secadoras a gran escala en las haciendas, día tras día el manejo de productos para ser secados se hizo importante. Poco a poco se fueron mejorando los mecanismos de secado, es así como se desarrollaron los silos y contenedores de secamiento que minimizaban el manejo y facilitaban el movimiento de los granos.
- Calidad de los granos: La tendencia desde inicios ha sido la de secar un producto a altas temperaturas para obtener un secado más rápido, pero el producto posterior al secado, dependía del uso que se le fuera a dar, ya que cada uno presenta unos estándares de calidad específicos.

Sánchez (2008)⁵, dice que el secado al sol lo realizan básicamente productores pequeños con un área promedio de 3 hectáreas, por lo tanto no se justifica el costo -vs- el beneficio de compra de un secador mecánico. Comenta que inicialmente el secado se realizó sobre el suelo pisado, en piedras acomodadas firmemente sobre el suelo, en cobijas de lana, en cueros de animales, en catres o cujas, costales de fique, en tejidos vegetales como palma, tablas y paseras de tabla, guadua, tejas de barro, entre otros.

⁵SANCHEZ, José M. Ingeniero Agrícola, Instructor SENA Centro de formación Agroindustrial. Neiva, 18 de septiembre de 2008.

Poco a poco se fueron utilizando diferentes materiales para el secado de café. Se emplearon materiales como tejas de zinc, carpas de camión o lonas plásticas resistentes, bolsas (estopas) donde venían los fertilizantes sintéticos.

Luego llegó la era del cemento, se emplearon los patios en frente de las casas o andenes y los empedrados de las carreteras del pueblo. Posteriormente se inventaron las paseras de madera carros corredizos con techos de zinc, que por cierto, eran muy costosos y exigentes en cuanto a la pendiente, necesitaban terreno plano.

Aparecieron las casas elba, que no contribuyeron mucho de igual forma se presentaban problemas de aplastamiento en el secado, los cafeteros pisaban el café y lo contaminaban, el grano quedaba expuesto a los agentes contaminantes, como perros, aves y otros.

Una vez llegaron los técnicos de la Federación Nacional de Cafeteros a realizar sus aportes de investigación, entonces aparecieron los zarzos fijos, después los mejoraron acondicionándolos como corredizos, luego los zarzos semifijos como especie de libro.

Tiempo después llegaron los plásticos, se empezaron a usar en toldos, extendidos en el suelo, algunos se inventaron las llamadas marquesinas, se empezaron a cubrir los patios de cemento con techos plásticos en diferentes formas, pero sin salida de aire, luego apareció el mismo diseño pero con pequeños orificios en la parte inferior con tubos de PVC, para que circulara el aire.

En medio de todas las investigaciones se concluyó que el problema era el piso de cemento pegado al suelo, lo que hacía que en la noche el café se re-humedeciera, entonces, se comenzaron a hacer placas de cemento elevadas 60 cm. del suelo,

con cubiertas de plástico en forma de túnel y unas pequeñas entradas para el movimiento del café.

Después se cambió la placa de concreto por tiras de guadua (guadúa cortada longitudinalmente) mejorando la calidad del café. Esta guadua se optimizó con una polisombra reciclada llamada zaran la cual contaminaba el café. El secado mejoró notablemente ya que se hizo más eficiente, pero continuaban los problemas de altas temperaturas, se pisaba el café presentando aplastamiento del grano, y hasta se contaminaba el café con heces fecales de animales.

Toda esta tecnología de secado a nivel del piso fue trasladada a las viviendas en donde se empezó a destechar las residencias de los cafeteros, las cuales poseen una estructura en madera aserrada, madera rolliza y algunos en guadua inmunizada por el humo para desbaratar y colocar un entepiso en guadua o madera aserrada cubierta por cascarilla de arroz, una polisombra o zaran y una estructura para el plástico en guadua mal construidas, dañando la estética de la zona cafetera, diseños inestables y con alto riesgo para el viento, lluvia y radiación solar.

Las cubiertas de plástico desde el momento mismo de la instalación eran susceptibles a rasgaduras, a causa de la guadua cortada y el mal manejo, quedando perforaciones en la cubierta, los zarzos en su época no fueron los más apropiados para secar el café, ya que existía contaminación con el humo de la cocina, había dificultad del cafetero para trasladar el café hasta el techo, se presentaba una elevación en la temperatura interior de la vivienda y aparecían malos olores, convirtiendo inhabitables las viviendas.

Otros más intrépidos decidieron diseñar voladizos de 5 a 8 metros lineales y a una altura de 3 a 5 metros, una obra demasiado costosa. Como consecuencia de esto

se buscaron alternativas a muy bajo costo y con pocos materiales. Fue cuando aparecieron las mallas metálicas para el secado del café en forma de paseras, con esto se corrigió notablemente la eficiencia y rapidez en el secado y calidad del café. Sin embargo, la malla le modificaba el sabor al grano, presentado al realizar la prueba de taza, por lo tanto surgieron las mallas en plástico que son de materiales no reciclados y no contaminan el café.

2.1.2 IMPORTANCIA DEL SECADO

La gran mayoría de los productos agrícolas presentan inicialmente un alto contenido de humedad, lo cual hace indispensable la remoción de la humedad para así garantizar su almacenamiento. Si ésta no se remueve los granos pueden ser afectados por hongos y bacterias que dañan la calidad del producto.

Es importante secar los granos ya que al ser sometidos a este proceso y llevarlos hasta un contenido de humedad seguro, pueden ser almacenados durante largos periodos de tiempo, sin deteriorar la calidad.

Rodríguez (1979)⁶, citado por Pinzón y Parra (1987)⁷, considera que “en general humedades inferiores al 13% en granos impiden el crecimiento de hongos en cualquier circunstancia climática normal”.

Pinzón y Parra (1987) comentan que el secamiento de granos es una forma práctica y económica de controlar la humedad en los granos para facilitar su conservación.

⁶ RODRIGUEZ, Néstor. Secamiento, Revista Arroz. Bogotá 1979.

⁷ PINZON, Félix Eberto y PARRA ROJAS, Elías. Evaluación de un modelo de horno solar para secado de grano de café. Neiva 1987. 7 p. Tesis. Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería.

Si el grano húmedo se almacena sin que el aire pase a través de éste, el grano se calentará, respirará más rápido, producirá más calor y humedad, por lo tanto, se deteriorará más rápido. Si el grano está húmedo el calor aumenta más rápido, los hongos se desarrollan velozmente y puede germinar.⁸

2.1.3 FACTORES QUE INCIDEN EN EL PROCESO DEL SECADO

El proceso de secado es más rápido, si el aire no contiene mucha humedad y si hay viento. El aire caliente pasará por el grano, secándolo con más rapidez que el aire frío. Esto se explica, principalmente por tres razones:

1. El aire caliente puede retener más agua que el aire frío, por eso, entre más caliente esté el aire al pasar por el grano, mayor será la cantidad de agua que tome del grano.
2. El agua se evapora más rápido, cuando está caliente, así al pasar el aire caliente por el grano, el agua que hay en la superficie de éste se evapora con mayor rapidez.
3. El aire caliente hace que la temperatura del grano aumente y que el agua que hay en su interior salga rápidamente. El aire toma el agua que sale a la superficie del grano en forma de vapor.

Para lograr llevar un producto a la humedad requerida y realizar el proceso del secado de granos se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

⁸ Programa regional poscosecha. Managua Nicaragua. [En línea] Secamiento de granos: Su importancia y las prácticas comunes. <www.postcosecha.net/fr/Home/document.php?itemID=1188&langID=3>(Consulta: 7 febrero 2009).

2.1.3.1 Temperatura del aire

Este es un factor importante durante el proceso de secado de granos, al incrementar la temperatura del aire de secado, disminuye la humedad relativa de este, facilitando la evaporación de la humedad de los granos, favoreciendo el proceso del secado.

Cuando se calienta el aire de secado se obtiene la disminución de la humedad relativa de dicho aire para que este pueda evaporar rápidamente la humedad externa del grano. Además el calor aumenta la presión de vapor del grano y en esta forma la humedad interna que posee cada grano, se moverá hacia la superficie y podrá evaporarse fácilmente.⁹

Un periodo de tiempo prolongado de secado o exposición del grano a alta temperatura, deteriora física y químicamente el producto.

2.1.3.1 Humedad relativa

La humedad relativa es el porcentaje de la cantidad de humedad en relación a la cantidad máxima de humedad que puede retener el aire a esa temperatura. Si el contenido de la humedad del aire permanece igual y su temperatura aumenta, la humedad relativa decrece.

2.1.3.1 Humedad del grano

⁹ PASTRANA, Eduardo. Diseño de un colector para secado de productos agrícolas. Neiva 1983. 30 p. Tesis. Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería.

La humedad en los granos es la cantidad de agua que contiene en su interior. El grano tiene cierta humedad en su interior, aunque no parezca estar húmedo a simple vista.

CASTILLO NIÑO, Álvaro (1980)¹⁰ señala que en los granos el agua esta presente en cuatro formas principales:

Agua superficial depositada por lluvias recientes, o por condensación de la humedad del aire producida por cambio de temperatura. Se mantiene adherida al grano sólo por fuerzas capilares, y de tensión superficial.

Agua absorbida, ocupa espacios intergranulares y poros; proviene de agua superficial que ha penetrado en el grano o de agua formativa, que aún queda en su proceso de maduración. Se mantiene dentro de los granos principalmente por la acción de fuerzas capilares.

Agua adsorbida, unida mas íntimamente y en forma coloidal a la sustancia del grano, fuerzas de atracción molecular de magnitud importante la retiene en su sitio.

Agua de constitución, unida a la materia seca en forma química, forma parte en consecuencia de la propia sustancia del grano y no es posible removerla sin desnaturalizar el grano.

No existen límites exactos entre cada una de las humedades anteriores. Si se considera un grano muy seco, que se va humedeciendo lentamente, las fuerzas

¹⁰ CASTILLO NIÑO, Álvaro. Acondicionamiento de granos: secamiento, almacenamiento y costos. Bogotá (Colombia) 1980. p. 159. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Programa Nacional de Capacitación Agropecuaria.

de absorción que retienen el agua se van disminuyendo en cada capa adicional, hasta llegar a igualarse con las fuerzas capilares de absorción. El comportamiento del agua se modifica en consecuencia, según las fuerzas de atracción que la mantengan adherida al grano. La presión de vapor del agua interna, y la influencia que sobre la misma ejerce el aire circundante, se disminuye con el aumento de las fuerzas de atracción; esto explica la menor humedad relativa de equilibrio de los granos más secos.

La consideración del párrafo anterior, explican la razón por la cual es difícil determinar el contenido de humedad real del grano; la división no muy clara entre el agua absorbida y la de constitución, hace necesaria la utilización de métodos empíricos, que establezcan un límite artificial entre ellas.

El cálculo del contenido de humedad, por pérdida de peso, es sencillo de efectuar, si se tiene en cuenta que la cantidad de materia seca, permanece constante durante el proceso.

Para el grano húmedo:

$$Materia\ sec\ a = W_i \frac{(100 - H_i)}{100} \quad (1)$$

Para el grano seco:

$$Materia\ sec\ a = W_f \frac{(100 - H_f)}{100} \quad (2)$$

Donde:

Wi: Peso inicial del grano

Wf: Peso final del grano

Hi: Contenido inicial de humedad del grano

Hf: Contenido de humedad final del grano

Finalmente:

$$Materia\ sec\ a = Wi \frac{(100 - Hi)}{100} = Materia\ sec\ a = Wf \frac{(100 - Hf)}{100} \quad (3)$$

El agua removida durante el proceso del secado es el producto entre la materia seca (Ws) y el gradiente de humedad del grano (Hi – Hf):

$$HbW = \frac{Wa}{Wa + Ws} * 100 \quad (4)$$

Donde:

HbW: Contenido de humedad en base húmeda

Wa: Peso del agua extraída

Ws: Peso de materia seca

El contenido de humedad en base seca es:

$$Hbs = \frac{Wa}{Ws} * 100 \quad (5)$$

Que es la cantidad de agua que tiene el grano en relación a la cantidad de materia seca.

2.1.3.4 Humedad externa del grano

Es aquella humedad de fácil extracción, que cubre la superficie de los granos, que se puede remover por temperatura o por ventilación.

2.1.3.5 Humedad interna del grano

Es aquella humedad de difícil extracción, que se encuentra en el interior de los granos.

2.1.3.6 Humedad inicial del grano

Es el contenido de humedad de los granos cuando han alcanzado su madurez fisiológica y están listos para ser recolectados, éstos presentan un determinado contenido de humedad, que varía de un producto a otro.

El café inicialmente presenta un rango de humedad del 55% al 52% y se le denomina café mojado, ésta va disminuyendo a través del secado y llega finalmente al 12% o 10% de humedad.

2.1.3.7 Humedad final del grano

Esta es la humedad que presenta un grano después de ser sometido a la etapa del secado. Este es un factor muy importante de allí se determina si hay o no crecimiento de hongos y bacterias que afectan la calidad del producto.

El café pergamino seco se debe almacenar con el 12% o 10% de humedad final así se garantiza su óptimo almacenamiento.

2.1.3.8 Humedad de equilibrio

Es el efecto del equilibrio entre las presiones de vapor del aire y el producto.

2.1.4 ETAPAS DEL SECADO

Pinzón y Parra (1987)¹¹ exponen que en el secamiento de granos existen dos procesos principales de secado:

- Transferencia de calor del aire hacia el grano
- Transferencia de masa en forma de vapor de agua, del grano hacia el aire.

Existen cuatro etapas en el proceso del secado, representadas en la figura 1:

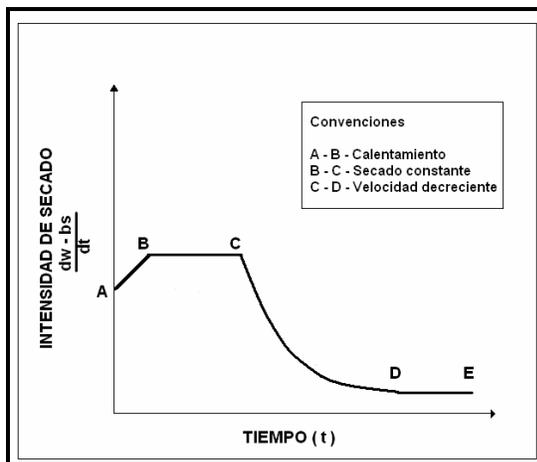


Figura 1. Etapas de secamiento de granos

Fuente: PINZON, Félix Eberto y PARRA ROJAS, Elías. Evaluación de un modelo de horno solar para secado de grano de café. Neiva 1987. 7 p. Tesis. Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería.

Donde:

¹¹ PINZON, Félix Eberto y PARRA ROJAS, Elías, Op. Cit., p 17.

- De A – B: Es la etapa de extracción de humedad de la superficie del grano, en ella la velocidad de evaporación aumenta cuando el grano se va calentando.
- De B – C: La pérdida de humedad ocurre desde la superficie ya que el grano se encuentra húmedo en su totalidad, esta pérdida ocurre por el fenómeno de convección. El punto C es el de contenido de humedad crítico que ocurre cuando la velocidad de difusión del producto es menor que la velocidad con que esta evaporando en la superficie. Es el periodo de velocidad constante.
- De C – D: Esta fase depende de las características del producto y se puede dividir en dos partes o fenómenos:
 1. Es un movimiento de humedad dentro del producto hacia la superficie por la difusión.
 2. Remoción de esa humedad de la superficie por convección, es el periodo de velocidad decreciente.
- De D – E: Es el periodo final del proceso, en esta etapa la capacidad del aire secante utilizada en el proceso es mínima, porque las condiciones ambientales en este momento son los únicos que influyen en el proceso. Es el periodo de equilibrio.

2.1.5 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura¹².

Cuando un cuerpo, un objeto sólido o un fluido, está a una temperatura diferente de la de su entorno u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico. La transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío, como resultado de la ley cero de la termodinámica. Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos en proximidad uno del otro, la transferencia de calor no puede ser detenida; solo puede hacerse más lenta.

La transferencia de calor puede ocurrir a través de tres mecanismos posibles, conducción, convección y radiación.

2.1.5.1 Conducción

La transferencia de calor por conducción es un proceso que ocurre de un medio a otro, ya sea sólido, líquido o gaseoso, pero que estén en contacto físico.

Allí existe una transmisión de energía molécula a molécula, sin desplazamiento molecular. El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica y varía de un material a otro. Los materiales que presentan conductividades térmicas elevadas, se dice que son buenos conductores de calor, mientras que aquellos materiales que presentan valores muy inferiores de conductividad térmica se denominan aislantes térmicos.

¹²Enciclopedia libre Wikipedia, en línea < http://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia_de_calor > ingreso 6 enero 2009.

2.1.5.2 Convección

La transferencia de calor por convección ocurre solamente en fluidos, presentándose con un desplazamiento de las moléculas, es decir, si se pone sobre fuego un recipiente con agua, el agua del fondo se calienta más rápido disminuyendo su densidad y como resultado el agua asciende y el agua que está más fría desciende al fondo del recipiente, presentándose un movimiento de circulación. El líquido más frío se calienta de igual manera por conducción y el caliente que está situado arriba pierde energía cediéndosela al medio a través de radiación.

Existen dos clases de transferencia de calor por convección, la natural y la forzada. En la convección natural el movimiento del fluido es debido a causas naturales, como el ejemplo anterior, cuando un fluido caliente asciende y el fluido frío desciende. En la convección forzada se obliga al fluido a fluir a través de medios externos, por ejemplo, un ventilador.

2.1.5.3 Radiación

La transferencia de calor por radiación es emitida en forma de ondas electromagnéticas o fotones, no necesita un medio de transmisión, puede ocurrir en el vacío, es la transferencia de calor más rápida, se produce a la velocidad de la luz.

La radiación es un fenómeno volumétrico, todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o reflejan radiación.

1.1.6 LEYES DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

2.1.6.1 Conducción

En 1822 el matemático Joseph Fourier dio una expresión matemática, conocida como la Ley de Fourier de la conducción de calor, la cual dice que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo con el signo cambiado.

$$qk = -KA \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Donde:

qk = Rapidez de transferencia de calor (cal/seg.)

K = Conductividad térmica del material (cal/cm. seg. °C)

A = Área de la sección a través del cual fluye el calor por conducción (cm²)

dT / dx = Gradiente de temperatura en la sección. T (°C) y x (cm.).

1.1.6.2 Convección

La transferencia de calor por convección se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$qc = hcA\Delta T \quad (7)$$

Donde:

qc = Rapidez de transmisión de calor por convección (cal/seg.).

hc = Coeficiente de película o de convección ($\text{cal/seg. cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$). Este valor depende de las propiedades del fluido.

A = Área de transferencia de calor.

ΔT = Diferencia entre la temperatura de la superficie (T_s) y la temperatura del fluido (T) en un lugar específico ($^\circ\text{C}$).

2.1.6.3 Radiación

La radiación térmica viaja a través del vacío, cuando esta radiación choca contra una superficie, parte de la radiación incidente (I) se puede reflejar (I_r) parte se absorbe (I_a) y parte se transmite (I_t).¹³

Entonces:

Reflectividad: $\rho = I_r / I$

Absortividad: $\alpha = I_a / I$

Transmisividad: $\tau = I_t / I$

Se tiene: $\rho + \alpha + \tau = 1$, para cuerpos opacos la transmisividad es igual a $\tau = 0$, entonces $\rho + \alpha = 1$

2.1.7 RADIACION SOLAR

Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. El sol se comporta como un cuerpo negro que emite energía a una temperatura de unos 6000 grados Kelvin.

¹³PASTRANA, Eduardo. Op. Cit. p 35.

La radiación solar va desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. El infrarrojo, es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas y su rango de longitud de onda va desde 700 nanómetros hasta 1 milímetro.

Los infrarrojos se utilizan en los equipos de visión nocturna cuando la cantidad de luz visible es insuficiente para ver los objetos. La radiación se recibe y después se refleja en una pantalla. Los objetos más calientes se convierten en los más luminosos.

Se le llama radiación ultravioleta a la radiación electromagnética cuya longitud de onda está en el rango de 400 nanómetros y 15 nanómetros. Se le denomina así porque su rango empieza desde longitudes de onda más cortas de lo que los humanos identifican como el color violeta.

La radiación ultravioleta es usada en las lámparas fluorescentes, que producen radiación ultravioleta a través de la ionización de gas de mercurio a baja presión. Un recubrimiento fosforescente en el interior de los tubos absorbe la radiación UV y la convierte en luz visible.

No toda la radiación emitida por el sol alcanza la superficie de la tierra, ya que las ondas ultravioleta más cortas son absorbidas por los gases de la atmósfera, básicamente por el ozono.

La energía recibida del sol, al atravesar la atmósfera calienta el vapor de agua en unas zonas de la atmósfera más que otras, provocando alteraciones en la densidad de los gases y por consiguiente desequilibrios que causan la circulación atmosférica.

La radiación que sale del sol y llega al espacio, se distribuye en una amplia serie de longitudes de onda. Parte de la radiación es esparcida en la atmósfera por las moléculas de gas y por pequeñas partículas de materiales sólidos.

De la radiación que finalmente llega a la superficie de la tierra, parte se absorbe y parte se refleja. La radiación solar reflejada permanece en esencia sin ningún cambio, sin embargo, la radiación que es absorbida, se convierte en energía térmica.

2.1.8 ENERGIA SOLAR

Es la energía obtenida directamente del sol, es un tipo de energía renovable y limpia, es la que se obtiene de fuentes naturales.

La energía solar es la energía producida por el sol y que es convertida a energía útil por el ser humano, ya sea para calentar o producir electricidad.

El sol es la estrella del sistema planetario en el que se encuentra la tierra, por lo tanto es la más cercana a la tierra. La energía radiada por el sol es aprovechada por todos los seres fotosintéticos, que utilizan la energía de la luz para transformar la materia inorgánica de su medio externo en materia orgánica que utilizan para su crecimiento y desarrollo.

El sol es una estrella que se encuentra en la fase denominada secuencia principal, que se formó hace unos 5000 millones de años y permanecerá en la secuencia principal aproximadamente otros 5000 millones de años.¹⁴

¹⁴ Enciclopedia libre Wikipeda, en línea <http://es.wikipedia.org/wiki/Disco_solar> ingreso 5 agosto 2008.

2.1.8.1 Radiación global

Del total de radiación que procede del Sol una parte se recibe directamente y se denomina radiación directa, otra, proviene de la difusión y de las múltiples reflexiones que sufre la radiación a su paso por la atmósfera, denominada radiación difusa.

Por tanto, se denomina radiación global a la suma de estas dos: la radiación directa, Q , y la difusa, q :

$$\text{Radiación global} = Q + q \quad (8)$$

En un día despejado, con cielo limpio, la radiación directa es predominante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado no existe radiación directa y la totalidad de la radiación que incide es difusa.

Los distintos tipos de colectores solares aprovechan de forma distinta la radiación solar. Los colectores solares planos, por ejemplo, captan la radiación total (directa + difusa), sin embargo, los colectores de concentración sólo captan la radiación directa. Por esta razón, los colectores de concentración suelen situarse en zonas de muy poca nubosidad. Los colectores solares planos pueden colocarse en cualquier lugar, siempre que la insolación sea suficiente.¹⁵

2.1.8.2 Radiación directa

Es la que se recibe directamente del sol, sin haber pasado por ningún cambio en su dirección.

¹⁵Enciclopedia libre de la energía solar, en línea
<<http://www.solarpedia.es/index.php?title=Portada&action=edit>> ingreso agosto 19 de 2008.

Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

2.1.8.3 Radiación difusa

Se denomina radiación difusa a aquella radiación que atraviesa la atmósfera, es reflejada por las nubes o absorbida por estas, la absorción se debe predominantemente al ozono y al vapor de agua.

La radiación difusa va en todas las direcciones como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no sólo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc.

Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque sólo ven la mitad.

2.1.8.4 Variación en la radiación solar

Las variaciones que se reciben sobre la superficie terrestre se pueden dividir en:

Variación mensual: La variación diaria mensual recibida por una superficie horizontal varía de un mes a otro por la localización geográfica y la posición cambiante que tiene el plano horizontal con respecto a los rayos del sol.

La tierra describe alrededor del sol una inmensa elipse en uno de cuyos focos está el sol.

El ecuador terrestre tiene una inclinación respecto del plano de la órbita terrestre de $23^{\circ} 27'$, debido a dicha inclinación constante, la dirección de los rayos solares incidentes forman un ángulo, llamado declinación solar en el plano del ecuador terrestre, este varía entre $-23^{\circ} 27'$ correspondiente al solsticio de invierno y $23^{\circ} 27'$ en el solsticio de verano. Dicho ángulo será nulo en el equinoccio de primavera y otoño.

La variación de la declinación es de forma periódica y puede calcularse aproximadamente mediante la expresión:

$$\delta = 23.45x \text{Sen} \left(360x \frac{284 + n}{365} \right) \quad (9)$$

Donde:

n: es el número de días del año que han transcurrido.

La siguiente figura muestra la variación del ángulo de incidencia de la radiación solar sobre un plano horizontal situado en el hemisferio Norte en invierno con respecto al mismo ángulo en verano.

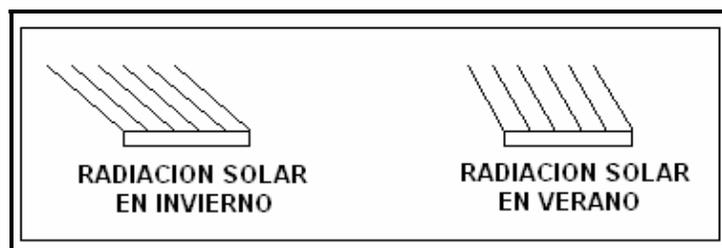


Figura 2. Ángulo de incidencia de la radiación solar

Se logra observar como en verano la inclinación de los rayos solares con respecto a la horizontal es mayor que en invierno.

Variación diaria: La radiación solar que llega a un plano situado en la superficie terrestre varía de un día a otro, variación que se debe fundamentalmente al cambio de nubosidad.

Por ejemplo, en días nublados, cuando la radiación solar recibida por la superficie es, en su mayor parte, difusa, el valor de dicha radiación suele ser del orden de $3.000 \text{ KJ/m}^2 \text{ día}$, mientras que en un día soleado el valor de la radiación puede ascender hasta $30\text{-}35.000 \text{ KJ/m}^2 \text{ día}$.

Variación horaria: La variación horaria de la radiación solar recibida por un plano horizontal situado sobre la superficie terrestre es debida, fundamentalmente, al movimiento de rotación de la Tierra.

Para representar el movimiento de rotación se emplea el "ángulo horario". El ángulo horario mide la distancia, expresada en grados, entre el plano meridiano de la Tierra que contiene al Sol y el que tiene un observador cuya hora se quiere determinar. En ángulo horario de "w", para una posición del Sol, debe expresarse en función de las horas transcurridas desde el mediodía, "t", teniendo en cuenta la equivalencia de 360° del ángulo horario total con el tiempo correspondiente que son 24 horas. Según esto puede escribirse:

$$\omega = 15t(\text{grados}) \quad (10)$$

El espesor de la capa atmosférica que debe atravesar la radiación para llegar a la superficie varía a lo largo del día por el movimiento de rotación, de manera que, mientras a primera hora de la mañana esta capa es gruesa, al mediodía (ángulo solar igual a 0°) el espesor es mínimo y, en consecuencia, la radiación solar recibida es máxima.¹⁶

2.1.8.5 Intensidad sobre una superficie

Para determinar la intensidad sobre una superficie, se debe tener en cuenta rayos de intensidad por unidad de superficie que inciden sobre un plano, siguiendo una dirección que está inclinado un ángulo θ con respecto a la normal o perpendicular a la superficie.

La determinación de la intensidad sobre una superficie depende de la localización, el día, las condiciones atmosféricas y la inclinación de la superficie.¹⁷

La energía radiante que incide sobre una superficie normal a los rayos del sol, se puede estimar por:

$$G_n = G_o \tau_a^m \quad (11)$$

Donde:

G_o : Constante solar $2.0 \text{ cal/ cm}^2 - \text{min}$.

m : Masa relativa del aire

τ_a : 0.7 coeficiente de transmisión por unidad de masa del aire.

De acuerdo con la posición del sol, el valor de m será la distancia Cenit Z , ángulo entre el cenit y la dirección del sol.

¹⁶El Sol y la Tierra. En línea < http://www.info-b.uclm.es/labelec/Solar/Solar_Fotovoltaica/introduccion6.htm
Ingreso 5 noviembre 2008.

¹⁷PINZON, Félix Eberto y PARRA ROJAS, Elías, Op. Cit., p 46.

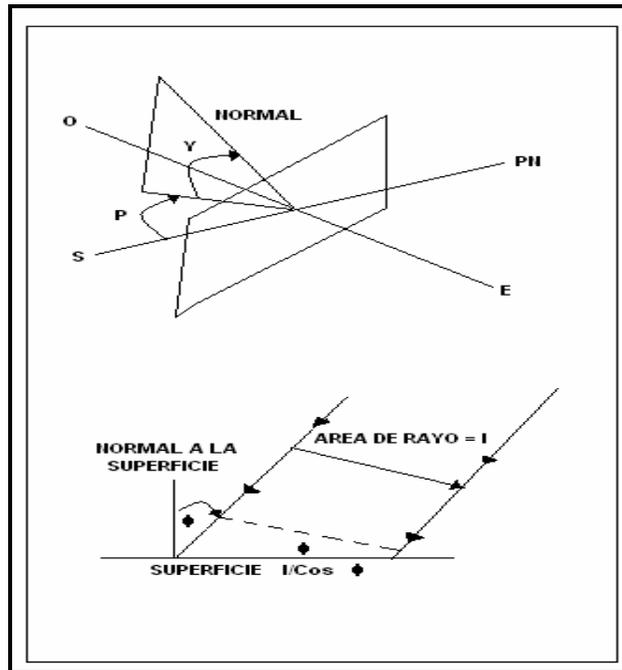


FIGURA 3. Intensidad sobre una superficie inclinada

Se denomina cenit a la intersección entre la vertical del observador y la esfera terrestre, es decir, si se imagina una recta que pasa por el centro de la tierra y por nuestra ubicación en su superficie, el cenit se encuentra sobre esa recta, por encima de nuestras cabezas, es el punto mas alto del cielo¹⁸. Ver figura 4.

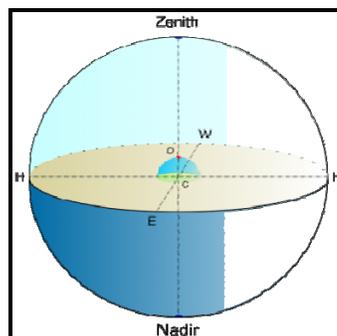


Figura 4. Posición relativa del cenit

¹⁸Enciclopedia libre de la energía solar, en línea < <http://es.wikipedia.org/wiki/Cenit>> Ingreso 9 noviembre 2008.

En el caso de que la superficie no se encuentre normal a la dirección del sol, la radiación incidente por unidad de área esta reducida por el coseno i , siendo i el ángulo entre la dirección del sol y la normal de la superficie.

$$G_i = G_n \cos i \quad (10)$$

Si la superficie receptora es horizontal, entonces:

$$\cos i = \cos Z \quad (11)$$

El ángulo cenit varía con la latitud del lugar desde la tierra, la hora del día y la declinación del sol.

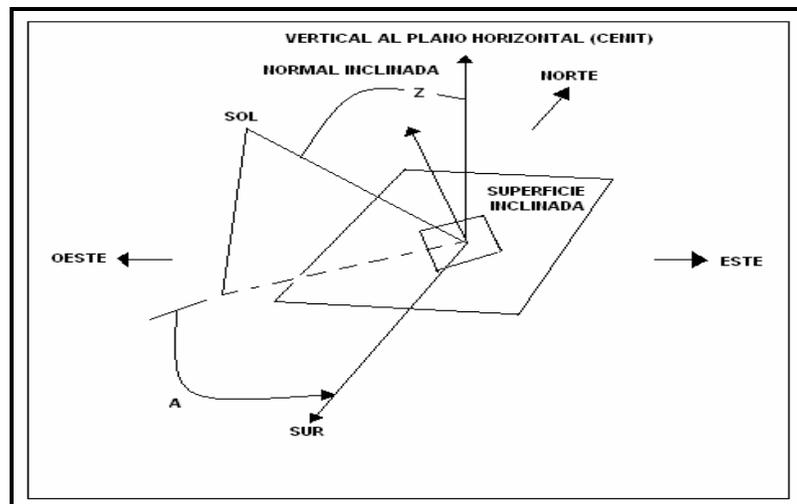


FIGURA 5. Ángulo cenit y azimut del sol

2.1.9 COLECTORES DE RADIACION SOLAR

Actualmente existen colectores solares los cuales emplean la radiación solar para incrementar la temperatura de un determinado flujo de aire, para acelerar la extracción de humedad.

Cuando se expone un objeto a la radiación solar su temperatura se incrementa, hasta tal punto que las pérdidas de calor son iguales a las ganancias de calor. Las pérdidas dependen de la emisión de radiación del material caliente, del movimiento del aire frío del medio en el que está y de la conductividad térmica de los objetos que están en contacto con el. Las ganancias de calor dependen de la intensidad de la radiación solar y del poder absorbente de su superficie.

Básicamente la radiación solar para incrementar temperaturas puede captarse de dos maneras, cubriendo una superficie receptora con una lámina transparente a la luz del sol, ya sea de vidrio o de plástico, pero enfocando la radiación en una gran superficie a un receptor de superficie pequeña.

Los colectores solares se clasifican en:

- Colectores solares planos
- Colectores solares focales

Los colectores planos generalmente son estáticos, aunque a veces son movidos de acuerdo a la estación del año. Mientras que los colectores solares focales son movidos a lo largo del día para seguir el sol.

2.1.9.1 Colectores solares planos

Los colectores de placa plana normalmente tienen una superficie negra mate que se coloca con un ángulo de acuerdo al movimiento diario del sol, con una cubierta transparente.

La luz del sol de longitud de onda menor de 2.5 μm pasa a través de esta cubierta transparente, pero la radiación infrarroja de gran longitud de onda que emite el receptor caliente no puede volver a salir a través de la superficie de plástico, ya que este es opaco a longitudes de onda larga.

Cuando la radiación solar continúa incidiendo sobre la superficie receptora oscura, como consecuencia de esto, se incrementa la temperatura, las pérdidas caloríficas crecen hasta que alcanzar un estado de equilibrio cuando el calor se recoge para ser utilizado y las pérdidas de calor se igualan al calor recibido. En este estado de equilibrio se cumplirá:

$$CA\tau\alpha = q_0A = quA + (qr + qa + qc) * A \quad ^{19} \quad (12)$$

Donde:

C = Flujo total de energía total recibida por unidad de superficie. ($\text{Cal}/\text{cm}^2 \text{ min.}$)

A = Área total del receptor.

τ = Transmisividad de las láminas de plástico que atraviesan los rayos del sol. Depende del ángulo de incidencia.

α = Poder de absorción de la superficie receptora.

q_0 = Absorción de energía radiante por unidad de tiempo y unidad de área.

¹⁹ QUINONEZ M, Benjamín. Bioingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogota 1982.

q_{oA} = Calor radiante absorbido por unidad de tiempo en la superficie total del receptor.

q_uA = Energía calorífica transferida del receptor al fluido por unidad de tiempo.

q_{rA} = Pérdidas por radiación del colector por unidad de tiempo.

q_{cA} = Pérdidas por convección y conducción del colector al aire exterior.

q_{cA} = Pérdidas de calor por conducción del colector a través del aislamiento a la estructura.

La posición de los colectores permite la mayor o menor captación de calor solar, pero esta también depende del tamaño, del peso, del costo y de las necesidades.

Los colectores horizontales son más fáciles de construir, pero los colectores inclinados hacia el ecuador captan una gran parte de calor solar.

Existen varias clases de colectores solares planos:

Colector solar plano de superficie absorbente cubierta por una lámina transparente: En este la radiación atraviesa la lámina transparente y es absorbida por la placa absorbedora, aumentando su temperatura hasta encontrar un equilibrio, dependiendo del flujo de aire que circula.

Colector solar plano de superficie absorbente descubierta: en este diseño se emplea una lámina metálica pintada de color negro en el área que esta expuesta a la radiación solar.

Colector solar plano suspendido: Este diseño es un poco mas complejo y costoso, ya que requiere para la superficie absorbedora de una lamina fina de aluminio corrugado pintada de negro, colocada entre la lamina transparente y la parte

interior del colector formando dos ductos separados por donde pasa el flujo del aire.

Colectores solares almacenadores: para el secado de granos se pueden emplear dos tipos de diseños colectores almacenadores de energía.

- Colector almacenador de energía con cubierta de lámina transparente: Para la construcción de este diseño se inicia con una cubierta de plástico sobre el suelo y luego una capa de piedra pintada de negro y sus cavidades se orientan hacia los rayos del sol para aprovechar más la energía. Las paredes del colector se construyen en madera y el flujo de aire es originado por la succión de un ventilador.
- Colector almacenador de energía de superficie absorbente cubierta por plástico transparente inflable: Para construir este colector se inicia con la remoción de una capa de tierra de aproximadamente 20 cm., la cual es llenada por piedra la cual es pintada de negro, la estructura del colector se hace con listones de madera. Sobre la estructura se coloca un plástico transparente cubriendo todo el colector. Se le colocan dos ventiladores unos a la entrada del aire y otro a la salida de este, el ventilador a la entrada debe ser axial de baja potencia, será el encargado de mantener inflado el plástico, el otro ventilador deberá ser centrifugo de alta potencia y vencerá la resistencia al paso del aire en los elementos del sistema de secado.

2.1.9.2 Colectores solares focales

Este sistema utiliza sol la radiación directa, pues son movidos para seguir al sol y aprovechar esa radiación solar que no es dispersada. Dependiendo de la perfección óptica del colector se puede llegar a alcanzar una temperatura de hasta 3500`C con radiación solar focalizada, con espejos circulares de sección parabólica.

El tamaño del receptor depende de la perfección de la forma de la superficie del espejo. El área del receptor se mantiene tan pequeña como sea posible para así reducir las pérdidas de calor y producir altas temperaturas.

2.1.9.3 Principio de funcionamiento de los secadores solares

De acuerdo con Delgado *et al* (2001), el secado del material (colocado en bandejas) 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 calor²⁰.

La masa de material habrá disminuido de modo homogéneo hasta los valores aceptables para su empleo comercial.

El secado quedará completado cuando el producto alcance la baja humedad preestablecida según las exigencias comerciales o de uso (humedad de equilibrio), y que se controla por medios indirectos (muestras testigos de material y métodos de laboratorio apropiados).

²⁰ DELGADO, Maria del Carmen *et al*. Familia de Secadores solares Secsol. 2001

El secado solar no sigue una curva de disminución continua de humedad, ya que no es posible mantener de modo estable durante las 24 horas del día la temperatura y humedad del aire. Pero en la práctica el proceso de secado no se interrumpe: durante las horas de sol se intensifica el secado superficial por un mayor calentamiento del aire, en tanto que durante la noche se intensifica la difusión de la humedad desde el interior del material hacia su superficie a medida que el material que se seca cede parte de su calor al aire, lo que mantiene su capacidad de absorción de humedad.

El secador solar tipo invernadero, consiste básicamente en una estructura de madera que puede ser de sección cuadrada o rectangular, el exterior se encuentra cubierto por plástico especial para invernadero el cual tiene un tratamiento para resistir la intemperie y la degradación causada por los rayos del sol. El plástico no deberá llegar hasta el piso, es conveniente dejar abierto hasta una altura de entre 40 y 70 cm. desde el nivel del suelo, así como disponer de aberturas en la parte cercana al techo con el fin de permitir la circulación de aire, además de dejar una puerta para el acceso.

En el interior se colocan tarimas construidas con madera y malla de acero sobre las cuales se colocará los granos de café. Pueden colocarse tarimas en uno, dos o tres niveles, según se requiera, se recomienda dejar una separación entre cada una de ellas de al menos 50 cm. para facilitar el acceso y permitir la circulación del aire. Las tarimas de malla pueden ser móviles, de manera que se posibilite el uso del secador para otras actividades.

El funcionamiento y operación del secador es muy simple, el principio básico es calentar el aire del interior mediante los rayos del sol, disminuyendo así su humedad relativa, este aire caliente, al contacto con el café húmedo, tenderá a

absorber agua secando por tal razón el grano. Debido a las diferencias de temperatura existentes entre el aire del interior y del exterior se da una circulación de éste por el fenómeno de convección natural, de esta forma el café perderá gradualmente su humedad.

Es de gran importancia considerar en la ubicación del secador un sitio adecuado que evite cualquier tipo de sombra, además se recomienda buscar la mejor orientación de manera que los rayos del sol incidan en el secador de forma directa a lo largo del día.

III. METODOLOGIA



Figura 6. Vista frontal del sistema modular

3.1 UBICACIÓN DEL SECADOR SOLAR MODULAR

El sistema secador se encuentra ubicado en el municipio de Santa María en la inspección de San Joaquín, finca el Paraíso (Ver figura 7) a una altura de 1900 m.s.n.m. con 02°54'08,61" latitud Norte, 75°35'52" longitud Oeste y temperatura media de 17°C. (IGAC 2009).



Figura 7. Vista frontal finca el Paraíso

3.2 EQUIPOS UTILIZADOS

3.2.1 Localización

La etapa experimental se realizó en la finca el Paraíso y el Laboratorio de calidad de la Institución Educativa San Joaquín del municipio de Santa Maria (H).

3.2.2 Materia prima

Se utilizó café pergamino (*Coffea arabica L.*) variedad caturra, con un contenido inicial de humedad del 50% base húmeda, procedente del municipio de Santa Maria (Huila), de la finca el Paraíso, y beneficiado por el método tradicional, en el cual el grano en cereza una vez despulpado se dejó fermentar aproximadamente 18 horas, se lavó y posteriormente se secó.

3.2.2 Equipos

Para el secado de café se utilizó el diseño instalado en la finca el Paraíso, el cual tiene una capacidad de secado de 570 kg aproximadamente.

Se emplearon los equipos descritos a continuación.

- Medidor de humedad marca Quantik modelo MH- 302 MOISTURE METER. Made in Colombia.
- Balanza con aproximación de 0.1gr. Scout – Pro SP601, capacidad 600gr. Marca OHAUS.
- Termómetro digital LCD display marca LCB -10°C y 100°C

- Termómetro de mercurio para bulbo seco y bulbo húmedo. Marca SILBER BRAN 240°C y 110°C
- Bolsas con sello hermético marca Ziploc
- Recipiente plástico con capacidad 1000ml.
- Paseras modelos de simulación con medidas 30x30cm. En malla metálica 4x4.
- Secadero modular tipo capilla con 15 paseras y dimensión igual a 32m²
- 15 paseras con medidas de 3x1m, en malla metálica 4x4.

3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SECADOR SOLAR MODULAR

El sistema deshidratador fue construido con la orientación del Ingeniero Miller Sánchez instructor del SENA, del área de construcciones rurales, y el trabajo de los promotores campesinos del Proyecto Café Sostenible Santa María (Ver figura 8).

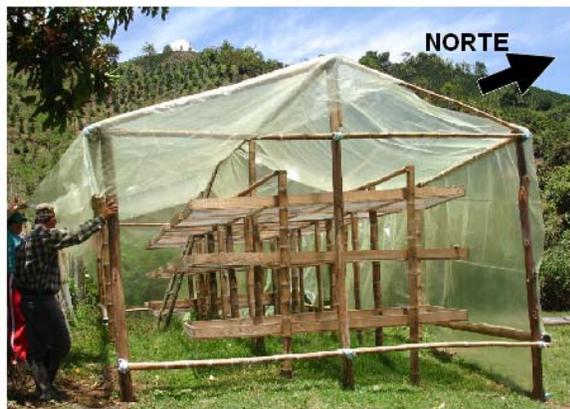


Figura 8. Vista lateral derecha del sistema, construcción del secador

Una vez definido el lote, se seleccionan las guaduas que se emplean en la construcción del secador; luego con una cinta métrica se mide para marcar el lugar donde se instalarán las guaduas que se entierran 40 cm. de profundidad,

quedando estas como las guaduas laterales que son las columnas de la estructura (Ver figura 9).

Existen diversos diseños y dimensiones de estos dispositivos solares, para ésta evaluación preliminar se empleó el diseño que consta de un área total de 32 m², y 15 paseras de 3 m² cada una. La estructura está construida totalmente en guadua. (Ver figura 9).

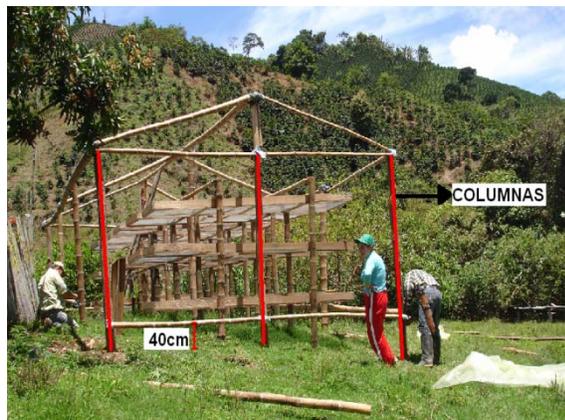


Figura 9. Construcción de la estructura.

Como lo indica la figura 9, las guaduas que van horizontalmente en la parte inferior o vigas de la estructura, van a una altura de 40 centímetros del suelo, que permiten la circulación del aire, éstas se dejan en la misma dirección de la pendiente del terreno.

Es importante a la hora de instalar estas estructuras solares orientarlas de tal forma que los vientos pasen a través de las paseras; si esto no es posible por la topografía, las cortinas móviles pueden contribuir a optimizar la acción de estos (Ver figura 10).



Figura 10: Orientación del secador.

Para una mayor seguridad en la instalación de la estructura, las uniones de la guadua se aseguran con varilla de 3/8 de pulgada, con su correspondiente tuerca y arandela. (Ver figura 11).



Figura 11: Uniones de la estructura en guadua.

Para mejorar la rigidez estructural de la guadua, los orificios están cubiertos con tapones de madera, como muestra la figura 12.

TAPON DE MADERA PARA QUE LA GUADUA NO SE
COMPRIMA POR LA PRESION DE LOS TORNILLOS

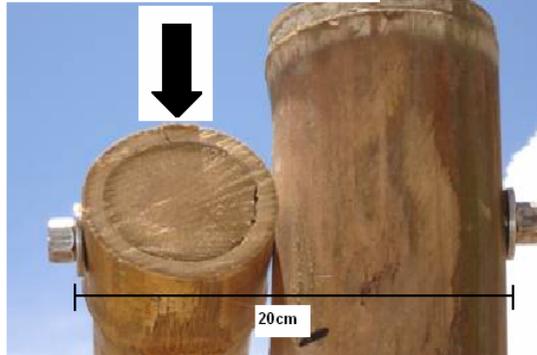


Figura 12: Cubrimiento de la guadua en las uniones.

Una vez construida la estructura del secadero se verifica su aseguramiento, y se toma nuevamente la cinta métrica para marcar la distancia donde se colocarán las guaduas que serán el soporte de las paseras y así instalar los bloques (Ver figura 13).

Estos bloques multiniveles llevan una separación de 50 cm. que permiten que el cafetero camine entre los módulos y trabaje cómodo. (Ver figuras 13 y 14).



Figura 13. Montaje de los bloques en el secador



Figura 14. Montaje de las paseras en los bloques

Para lograr obtener el movimiento vertical de las paseras en los módulos, se diseñó un pasador ubicado en la parte delantera de estas, que es retirado en el momento de hacerla descender (Ver figura 15(b) y 16). En la parte trasera se aseguran con varilla de 3/8 de pulgada. (Ver figura 15(a)).

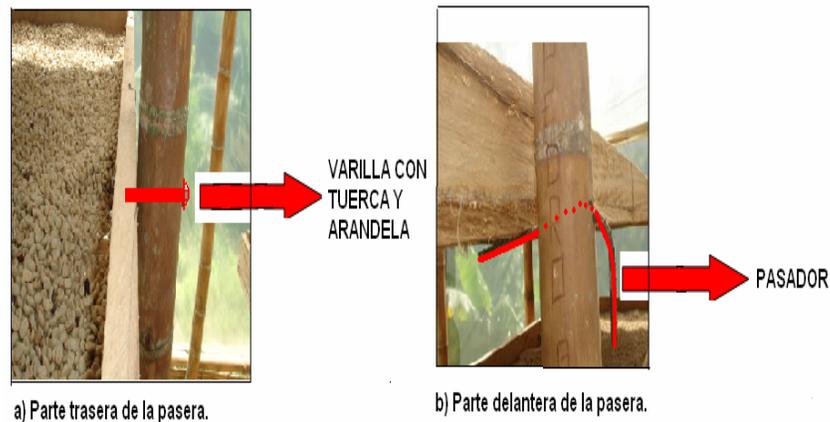


Figura 15. Fijación de la pasera.

Movimiento vertical de las paseras al sacar el pasador o pin:



Figura 16. Movimiento vertical de las paseras.

El movimiento vertical de las paseras es para permitir que el cafetero retire el grano depositado en estas y facilitar la rotación del café, como lo muestra la figura 17.



Figura 17. Rotación del café durante el secado.

Como el diseño es multiniveles, las paseras se colocan una sobre la otra de forma vertical, con una distancia de 60 cm. entre ellas.

Las paseras se elaboran con tabla y malla metálica, las tablas se cortan de 3 m de largo por 10 cm. de ancho, para los laterales, de 1 m de largo por 10 cm. de ancho para los transversales y son aseguradas con puntillas de 2 pulgadas, uniéndolas de tal manera que se obtenga la forma de un rectángulo. (Ver figura 18).

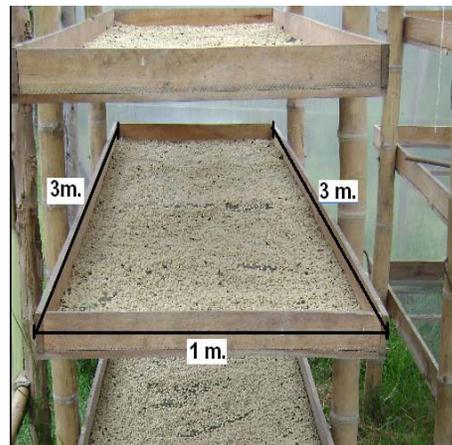


Figura 18. Posición de los niveles

Para lograr la correcta operación del sistema solar este debe tener mínimo 3 puertas para el acceso con sus respectivas cortinas móviles (Ver figuras 19 y 20).

Sin embargo, para el diseño evaluado existe una posición del sistema (Ver figura 21) que no posee ningún tipo de cortina presentando dificultad para el ingreso del aire.



Figura 19. Vista lateral derecha del sistema y posición de las cortinas 1 y 2



Figura 20. Vista lateral izquierda del sistema y posición de la cortina 3



Figura 21. Vista lateral derecha del sistema y posición sur-oriente donde no hay cortina

3.4 EVALUACIÓN DEL SECADOR

En la evaluación del secador se empleó una cantidad inicial de material de 570kg, distribuidos en cantidades de 38 kg para cada una de las paseras (Ver Figura 22 y 23) y de esta manera se obtuvo el llenado total del secadero.



Figura 22. Pesaje del café para cada una de las paseras



Figura 23. Distribución del café en las paseras

Una vez llenado el sistema modular se abrieron las cortinas, las cuales se mantuvieron abiertas durante las horas del día, en las horas de la noche eran cerradas para evitar el re-humedecimiento del grano.

Para la determinación de la calidad del aire dentro del secadero modular, se monitoreó la temperatura ambiente (bulbo seco) y de bulbo húmedo, las cuales fueron tomadas dentro y fuera del sistema (Ver figura 24), datos como temperatura del grano, temperatura ambiente, peso de las muestras y contenido de humedad fueron tomados en las instalaciones del laboratorio de calidad.



Figura24. Termómetros para medir condiciones ambientales externas

Las condiciones ambientales internas fueron medidas en tres posiciones la primera al nivel de la pasera superior, la segunda al nivel de la pasera intermedia y la última al nivel de la pasera inferior (Ver figura 25), instalando en cada uno termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo.

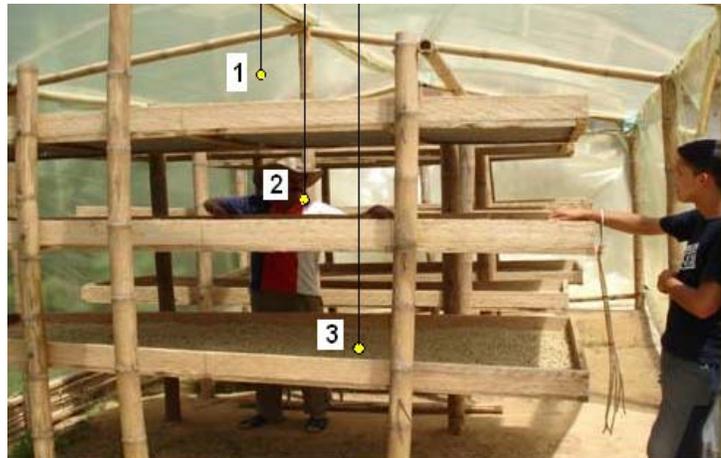


Figura 25. Vista lateral izquierda del secadero y posición de los termómetros

Inicialmente fueron diseñadas 15 paseras modelo en malla metálica, para ser depositadas en el interior del secadero sobre cada una de las paseras reales. La cantidad de material situado en estas fué 500 gramos, los cuales se midieron utilizando una balanza gravimétrica calibrada (Ver figura 26).



Figura 26. Balanza gravimétrica

Para realizar el seguimiento de la deshidratación del café fué necesario seleccionar muestras de los granos contenidos en cada una de las paseras reales, para ser depositadas en las paseras modelo de simulación como se muestra en la figura 27.

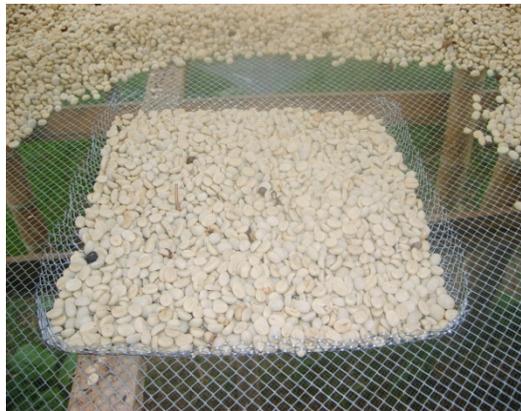


Figura 27. Vista frontal pasera modelo de simulación

El proceso de traslado de las muestras del secadero hacia el laboratorio se realizó en las bolsas con sello hermético (Ver figura 28) donde fueron depositados los granos y luego selladas correctamente, para evitar el intercambio gaseoso que podría alterar el contenido de humedad y temperatura de los granos.



Figura 28. Incorporación del café en la bolsa con sello hermético

Una vez llegaban las muestras de café pergamino al laboratorio de calidad se introducía un termómetro digital en cada una de las bolsas que en su interior contenían las muestras de café y así tomar la temperatura a la que se encontraba el grano (Ver figura 29).



Figura 29. Bolsa con sello hermético

Para la determinación del contenido de humedad se realizaron mediciones diarias, el equipo empleado para la toma de este es el mostrado en la figura 30, cuyas características técnicas están consignadas en la lista de materiales.



Figura 30. Equipo medidor de humedad

Se tomaron 300gr de las muestras de café de cada uno de los niveles del sistema modular y se les determinó el contenido de humedad. Se tomó esta cantidad debido a que el equipo calcula humedad con esa medida exacta. Para encontrar el porcentaje verdadero se realizaron correcciones por temperatura ya que el medidor trabaja a temperatura para el grano de 20°C.

También se realizaron mediciones de la temperatura ambiente del laboratorio para encontrar las condiciones a las cuales se realizó la determinación del contenido de humedad de los granos.

Posteriormente se realizó el traslado de las muestras nuevamente al secadero para ser depositadas en las paseras modelo y continuar con la deshidratación solar, hasta llegar a la humedad comercial.

Con los datos tomados en campo se realizaron gráficas de pérdida de humedad b.h del café en función del tiempo de secado para todos los niveles, inicialmente se realizaron gráficas para el nivel 1, 2 y 3 tomando los cinco bloques. Posteriormente y para tener una imagen clara de la pérdida de humedad de los tres niveles de cada uno de los bloques del sistema, se realizaron gráficas por bloques. Finalmente, se calculó y graficó la velocidad de secado de café en función de tiempo para los tres niveles del sistema.

► Cálculos realizados en el laboratorio de Suelos (Universidad Surcolombiana LABSUB):

Para la determinación del contenido inicial de humedad se usó la siguiente fórmula:

$$\% \text{HUMEDAD}_{bh} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

Se realizaron 4 repeticiones, se tomaron 25gr de café, se llevaron al laboratorio de Suelos de la Universidad Surcolombiana y se introdujeron en el horno por un periodo de 16 hr a una temperatura de 105° C según norma ISO 6673 de 1982 (CENICAFE 2009).

De esta manera se logró la determinación del contenido inicial de humedad del café empleado en la evaluación.

Una vez alcanzada la humedad final del producto analizado, se llevaron las muestras al laboratorio de calidad donde se realizaron pruebas de taza para determinar si durante el secado con el uso del secador solar modular tipo capilla se adquiere algún defecto de disminuya las propiedades organolépticas del grano.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

La tabla N° 1 presenta los cálculos estadísticos realizados para encontrar la variabilidad de los datos.

Nº DE REPETICIONES	Pi	Pf	%HUMEDAD (b.h)
1	25.20	12.94	48.65
2	25.20	12.66	49.78
3	25.00	12.60	49.60
4	25.00	12.70	49.20
MEDIA			49.31
VARIANZA			0.75
S			0.44
C.V. (%)			1.00

Tabla N° 1 Determinación del valor medio del contenido inicial de humedad (b.h) del café

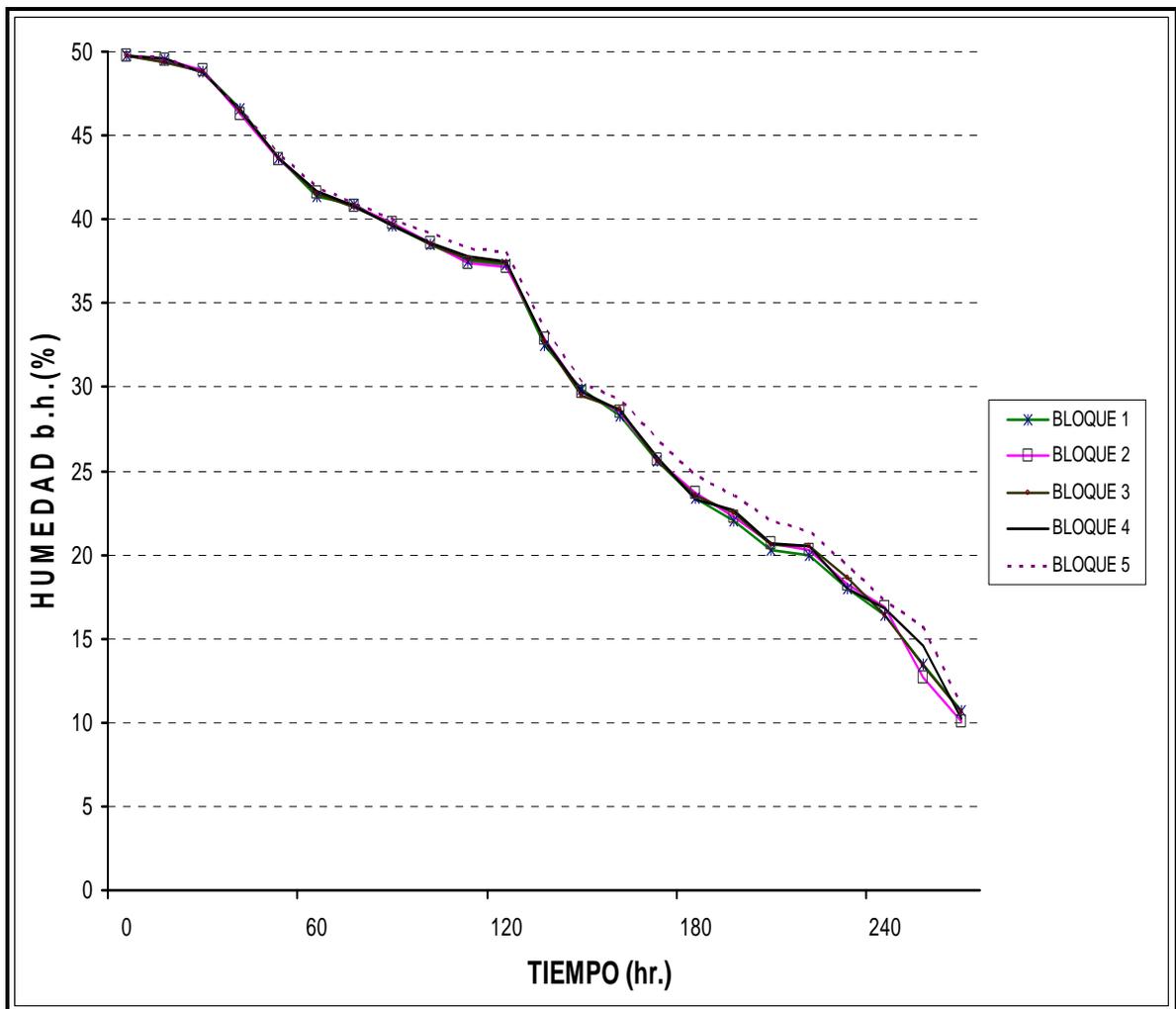
De acuerdo con el promedio calculado en la tabla N° 1 se establece que las muestras de café empleadas en la evaluación de secado, ingresaron al sistema con un contenido inicial de humedad del 49.31%.

La humedad media y la desviación estándar calculada, permiten expresar que el valor que indica la media es representativo para generalizar sobre la humedad de todo el café que se secó puesto que el valor de la desviación estándar y la varianza son bajos y tienden a cero.

Según, Orozco y Loaiza (2007) “El contenido inicial de humedad del café pergamino está entre el 48 y 55%, y el contenido final de humedad del café pergamino seco debe estar entre 10 y 12%” lo cual indica que la determinación de ésta, se encuentra dentro de los valores ya establecidos por investigadores del tema.

De acuerdo con Cenicafé (2000) el café pergamino húmedo (o lavado) tiene un contenido de humedad, generalmente en el rango de 52% a 54% y se considera un producto perecedero.

A continuación se presenta una secuencia de gráficas donde indica la variación del contenido de humedad en base húmeda a través del tiempo de secado, para cada uno de los niveles del sistema modular.



GRAFICA 1. Variación de la humedad b.h del café en función del tiempo de secado de las paseras del nivel uno o superior de cada uno de los bloques del sistema.

La gráfica 1 indica la pérdida de humedad del café para las muestras depositadas en el nivel superior de todos los bloques del sistema, indicando que no hubo re-humedecimiento del grano en ningún momento del proceso, se observa que la pérdida de humedad inicialmente es homogénea para los 5 bloques, hasta la hora 60 de iniciado el proceso de secado, allí el bloque 5 deja de perder el mismo porcentaje de humedad con respecto a las otras muestras del mismo nivel. Sin embargo, esta diferencia no es significativa. En la tabla 3 se observan todos los valores en el contenido de humedad para el proceso de secado, demostrando que el café depositado en el bloque 5 tiene una pérdida de humedad menor con respecto a las muestras del primer nivel de los otros módulos del sistema.

A la hora 84 de iniciado el proceso hasta la hora 120 hubo una pérdida de humedad constante para los módulos 1 al 4. Luego se presentó un incremento en la temperatura hasta la hora 144 favoreciendo el secado; posteriormente continuó normalmente el secado. A la hora 204 hasta la 216 se presentó nuevamente una pérdida de humedad constante, y finalmente continuó con la pérdida de humedad hasta llegar al valor requerido. No se presentaron variaciones importantes en la pendiente de la curva de secado.

Para las muestras del nivel superior de los cinco bloques su periodo de secado finalizó a las 264 horas de iniciada esta etapa, el contenido inicial de humedad fué del 49.8% y la humedad final es mostrada en la tabla 2.

BLOQUE	Hf (% b.h)
1	10.7
2	10.1
3	10.6
4	10.2
5	11

Tabla 2. Contenido de humedad b.h final para las muestras de café del nivel superior

La tabla 3 presenta los valores de humedad del café depositado en las paseras del primer nivel de todos los bloques del sistema, son valores tomados desde el inicio del secado hasta el final de la etapa.

TIEMPO(hr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (b.h.)				
	BLOQUE 1	BLOQUE 2	BLOQUE 3	BLOQUE 4	BLOQUE 5
0	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8
12	49.5	49.5	49.4	49.6	49.6
24	48.8	48.9	48.8	48.7	48.7
36	46.6	46.3	46.4	46.5	46.5
48	43.7	43.6	43.7	43.7	43.9
60	41.4	41.6	41.5	41.7	41.9
72	40.9	40.8	40.7	40.8	41
84	39.6	39.8	39.7	39.6	40
96	38.5	38.6	38.5	38.6	39.2
108	37.5	37.4	37.6	37.8	38.3
120	37.3	37.2	37.4	37.5	38
132	32.5	32.9	32.7	32.8	33.5
144	29.9	29.7	29.5	29.7	30.3
156	28.3	28.5	28.7	28.6	29.2
168	25.6	25.7	25.6	25.8	26.9
180	23.4	23.7	23.5	23.3	24.7
192	22	22.3	22.5	22.7	23.5
204	20.3	20.7	20.6	20.7	22
216	20	20.3	20.5	20.5	21.4
228	18	18.2	18.6	18	19.3
240	16.4	16.9	16.4	16.8	17.3
252	13.5	12.7	13.4	14.6	15.7
264	10.7	10.1	10.6	10.2	11

Tabla 3. Variación de la humedad b.h de las muestras de café del nivel 1 o superior

En la tabla 4 se presentan los valores de temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco monitoreadas para el nivel 1 o posición 1 mostrado en la figura 25, donde se

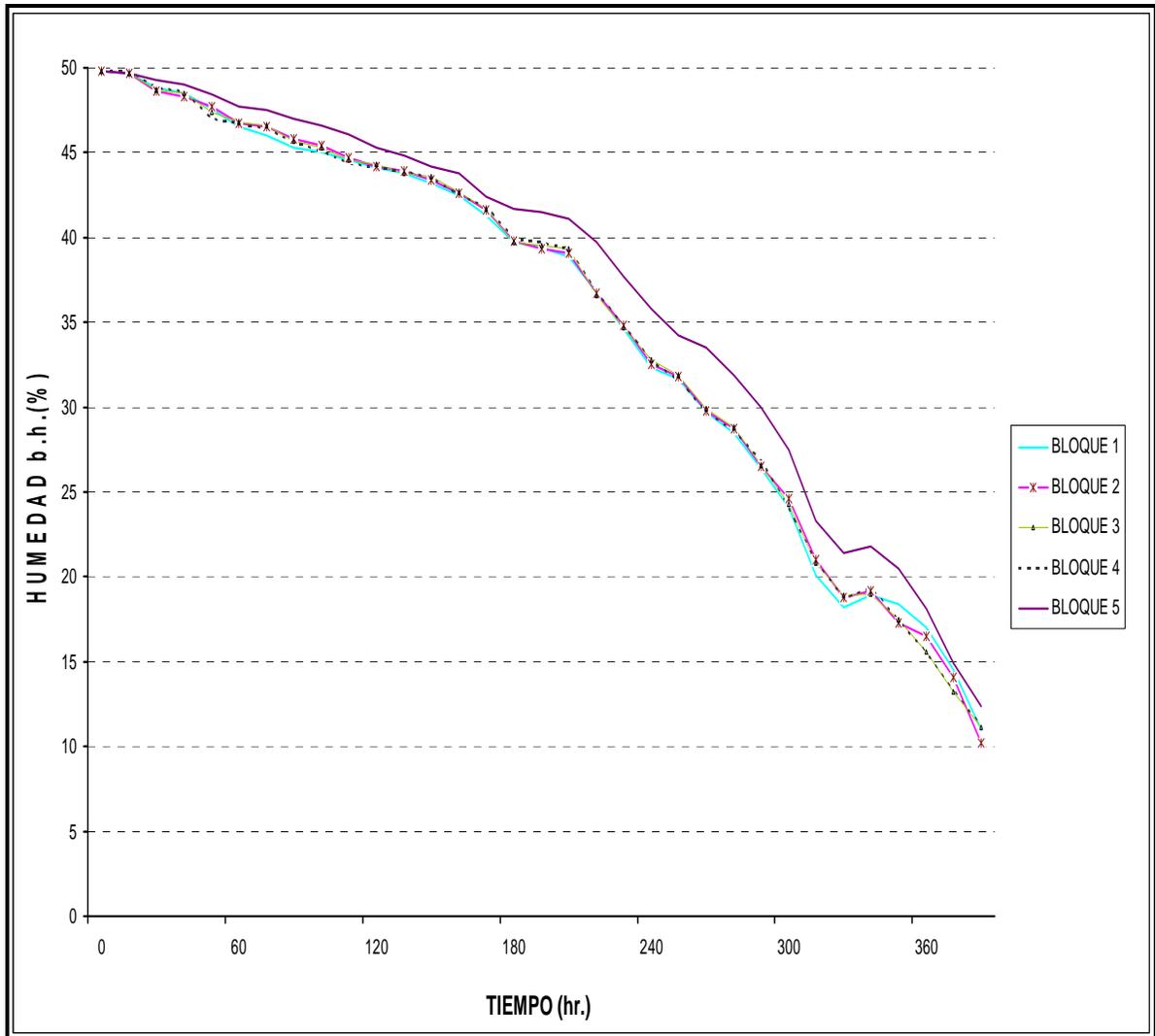
instalaron termómetros para determinar la temperatura y humedad relativa a la cual estaba expuesta el café.

HORA	TIEMPO (hr)	TEMPERATURA (°C) NIVEL UNO O SUPERIOR		HUMEDAD RELATIVA (%)
		BULBO SECO	BULBO HUMEDO	
2:00 PM	0	19.7	17	82
9:00 AM	12	21	17.5	80
5:00 PM	24	22	19	76
10:00 AM	36	23.4	18.5	66
5:30 PM	48	18.6	17	86
9:30 AM	60	26.4	20	55
4:30 PM	72	21.3	18.6	80
8:00 AM	84	19.6	17.8	87
5:00 PM	96	20	19	91
10:00 AM	108	21.4	18.7	79
5:00 PM	120	18.2	16	82
11:30 AM	132	40	24	26
5:30 PM	144	22	19	76
9:00 AM	156	23.3	20.5	80
5:00 PM	168	33	25	52
9:30 AM	180	28	23	66
4:30 PM	192	19.5	17	78
9:00 AM	204	22	20	83
5:00 PM	216	21	18	75
10:00 AM	228	32	27	68
5:30 PM	240	23	19.5	73
9:00 AM	252	28.8	22	55
4:00 PM	264	32.8	25	52

Tabla 4. Temperaturas registradas para el nivel uno o superior del sistema.

Se observa que la temperatura de bulbo seco o temperatura ambiente, más alta alcanzada fue de 40°C y la más baja fue de 18.2°C, con valores de humedad

relativa altos, el valor más alto encontrado para esta fue del 86% ratificando que el secado con el uso de estos sistemas solares no conserva la temperatura y humedad constantes, presentando en algunos casos condiciones húmedas para obtener un secado rápido.



Grafica 2. Variación de la humedad b.h del café en función del tiempo de secado para las paseras del segundo nivel o intermedio del sistema.

La gráfica 2 muestra al inicio de la etapa del secado del café para el nivel dos de los módulos, una pérdida constante en el contenido de humedad para los bloques

1 al 4, el bloque 5 deja de ser uniforme con respecto a los otros niveles, presentando un descenso más lento en el contenido de humedad. Se logra observar que desde la hora 180 hasta la 204 hubo una pérdida de humedad constante para todas las muestras en ese nivel.

Como lo demuestra la gráfica 2, para la muestra del nivel 2 a hora 336 de iniciado el proceso de secado se presentó un pequeño re-humedecimiento del grano, incrementando el contenido de humedad, y se presentaron valores altos de humedad relativa (Ver tabla 7). Al pasar el tiempo de secado continuó bajando el porcentaje de humedad, este re-humedecimiento es causado por la calidad del aire, saturación de este y poca capacidad para extraer la humedad.

Las muestras del nivel intermedio de los bloques terminaron su secado a las 384 horas, 120 horas más que el nivel superior. En la tabla 5 se presentan los valores de humedad final del café de cada uno de los bloques del nivel 2 del sistema.

BLOQUE	Hf (% b.h)
1	11
2	10.2
3	11.2
4	11.2
5	11.3

Tabla 5. Contenido de humedad b.h final para las muestras de café del nivel 2 o intermedio

La tabla 6 presenta los valores de contenido de humedad de todo el proceso de secado, para todas las muestras de café del nivel dos de los módulos del sistema.

TIEMPO(hr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (b.h.)				
	BLOQUE1	BLOQUE2	BLOQUE3	BLOQUE4	BLOQUE5
0	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8
12	49.7	49.7	49.7	49.8	49.7
24	48.8	48.6	48.7	48.8	49.3
36	48.5	48.3	48.5	48.6	49
48	47.6	47.7	47.4	47	48.4
60	46.5	46.7	46.8	46.7	47.7
72	46	46.5	46.6	46.4	47.5
84	45.3	45.8	45.7	45.6	47
96	45	45.4	45.3	45.1	46.6
108	44.6	44.7	44.6	44.4	46.1
120	44.1	44.2	44.3	44.1	45.3
132	43.8	43.9	43.8	43.9	44.8
144	43.2	43.4	43.6	43.5	44.2
156	42.5	42.6	42.7	42.5	43.8
168	41.3	41.6	41.7	41.8	42.4
180	39.7	39.8	39.7	39.9	41.7
192	39.4	39.3	39.5	39.7	41.5
204	38.9	39.1	39.3	39.3	41.1
216	36.8	36.7	36.6	36.8	39.7
228	34.6	34.8	34.7	34.8	37.7
240	32.3	32.5	32.8	32.7	35.8
252	31.7	31.8	31.9	31.6	34.2
264	29.7	29.8	29.9	29.7	33.5
276	28.5	28.7	28.8	28.6	31.9
288	26.4	26.5	26.6	26.8	30
300	24.1	24.6	24.3	24	27.5
312	20.1	21	20.8	20.9	23.3
324	18.2	18.8	18.9	18.7	21.4
336	18.9	19.2	19	19.4	21.8
348	18.4	17.3	17.5	17.4	20.5
360	17	16.5	15.6	15.5	18.1
372	14.5	14.1	13.2	13.3	14.9
384	11	10.2	11.1	11.2	12.4

Tabla 6. Variación de la humedad de las muestras del nivel 2 o intermedio

Los granos de café deshidratados del segundo nivel o nivel intermedio de los bloques terminaron su proceso de secado con un contenido de humedad dentro del rango comercial. Es importante recalcar que el bloque 5 presenta un tiempo de secado mayor respecto a las otras muestras del mismo nivel, causado por la baja circulación de aire en dicha posición.

En la gráfica 2 de pérdida de humedad con respecto al tiempo de secado, el re-humedecimiento que presentaron los granos al hacer la primera medición del día fue causado por la humedad del aire, pues hubo una temperatura baja durante las horas del día, encontrando como la temperatura más baja 17°C, mostrando un descenso de esta en las horas de la noche, lo que causó el cambio en la humedad del grano, se presentó una humedad relativa hasta del 92%. La tabla 7 presenta los valores de humedad relativa del nivel dos durante todo el proceso de secado.

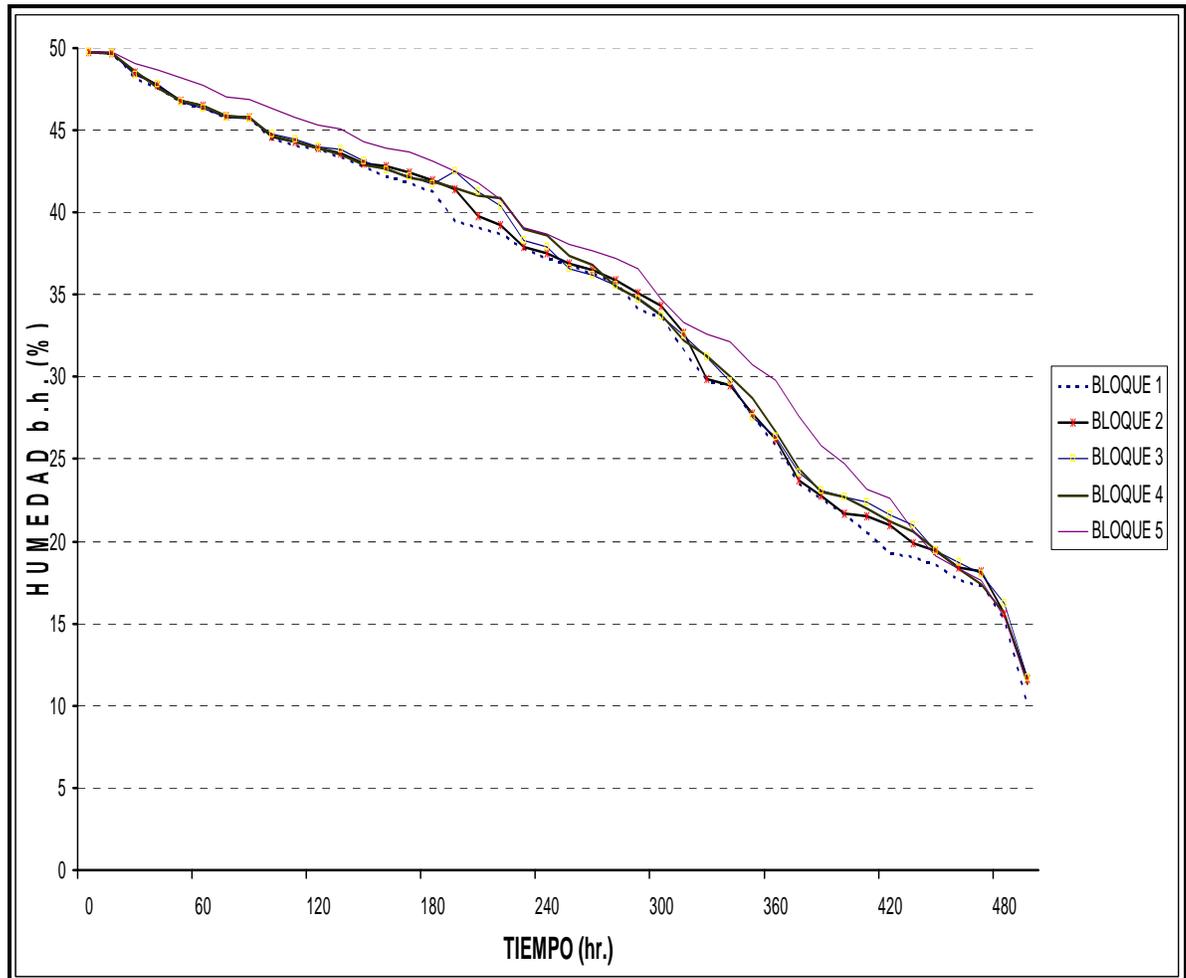
HORA	TIEMPO (hr)	TEMPERATURA (°C) NIVEL DOS O INTERMEDIO		HUMEDAD RELATIVA (%)
		BULBO SECO	BULBO HUMEDO	
2:00 PM	0	22	18.6	72
7:00 AM	12	17	16	90
6:00 PM	24	20.4	17.5	75
7:00 AM	36	19.8	18	83
5:30 PM	48	20	17.6	79
9:00 AM	60	21	18	75
5:30 PM	72	23	21	80
10:00 AM	84	22	20	83
5:30 PM	96	21	19	83
8:00 AM	108	19.5	17.5	82
4:30 PM	120	20	18	83
8:00 AM	132	17	15	81
5:30 PM	144	19	17	82
10:00 AM	156	22	19	72
5:00 PM	168	22.8	20	76

Tabla 7. Temperaturas registradas para en nivel dos o intermedio del sistema.

Continuación.....

HORA	TIEMPO (hr)	TEMPERATURA (°C) NIVEL DOS O INTERMEDIO		HUMEDAD RELATIVA (%)
		BULBO SECO	BULBO HUMEDO	
10:30 AM	180	27	24	75
4:30 PM	192	32	27	68
9:30 AM	204	28	24	75
5:00 PM	216	23.6	21	80
8:00 AM	228	19.6	17.5	82
4:30 PM	240	28	23	65
11:00 AM	252	35	29	64
4:00 PM	264	30	26	73
8:00 AM	276	22	18	68
5:00 PM	288	25	20	63
9:30 AM	300	27	21	58
5:30 PM	312	21	19	83
10:00 AM	324	25.6	20	61
6:00 PM	336	19	17	82
7:00 AM	348	24.9	21.5	67
5:30 PM	360	24	20	70
10:00 AM	372	29	25	72
5:00 PM	384	25	23	85

Tabla 7. Temperaturas registradas para en nivel dos o intermedio del sistema.



Grafica 3 Variación de la humedad b.h del café en función del tiempo de secado para las paseras del tercer nivel o inferior de los cinco bloques.

La gráfica 3 continúa evidenciando que durante el proceso de secado, la deshidratación es constante para las muestras de los bloques 1 a 4, el bloque 5 sigue presentando una pérdida de humedad menor con respecto a los otros bloques del sistema, en la tabla 9 se logra observar todos los valores de esta pérdida de humedad. La disminución en el contenido de humedad de este nivel es menor con respecto a los demás niveles, se obtuvo un secado durante más tiempo

de exposición al sol. Es un nivel donde los valores de humedad relativa son altos y la capacidad del aire de extraer humedad es menor.

Para la pasera tres o nivel inferior el tiempo de secado fue de 492 horas, con un contenido final de humedad entre el 10% y 12%. La tabla 8 muestra el contenido de humedad final para cada una de las muestras del nivel inferior.

BLOQUE	Hf (% b.h)
1	10
2	11.6
3	11.7
4	11.3
5	11.4

Tabla 8. Contenido de humedad b.h final para las muestras de café del nivel 3 o inferior

El nivel 3 del sistema, es un nivel que se encuentra próximo al suelo, y no obtiene radiación solar directa, lo cual genera un aumento en el periodo de secado del café; se determinó que este nivel es el menos eficiente con respecto a los niveles 1 y 2. De igual manera por estar a una distancia de 60 cm. del suelo y este por presentar cobertura vegetal, que contribuye con la retención de humedad, generan disminución en la eficiencia del secado. En la tabla 10 se presentan todos los valores de temperatura ambiente y humedad relativa encontrados en este nivel del sistema.

TIEMPO(hr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (b.h.)				
	BLOQUE1	BLOQUE2	BLOQUE3	BLOQUE4	BLOQUE5
0	49.8	49.8	49.8	49.8	49.8
12	49.7	49.7	49.7	49.7	49.8
24	48.1	48.5	48.4	48.6	49.1
36	47.6	47.7	47.8	47.6	48.7
48	46.7	46.8	46.7	46.8	48.2
60	46.3	46.5	46.3	46.5	47.7
72	45.8	45.9	45.8	45.9	47

Tabla 9 Variación de la humedad de las muestras del nivel 3 o inferior

Continuación.....

TIEMPO(hr)	CONTENIDO DE HUMEDAD (b.h.)				
	BLOQUE1	BLOQUE2	BLOQUE3	BLOQUE4	BLOQUE5
84	45.8	45.8	45.7	45.8	46.9
96	44.5	44.6	44.8	44.7	46.3
108	44.1	44.3	44.5	44.3	45.8
120	43.8	43.9	44	43.9	45.3
132	43.4	43.6	43.8	43.5	45.1
144	42.8	43	43.1	42.9	44.3
156	42.2	42.8	42.6	42.7	43.9
168	41.8	42.4	42.2	42.1	43.7
180	41.3	42	41.7	41.9	43.1
192	39.5	41.4	42.5	41.5	42.5
204	39.1	39.8	41.3	41	41.8
216	38.7	39.2	40.4	40.9	40.8
228	37.8	37.9	38.3	39	39.1
240	37.2	37.5	37.9	38.6	38.7
252	36.8	36.9	36.6	37.4	38.1
264	36.3	36.5	36.2	36.8	37.7
276	35.7	35.9	35.6	35.5	37.2
288	34.1	35.1	34.7	34.8	36.6
300	33.6	34.3	33.7	33.8	34.7
312	31.6	32.7	32.5	32.2	33.3
324	29.7	29.9	31.2	31.3	32.6
336	29.5	29.5	29.7	30	32.1
348	27.6	27.8	27.5	28.7	30.7
360	25.8	26.2	26.4	26.7	29.8
372	23.5	23.7	24.2	24.4	27.6
384	22.6	22.8	23.1	23	25.8
396	21.6	21.7	22.7	22.7	24.7
408	20.5	21.5	22.4	22	23.2
420	19.3	21	21.6	21.2	22.6
432	19	19.9	21	20.6	20.7
444	18.6	19.4	19.4	19.5	19.1
456	17.6	18.4	18.7	18.3	18.3
468	17.3	18.2	18	17.4	17.6
480	15.2	15.6	16.2	15.6	15.4
492	10	11.6	11.7	11.3	11.4

Tabla 9 Variación de la humedad de las muestras del nivel 3 o inferior

HORA	TIEMPO (Hr)	TEMPERATURA (°C) NIVEL TRES O INFERIOR		HUMEDAD RELATIVA (%)
		BULBO SECO	BULBO HUMEDO	
02:00 PM	0	19.5	18	87
10:00 AM	12	21	19	83
05:30 PM	24	25	22	77
08:00 AM	36	18	15	73
06:00 PM	48	19.4	18	87
08:00 AM	60	22	20	83
05:30 PM	72	24	22	84
08:00 AM	84	25	23	85
05:00 PM	96	21	19	83
08:30 AM	108	22	19	76
06:00 PM	120	19	17	82
08:00 AM	132	17	16	90
05:30 PM	144	21	19	83
08:00 AM	156	23	20	76
06:00 PM	168	21	19	83
09:00 AM	180	17	15	81
04:30 PM	192	20	18	83
08:30 AM	204	18	16	82
05:30 PM	216	21	19	83
09:30 AM	228	23	21	84
05:30 PM	240	24	22	84
08:00 AM	252	19	17	82
06:00 PM	264	22	19	72
09:00 AM	276	21	18	75
06:00 PM	288	24	21	77
08:00 AM	300	21	19	83
05:00 PM	312	19.8	17	74
10:00 A.M.	324	22	20	83
05:00 PM	336	20	19	91
08:00 AM	348	19	17	82
05:30 PM	360	17	15	81

Tabla 10. Temperaturas registradas para en nivel tres o inferior del sistema

Continuación.....

HORA	TIEMPO (Hr)	TEMPERATURA (°C) NIVEL TRES O INFERIOR		HUMEDAD RELATIVA (%)
		BULBO SECO	BULBO HUMEDO	
09:00 AM	372	24.5	22	81
05:30 PM	384	20	18	83
10:00 AM	396	22	19	76
05:30 PM	408	20	18	83
08:00 AM	420	24	21	77
06:30 PM	432	23	20	76
07:00 AM	444	22	17	61
05:00 PM	456	19	18	91
07:00 AM	468	21	19	83
05:30 PM	480	23	19	69
08:00 AM	492	21	18	75

Tabla 10. Temperaturas registradas para en nivel tres o inferior del sistema

La posición del termómetro para el nivel inferior del sistema la temperatura más alta que se presentó fue de 25°C y la más baja fue de 17°C, con respecto a las otras dos posiciones, fue el nivel que presentó temperaturas más bajas.

En la tabla 11 se presenta la temperatura más alta y más baja para cada una de la tres posiciones analizadas. Corroborando que la posición 3 es donde la temperatura es menor comparada con los dos niveles superiores.

POSICION	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	
	MAYOR	MENOR
1	40	18.2
2	35	17
3	25	17

Tabla N° 11 Temperaturas máximas y mínimas registradas para las tres posiciones de los termómetros

Pese a que las temperaturas máximas y mínimas presentadas en la tabla 11 no fueron a la misma hora de lectura, se determina que la variación de estas es constante y se presenta durante todo el proceso del secado, demostrando que para el estudio realizado y bajo las condiciones ambientales de un altura superior a 1900 m.s.n.m hay presencia de temperaturas muy bajas que prolongan el proceso de secado.

Se observa que el valor máximo de temperatura se presentó en la posición para el nivel superior de los tres niveles, evidenciando que es más rápido el secado en las paseras superiores debido al incremento de la temperatura por la radiación solar directa, encontrando también una humedad relativa menor en dicha posición, respecto a los valores encontrados en las dos posiciones inferiores.

En todas las gráficas se logró observar la pérdida de humedad del producto, que inicialmente presentó un contenido de humedad promedio del 49.31%, y finalizaron el proceso de secado con un rango de humedad del 10% al 12, humedad final a la cual se debe llevar el café para lograr su comercialización, es lo establecido por las normas vigentes de comercialización.

Para las muestras del primer nivel o nivel uno, se encontró un menor tiempo de secado, en 264 horas, se alcanza un contenido final de humedad del 10% al 12%; es un nivel donde la obtención de la radiación solar es directa, no hay obstáculos que impidan la incidencia de estos sobre las paseras superiores.

La circulación de aire dentro del sistema modular es muy importante, al ser retirada la humedad del producto a deshidratar, este debe salir para que ingrese aire nuevo con más capacidad de extraer humedad para lograr un secado homogéneo, y evitar la presencia del fenómeno de condensación de la humedad, generando un grano de mala calidad (grano manchado). A través de los datos

obtenidos, se determinó que la posición donde se encuentra ubicado el bloque 5 donde no hay presencia de cortina móvil, (Ver figura 21) se halló una pérdida de humedad menor con respecto a los demás niveles del sistema, es una posición donde la baja circulación del aire afecta negativamente el secado.

En lo que concierne al segundo nivel del sistema, el secado se prolongó 120 horas más en llegar al orden del 12% al 10%, debido a la baja incidencia de la radiación solar y la humedad relativa del sitio. Igualmente el nivel inferior del sistema presentó un tiempo de secado mayor comparado con los niveles 1 y 2, el secado se prolongó 10 días más que el nivel superior y 5 días más que el nivel 2; a las 492 horas de iniciado el proceso de secado se alcanzó la humedad deseada.

El café depositado en las paseras superiores de los módulos, emplea un tiempo de secado adecuado a las condiciones ambientales donde se encuentra, 11 días de secado para una altura de 1900 m.s.n.m es apropiado para el secado al sol y su posterior comercialización. Las condiciones climáticas a las cuales se encuentra expuesto el café son críticas para obtener un secado en pocos días, especialmente cuando la cosecha de café se presenta en época de lluvias (invierno).

En cuanto al tiempo de secado para el nivel 2 y 3 presenta periodos muy prolongados en comparación con el nivel 1, en la zona cafetera es una necesidad exponer rápidamente al sol el café recolectado semanalmente para obtener beneficios económicos. Para tal fin se evaluó el diseño modular, se estableció su funcionamiento y las posibles recomendaciones para mejorar la eficiencia del sistema.

Finalmente, se encuentra que al llenar en su totalidad el secadero modular, el tiempo de secado para cada uno de los niveles se presenta en la tabla 12,

indicando los valores en tiempo de secado para cada uno de los niveles analizados, encontrando para la finalización del secado un lapso de tiempo de 492 horas.

NIVEL	TIEMPO DE SECADO (DIAS)
1	11
2	16
3	21

TABLA 12 Tiempo de secado para cada uno de los niveles del sistema modular

Una vez finalizada la fase del secado se realizaron pruebas de taza o análisis sensorial de las muestras empleadas, se encontraron los siguientes resultados:

CARACTERISTICAS	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Fragancia	Pronunciada	Pronunciada	Pronunciada
Aroma	Aromático	Aromático	Aromático
Impresión global	Buena	Buena	Buena
Acidez	Media – medio	Medio – alta	Medio – medio
Cuerpo	Medio – bajo	Medio – medio	Medio – medio

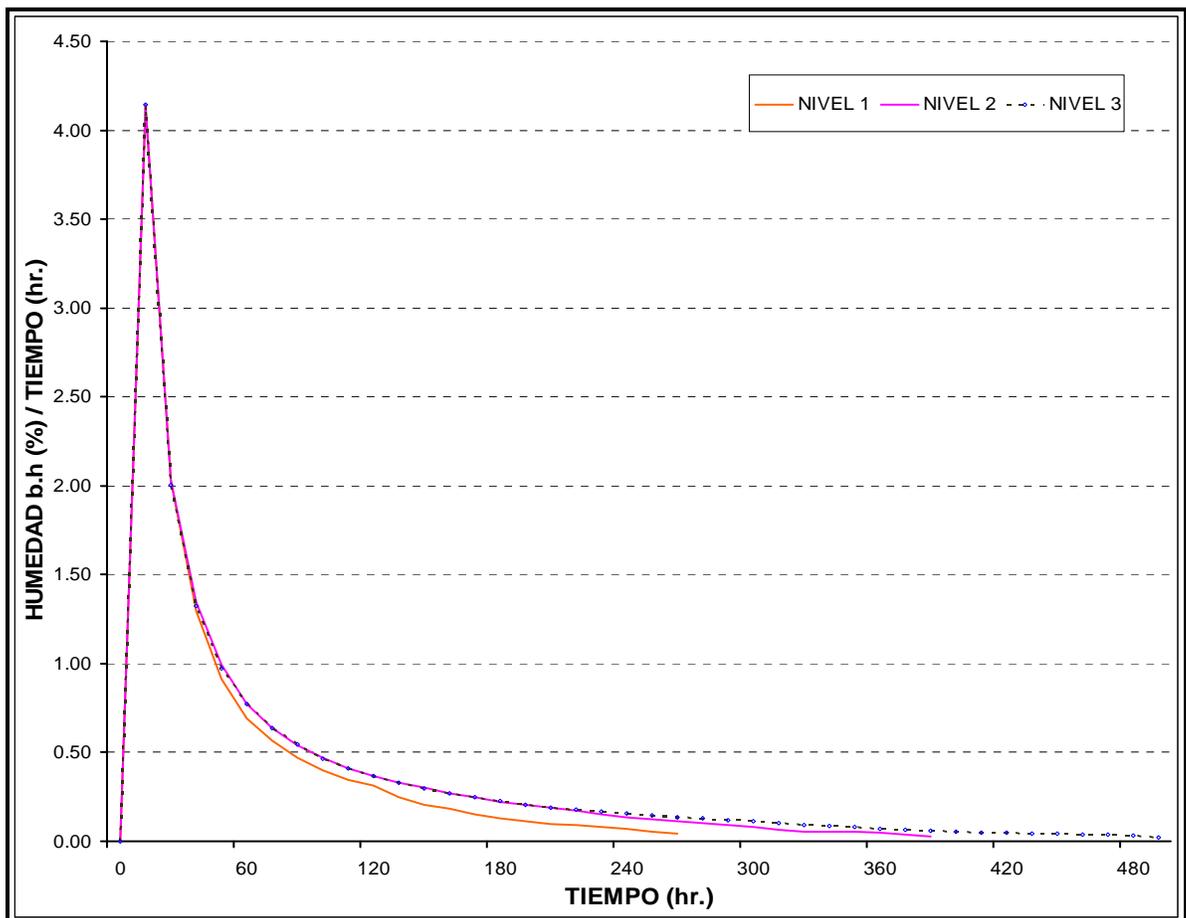
Tabla 13. Resultado análisis sensorial del café

Los resultados de la evaluación de secado de café, expresan sólo diferencia en tiempo de secado, en cuanto a calidad esta se conserva en todos los niveles del sistema con las mismas características sensoriales, sin dejar a un lado la realización del volteo diario del grano. Estableciendo así que el uso de estos sistemas para lograr una deshidratación óptima de café es apropiada para quienes lo deseen emplear. Este sistema es básicamente difundido en zonas de alta

pendiente donde la disponibilidad de espacio plano para la instalación de estructuras amplias es deficiente.

Una vez determinada la pérdida de humedad del producto en cada uno de los niveles, se calculó la velocidad de secado para las mismas muestras. A continuación se presenta la gráfica 4 donde se muestra la Velocidad - vs - Tiempo de secado.

VELOCIDAD DE SECADO DE CAFÉ PERGAMINO EN FUNCION DEL TIEMPO



GRAFICA 4 Velocidad de secado del café en función del tiempo para cada uno de los tres niveles del sistema modular.

En la gráfica 4 se observa que no hubo pérdida de humedad acelerada al inicio del secado, el ascenso de la curva indica la humedad en exceso presente en las muestras, o humedad de fácil extracción.

Al llegar al punto más alto de la gráfica, se observa el descenso de la velocidad indicando que la humedad superficial se ha eliminado, iniciando la extracción del agua interior del grano, y corresponde al contenido crítico de humedad libre. En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua; la superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir hasta que la misma queda seca en su totalidad (punto final de la curva de cada uno de los niveles).

Cuando la velocidad ha decaído totalmente el agua de la superficie del grano está totalmente evaporada y la velocidad depende de la transmisión de la humedad interior del grano a la superficie de este.

Por este motivo la velocidad al final del secado es más lenta, la extracción de la humedad es más difícil.

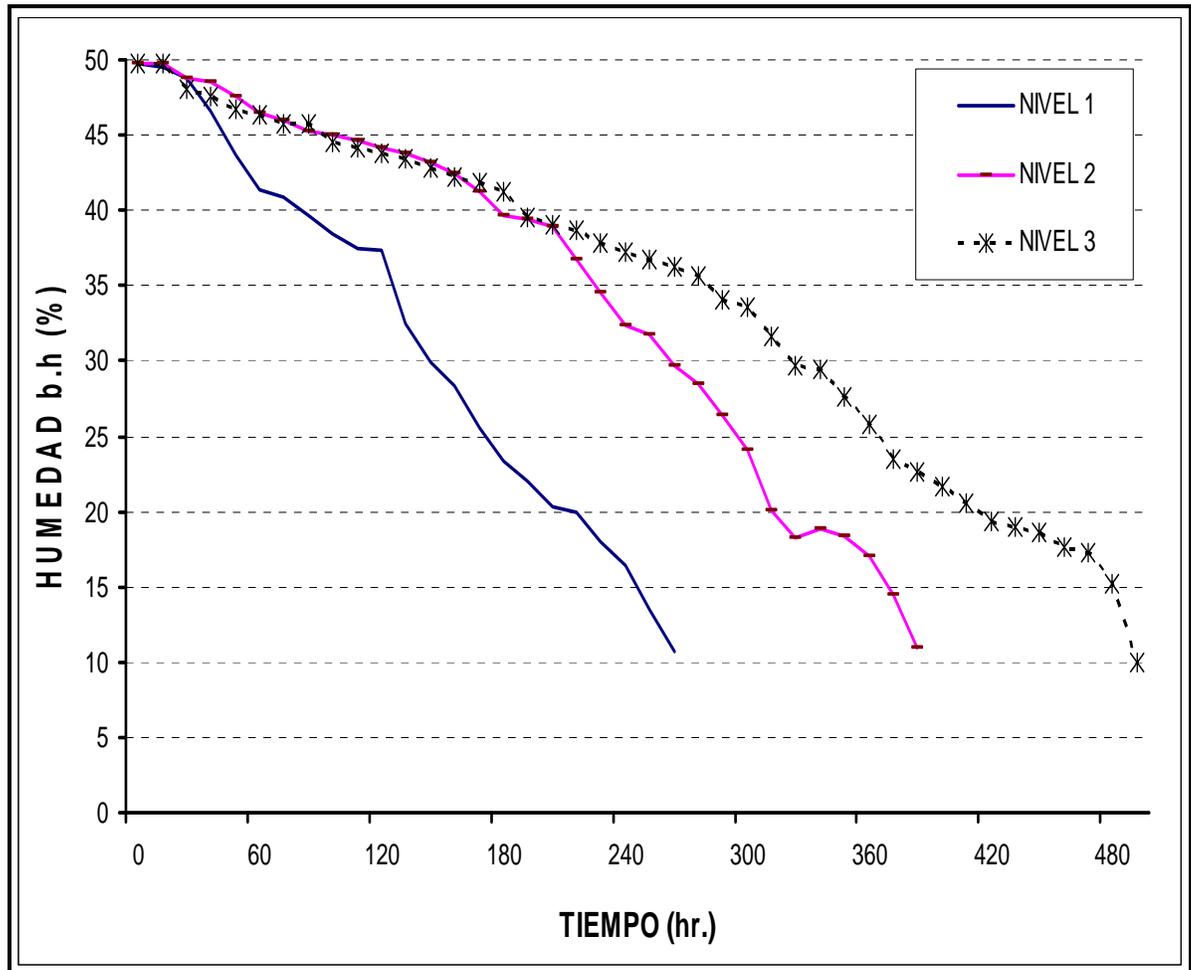
Según la gráfica 4 se observa que es mayor la velocidad de secado para el nivel 1 o superior, causado por la mayor cantidad de radiación solar que recibe, el incremento en la temperatura, y la humedad relativa, mientras que los otros dos niveles presentan una velocidad menor.

Los resultados demostraron que el sistema modular sería más eficiente si se realizara una apertura tipo cortina en la parte derecha de este, pues los datos expresaron que el bloque ubicado en dicha posición es el menos eficiente, presentó contenidos de humedad mayores con respecto a los otros niveles.

Además la presencia de un árbol que impide el ingreso de la radiación directamente al sistema, presentándose como obstáculo, reduce de esta manera la eficiencia del secado.

Es importante a la hora de instalación de estos dispositivos de secado observar la dirección del viento dominante y que no haya obstáculos entre la radiación solar y el sistema, lo ideal es que se encuentre a libre exposición del sol para aprovechar al máximo este calentamiento.

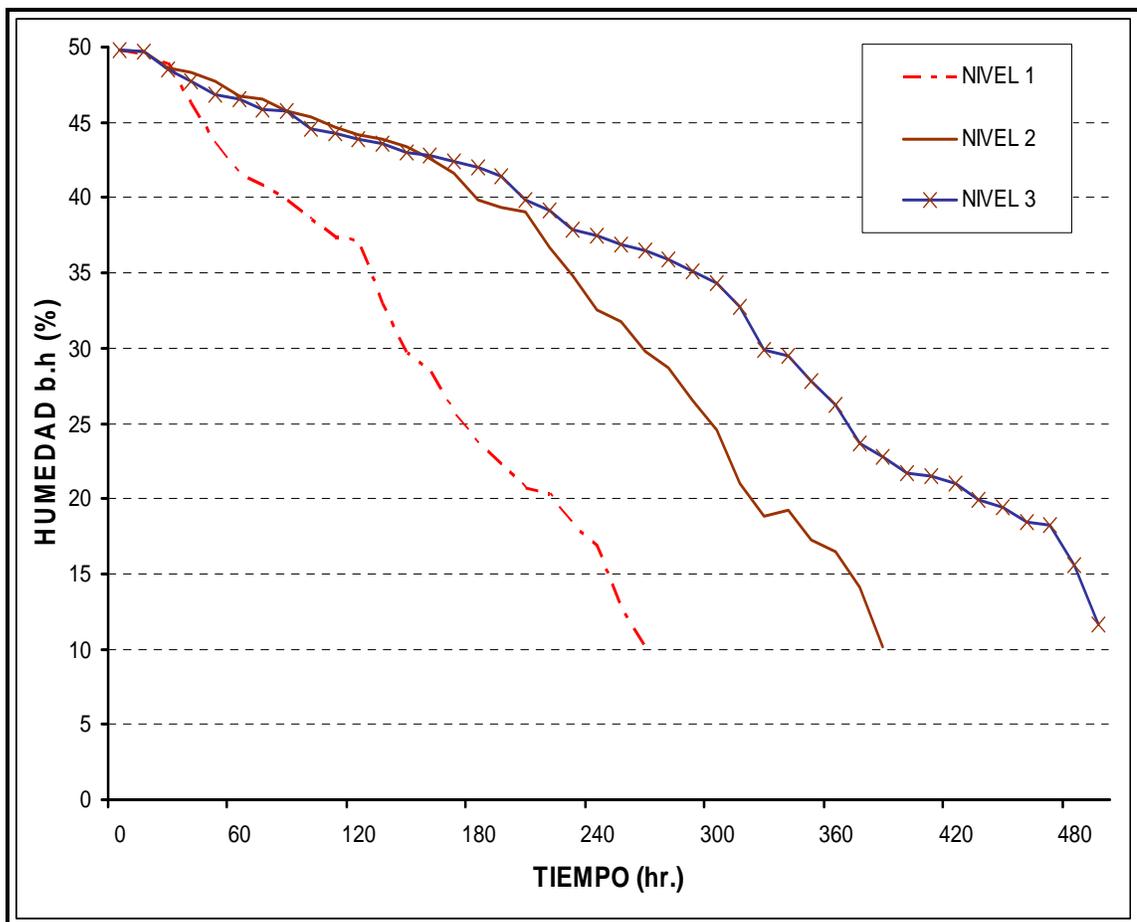
A continuación se muestran las gráficas 5 a 9 representando la pérdida de humedad de los granos de café para cada uno de los módulos del sistema.



GRAFICA 5. Contenido de humedad b.h del primer bloque

La gráfica 5 indica que inicialmente el secado para las muestras del nivel 2 y 3 son uniformes, mientras que para la muestra del nivel 1 es menor el secado, a las 264 horas de iniciado el secado ya se encontraba el café en el orden deseado (10% 12%). Mientras los niveles 2 y 3 se tardaron 384 y 492 respectivamente. Se corrobora que al exponer el café en las paseras superiores de los módulos, se obtiene un secado más rápido con respecto a los otros niveles del sistema.

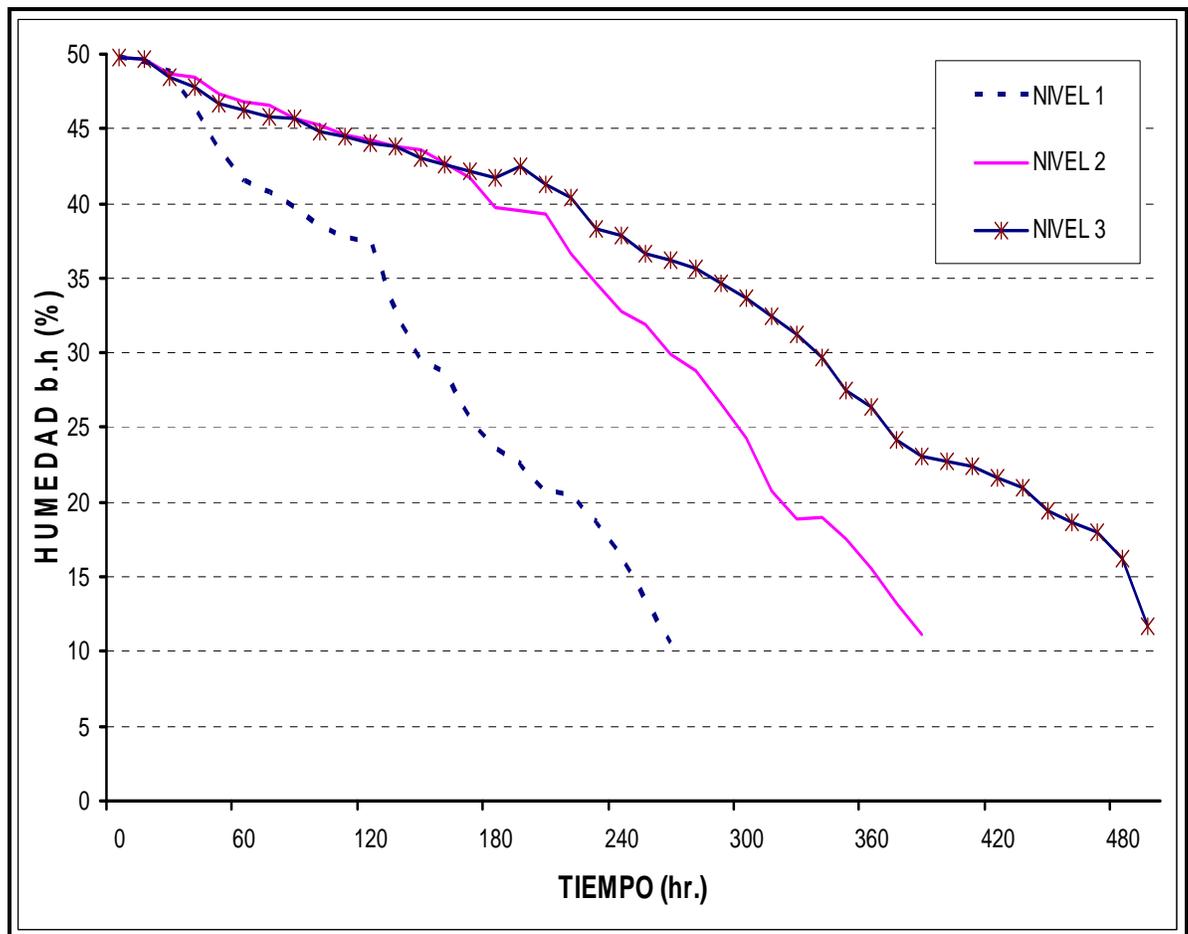
Para el nivel 2 entre la hora 324 y 336 del período de secado, se presentó un pequeño re-humedecimiento del grano, incrementándose en 0.7° C un valor no significativo. Sin embargo, el tercer nivel es el más prolongado en tiempo de exposición al sol, esto puede ser por el ingreso del aire con alto contenido de humedad durante la noche por la parte baja del sistema, pues al diseño se le dejó el plástico a una altura del piso de 40cm. También influye la vegetación presente en el suelo del secador, reduciendo la eficiencia del nivel.



GRAFICA 6. Contenido de humedad b.h del segundo bloque

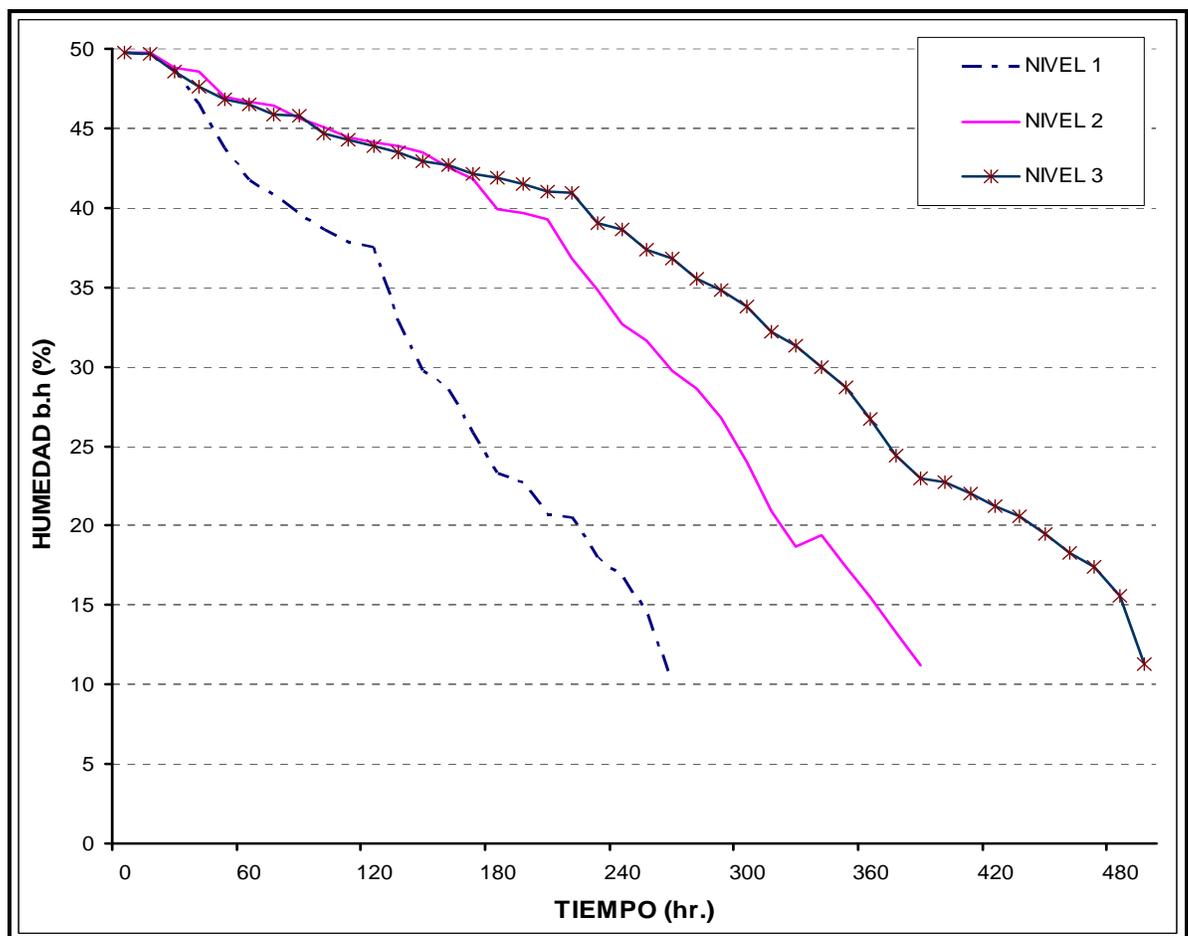
La gráfica 6 demuestra la pérdida de humedad de los 3 niveles del bloque dos, presentando una pérdida mayor en el contenido de humedad para el nivel uno o superior, debido a la mayor incidencia de la radiación solar y menor humedad relativa del aire de secado. Se continúa evidenciando que la pasera del nivel 1 presenta menor tiempo de exposición a la radiación solar (264 horas de secado).

Al igual que en la gráfica 5 se observa un pequeño re-humedecimiento del grano a la hora 324 de exposición a la radiación solar, un incremento de 0.4°C en el contenido de humedad inmediatamente anterior, es un valor que no altera en secado, pese a esto se continua normalmente con la deshidratación.



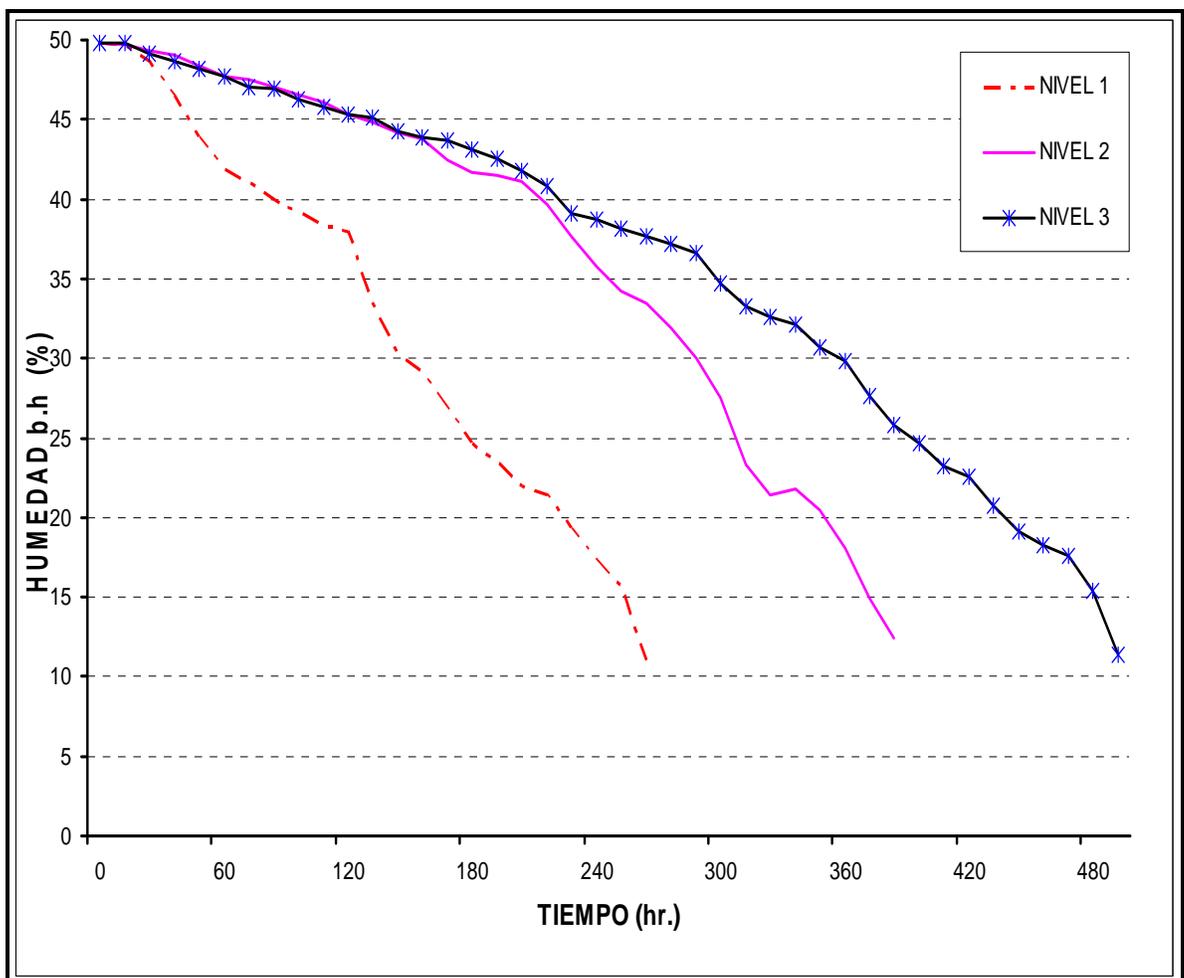
GRAFICA 7. Contenido de humedad b.h del tercer bloque

La gráfica 7 presenta un descenso de humedad mayor para el nivel superior del bloque, causado por la mayor recepción de radiación solar, y un menor descenso para el tercer nivel. Al igual que en las gráficas anteriores, se observa la presencia de re-humedecimiento del grano para las muestras del nivel 2 del módulo 3 del sistema, encontrado a la hora 324 como se vio anteriormente, sin embargo el incremento sigue siendo mínimo, un valor de 0.1°C que no altera el secado. A diferencia de los otros módulos, el nivel 3 presentó también una variación en el contenido de humedad, a la hora 180 la humedad tuvo un incremento de 0.8°C , al igual que el re-humedecimiento encontrado en las demás muestras no son valores significativos que causen inconvenientes en el secado y en la calidad del grano



GRAFICA 8. Contenido de humedad b.h del cuarto bloque

Se observa que el nivel uno sigue siendo el que tarda menos tiempo en el periodo de secado, y el inferior es el más prolongado en deshidratarse. Para los datos analizados se encontró nuevamente un re-humedecimiento de las muestras de la pasera del nivel 2 del modulo 4, un incremento de 0.7°C que no causa alteraciones en el secado. Se continúa ratificando que el nivel 1 del módulo presenta un periodo de secado menor con respecto a los niveles inferiores del sistema.



GRAFICA 9. Contenido de humedad b.h del quinto bloque

En la gráfica 8 se asevera que el nivel 1 al igual que para los módulos anteriores, es el que necesita menor tiempo de exposición a la radiación solar, se confirma que al presentarse más radiación solar directa, contribuye al secado y convierte en eficiente el nivel, obteniendo un secado deseado en 11 días.

La grafica 9 demuestra en cuanto a la variación de humedad se presentó el mismo fenómeno que en los módulos analizados anteriormente, a la hora 324 hubo un incremento de 0.4°C en el contenido de humedad del café, valores que no afectaron de ninguna manera el secado, son incrementos mínimos causados por la humedad relativa interna del sistema.

Se afirma que es muy importante para el secado solar recibir directamente la radiación sin agentes intermedios, que impidan una mayor eficiencia en el secado. En los datos se encontró que el módulo 5 ubicado en la posición sur-oriente (Ver figura 21) donde no hay presencia de cortina, este le resta eficiencia al secado, se encontró que el café depositado en este módulo durante el mismo tiempo de exposición al sol y bajo las mismas condiciones que los otros módulos, el café ubicado en este presenta valores de humedad mayores con respecto a los demás módulos; por lo cual se recomienda la apertura de una cortina móvil para contribuir con la circulación del aire y mejorar el secado en dicha posición. De igual manera el nivel 3 presentó el período de secado más prolongado con respecto a los demás niveles, afectado por la vegetación presente en el suelo y por el ingreso de aire con alto contenido de humedad relativa por los orificios bajos del diseño. (Ver figura 9) es complejo el empleo del secado solar de café a una altura de 1900 m.s.n.m donde se presenta radiación solar difusa la mayor parte del día y las condiciones ambientales no favorecen la labor. Sin embargo, este sistema se puede mejorar y convertirlo en un método más eficiente para restar tiempo en el secado sobre todo para los niveles 2 y 3.

CONCLUSIONES

El secador solar modular tipo capilla tiene una capacidad de secado de 3@ de café pergamino por pasera, para un total de 45@ (562.5 Kg.) para todo el sistema.

Es un sistema fácil de instalar y de construir que ocupa poca área en terreno y posee gran disponibilidad de área para secado. Las paseras modulares desarmables poseen movimiento vertical facilitando el manejo del café y comodidad para el cafetero, se guardan en épocas de no cosecha, para una mayor durabilidad.

La construcción del secador es fácil y económica con \$500.000, precios de 2008, más el costo de mano de obra no calificada se construye un secador solar modular de tres niveles.

Durante la evaluación realizada, en la vereda El placer, inspección de San Joaquín, municipio de Santa María, departamento del Huila, se obtuvo como temperaturas máximas y mínimas en el interior del secador, para cada una de las tres posiciones o niveles las siguientes: Nivel 1 temperatura mayor 40 °C, menor 18.2 °C, para el nivel 2 temperatura mayor 35 °C, menor 17 °C y para el nivel 3 la temperatura mayor 25 °C y menor 17 °C.

La humedad relativa más alta encontrada durante el proceso de secado fué del 91% y se encontró en el nivel inferior del sistema y la más baja fué del 26% encontrada en el nivel superior del secador.

La evaluación fué realizada en época de invierno y los tiempos de secado fueron los siguientes: Para el primer nivel 11 días, para el segundo 16 días y para el tercero 21 días, para una humedad en base húmeda promedio del 11%.

En la evaluación realizada se encontró una pérdida de humedad no constante, hubo variaciones en el contenido de humedad, las mediciones demostraron que la última medición del día con respecto a la primera del día siguiente era mayor, haciendo que el grano adquiriera un pequeño re-humedecimiento prolongando el proceso.

El sistema modular esta construido sobre una grama natural, la cual de alguna manera afecta el secado (retención de humedad de las raíces, respiración de las plantas, etc.). Son diversos los factores que pueden disminuir la eficiencia del secado. En este sentido, se debe mejorar el piso, que no haya aparición de especies vegetales que dificulten la concentración del calor en el interior del secadero, debe existir un material que no retenga humedad como lo hacen las plantas presentes en el superficie. Se recomienda realizar estudios con una superficie cubierta con grava u otro material que almacene el calor y así mejorar el funcionamiento del sistema y así mismo, el lugar de instalación del secadero debe ser de fácil drenado y evitar el ascenso del agua por capilaridad a través de la base del sistema.

El diseño modular multiniveles, es una herramienta útil para aquellos caficultores que deseen emplear este tipo de diseños y no posean terreno plano en la finca, puede instalarse sobre cualquier tipo de pendiente.

Dado el bajo costo en la construcción del sistema modular, cualquier caficultor de bajos recursos puede tener acceso a este sistema.

Con el uso de estos colectores solares, el grano no está expuesto a factores contaminantes y no hay que realizar labores de recolección de este en las noches, se deja depositado en las paseras hasta el final del proceso, sin dejar a un lado los volteos diarios que se deben hacer

RECOMENDACIONES

Se debe tratar de mejorar el uso de mallas metálicas para las paseras, emplear otro tipo de material que no afecte la calidad del grano, ya que este es depositado con un alto contenido de humedad lo cual genera oxidación de estas.

Se recomienda realizar un estudio monitoreando la pérdida de humedad y peso del grano en el periodo de secado con intervalos de tiempo cortos, ya que las condiciones a las que está expuesto el grano no permanecen constantes para poder establecer conclusiones precisas sobre estos cambios.

A la hora de realizar evaluaciones de estos dispositivos solares instalar un piranómetro en el lugar donde esta situado el secador, para obtener datos de radiación solar, para posteriores investigaciones.

A la hora de instalar estos secadores ubicarlos en un lugar donde no haya presencia de obstáculos entre la radiación solar y el sistema, que impidan el incremento en la temperatura del aire interior.

No permitir el ingreso de niños o animales al secador, que puedan contaminar el grano y causar daños al sistema, como puede ser la ruptura del plástico, deterioro a las paseras, etc.

Se recomienda la apertura de cortinas móviles en el sistema y así aumentar la eficiencia de secado, contribuyendo con la circulación del aire.

Realizar mínimo 8 volteos diarios al café, para lograr un secado de grano homogéneo.

MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION DE UN SECADERO MODULAR DE TRES NIVELES				
	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR TOTAL
ESTRUCTURA	Plástico Agrolen calibre 6 (8 Mt de ancho)	m	11	165.000
COLUMNAS	Guadua de 11 metros de largo	m	4	1.600
VIGAS	Guadua de 9 metros de largo	m	4	1.600
	Tablas de madera de 3 metros de largo	UNIDAD	3	5.000
CUBIERTA	Guadua de 10 metros de largo	m	3	1.200
PASERAS	Malla metálica 4x4	m	45	180.000
	Tablas de 0.01mt x 0.02mt x 3mt	m	11	40.000
SOPORTE PASERAS	Guadua de 10 metros de largo	m	6	2.400
ACEROS	Varilla roscada de 3/8 de pulgada	m	4	32.000
	Tuercas de 3/8 de pulgadas	UNIDAD	240	9.600
	Arandelas de 3/8 de pulgadas	UNIDAD	240	9.600
	Puntillas de 2 pulgadas	CAJA	2	2.000
TOTAL				450.000*

* Precios de agosto de 2008 Neiva. Los precios llevan IVA incluido.

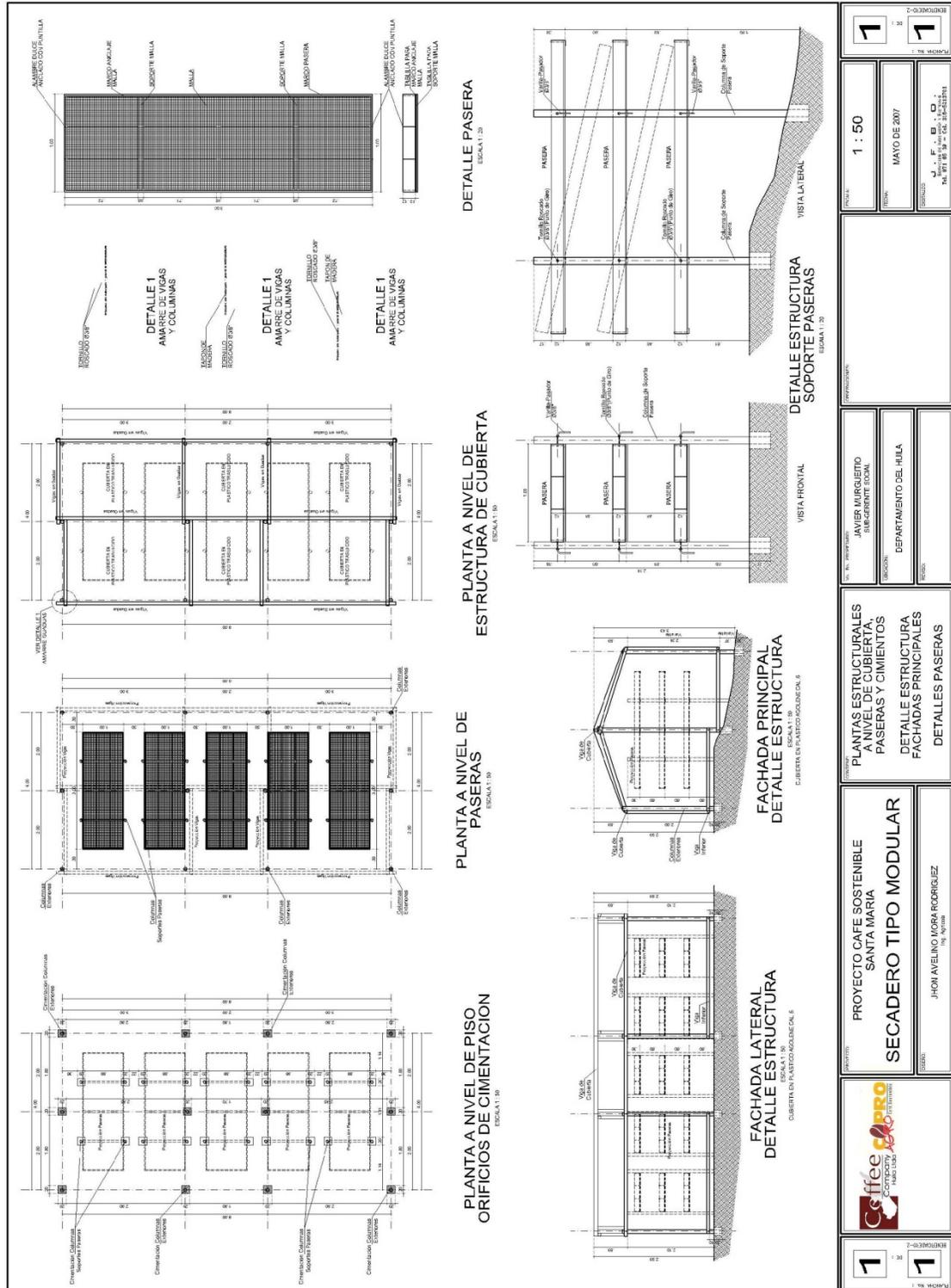


FIGURA 31. VISTA EN PLANTA SECADERO MODULAR

	PROYECTO CAFE SOSTENIBLE SANTA MARIA SECADERO TIPO MODULAR	JHON AVELINO VASCA RODRIGUEZ ALUMNO	PLANTAS ESTRUCTURALES A NIVEL DE CUBIERTA, PASERAS Y CIMENTOS DETALLE ESTRUCTURA FACHADAS PRINCIPALES DETALLES PASERAS	DEPARTAMENTO DEL HUILA	JAVIER MARGUETTO SUB-GERENTE LOCAL	ESCALA: 1:50	FECHA: MAYO DE 2007	TITULO:
						AUTORES:	DISEÑADO:	DIBUJADO:

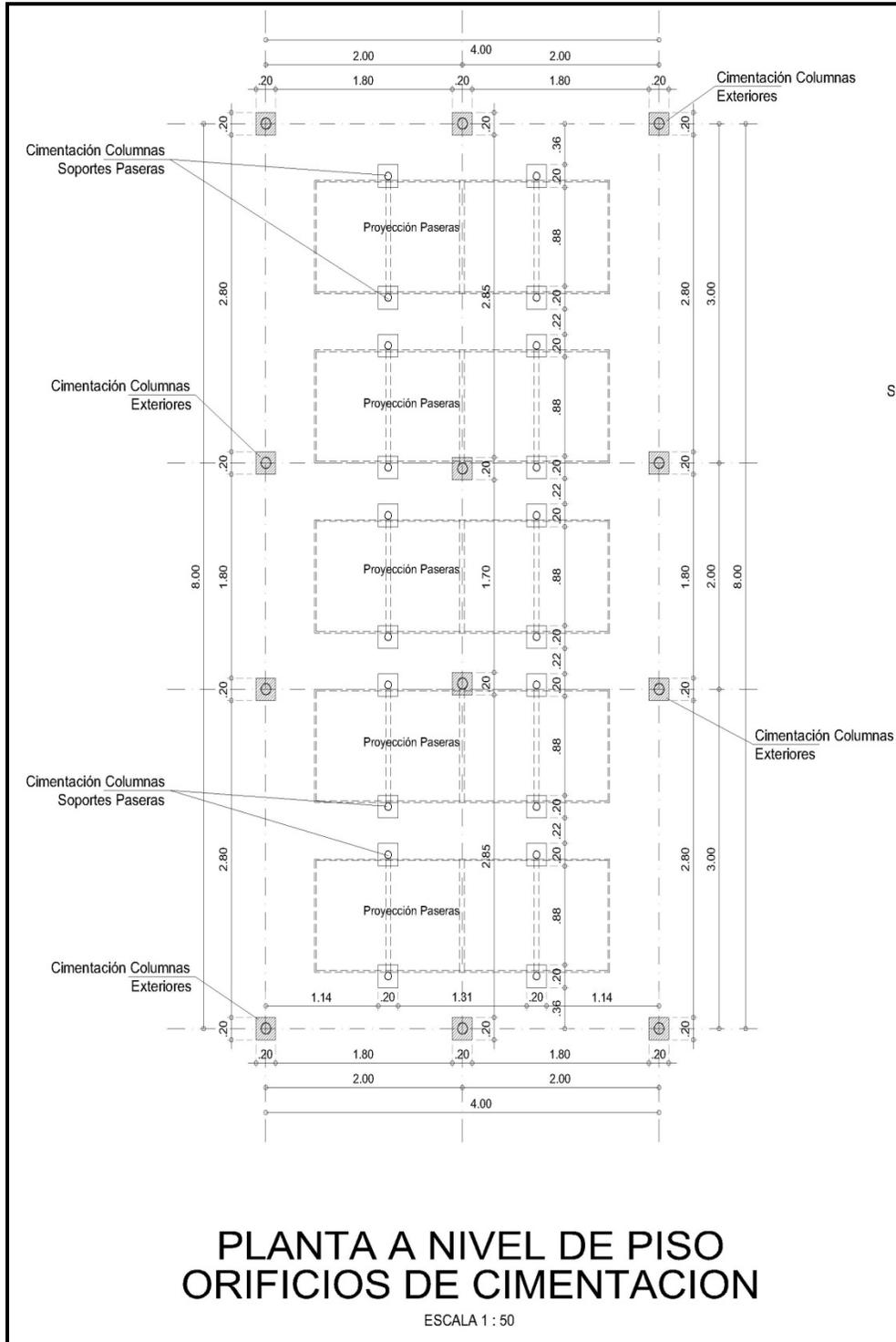


FIGURA 32. CIMENTACION

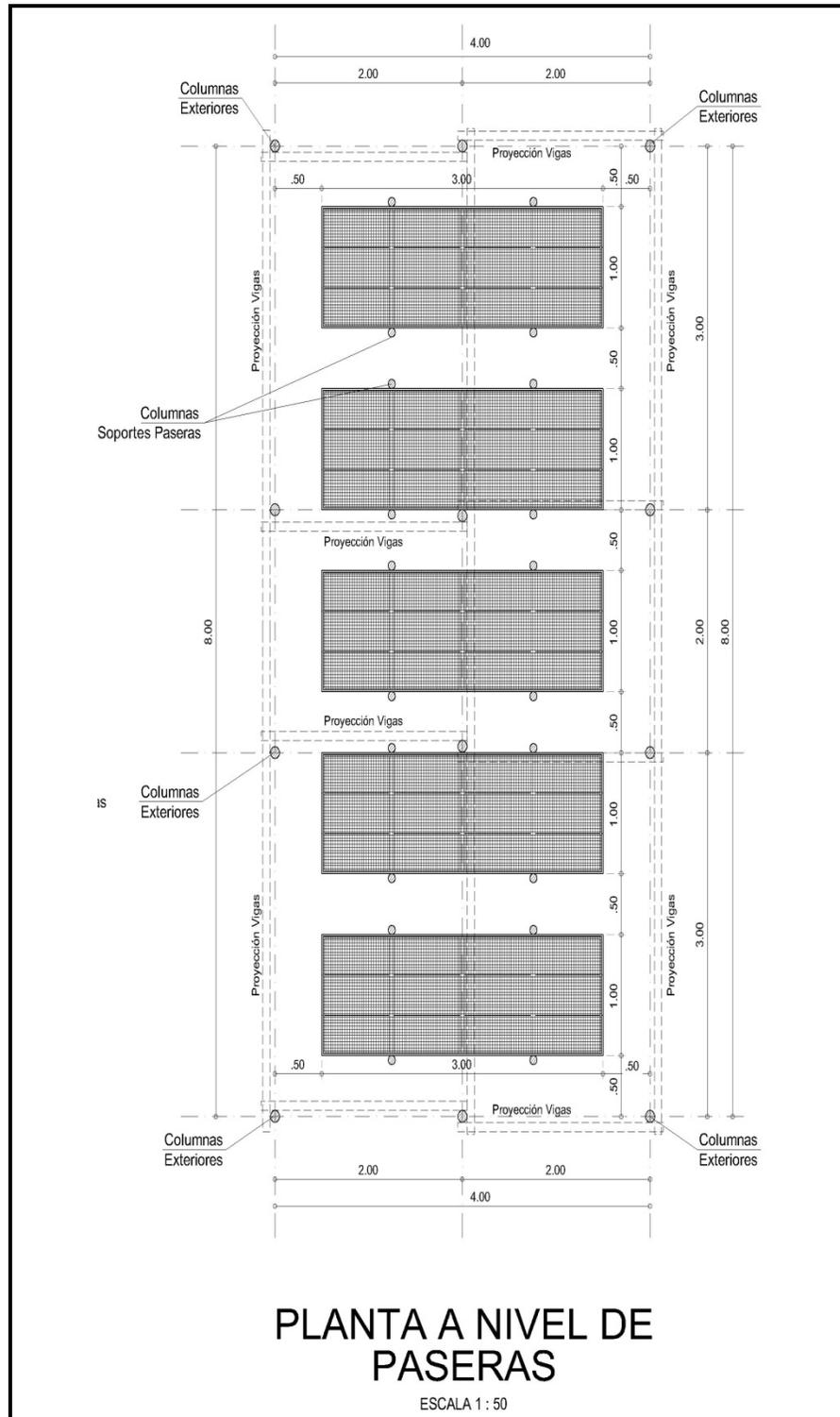


FIGURA 33. VISTA PASERAS

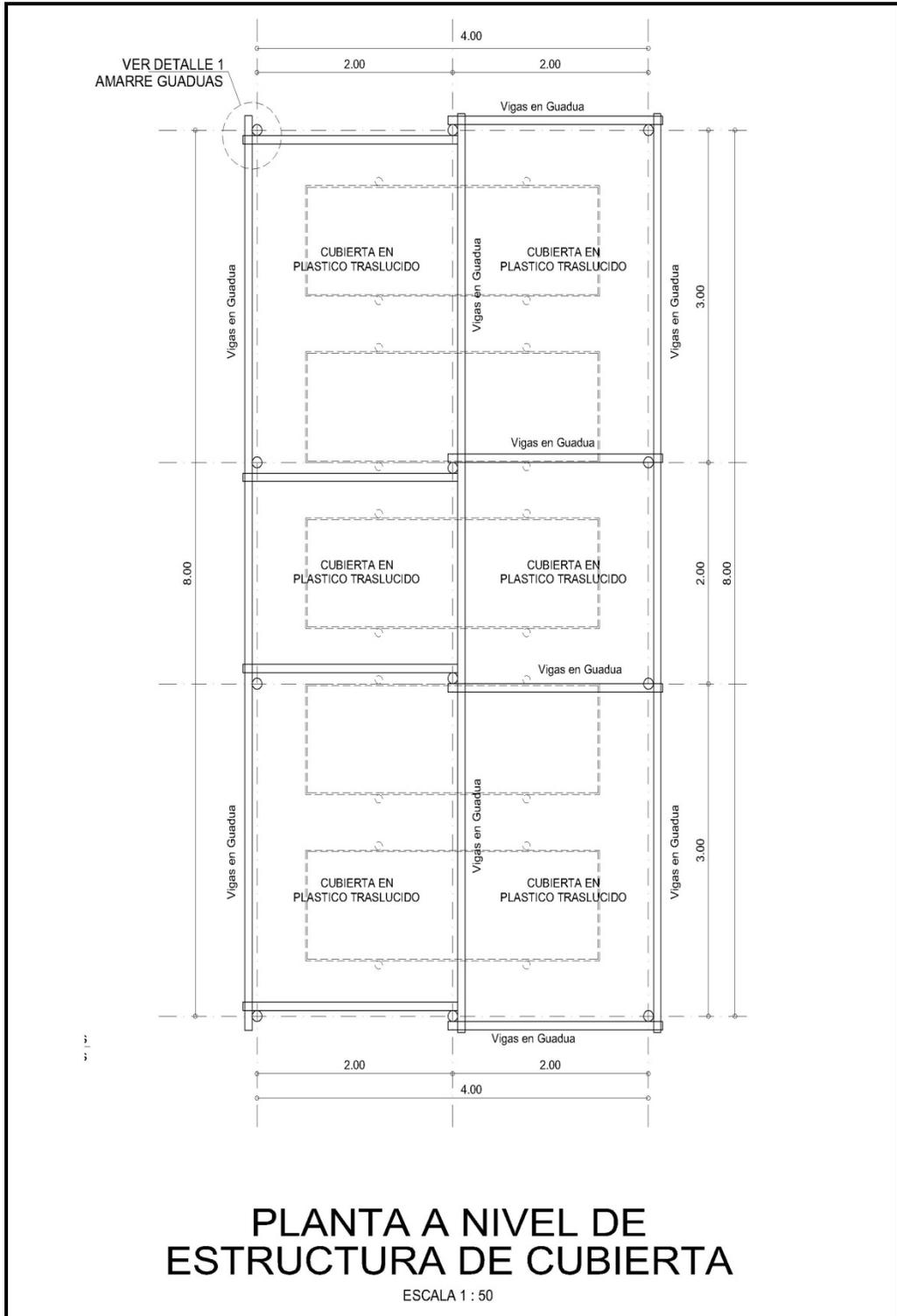


FIGURA 34. VISTA EN PLANTA CUBIERTA DEL SECADOR

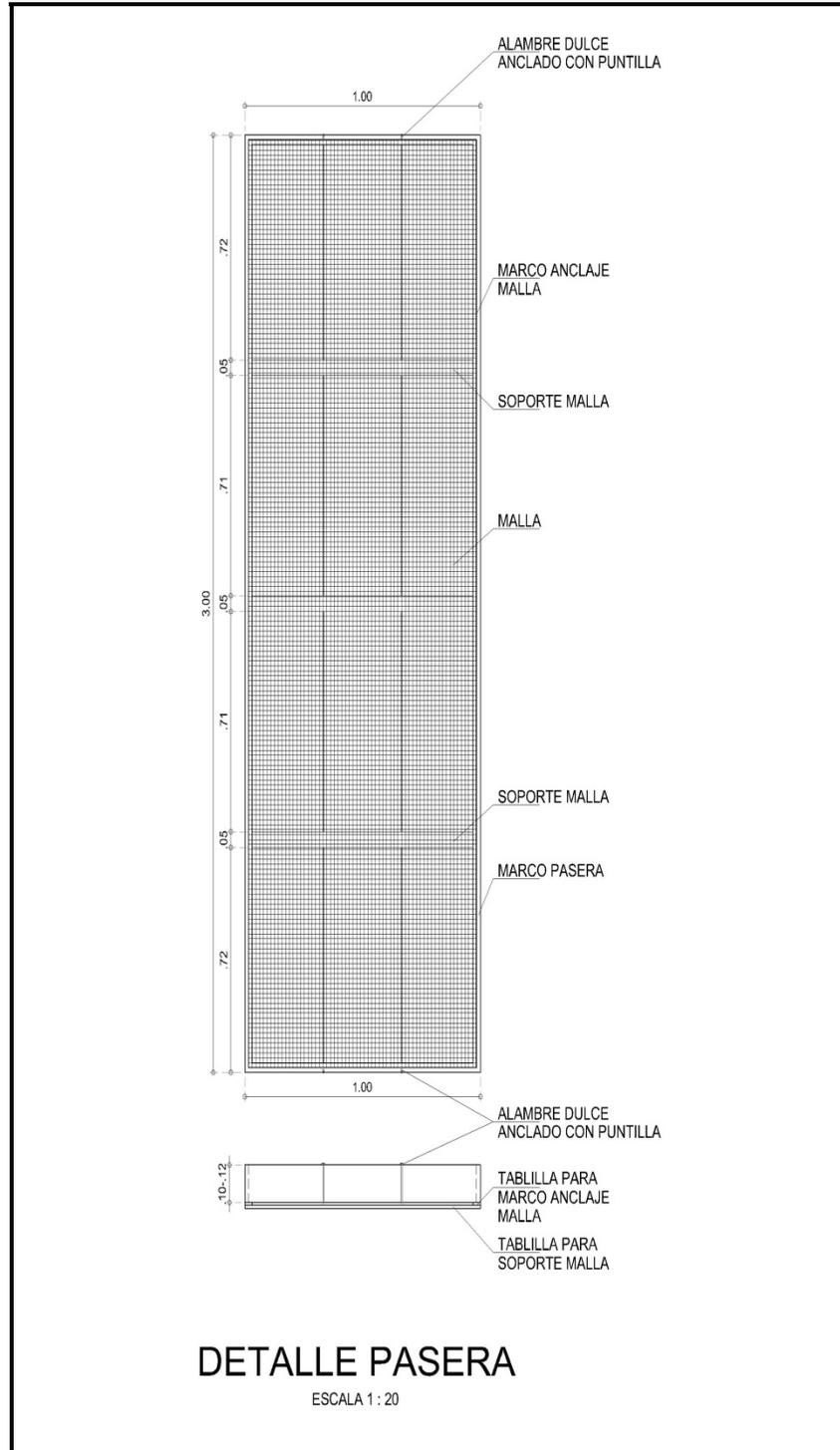


FIGURA 35. VISTA PASERA



FIGURA 36. VISTA FRONTAL SISTEMA MODULAR

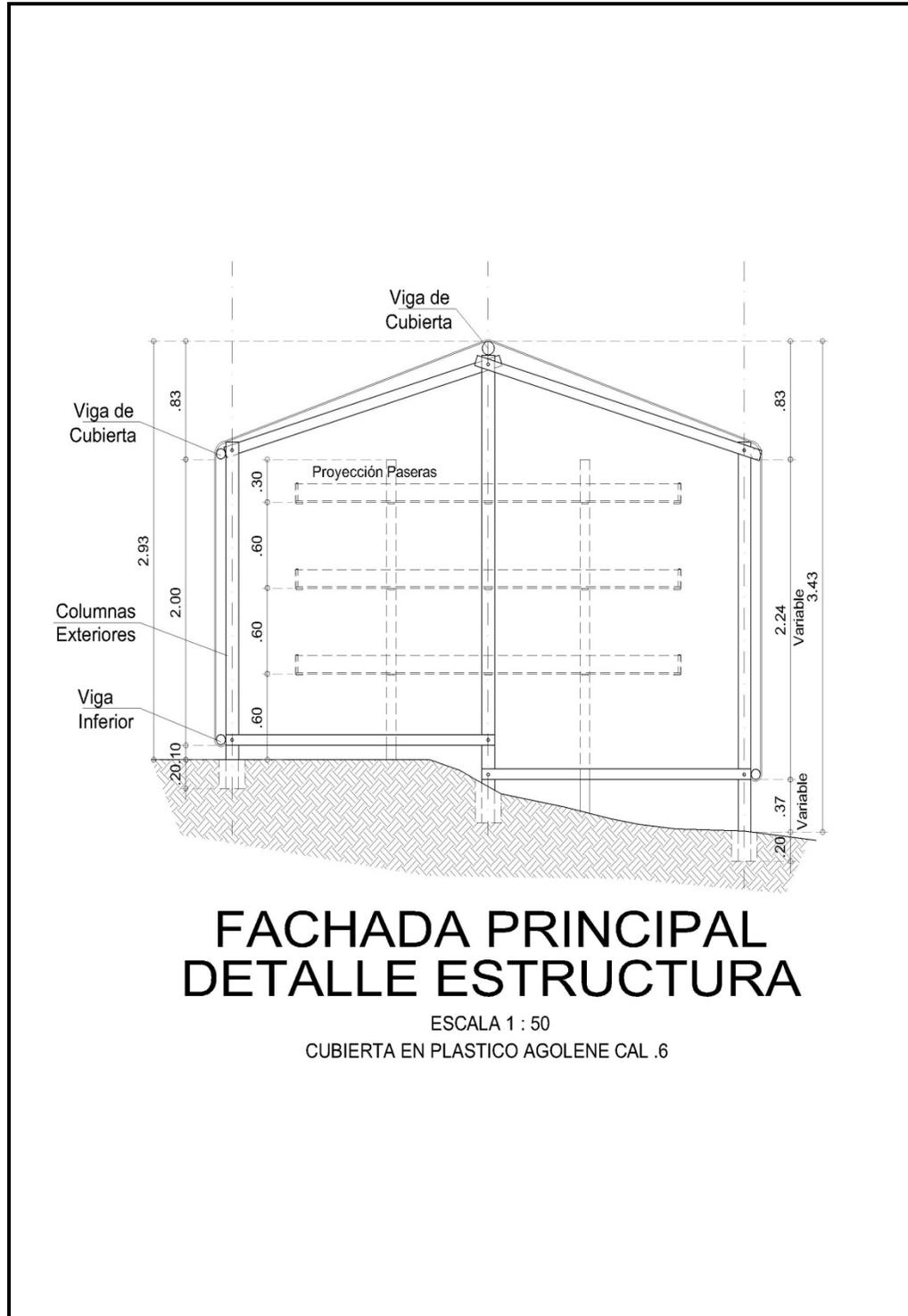


FIGURA 37. VISTA LATERAL SISTEMA MODULAR

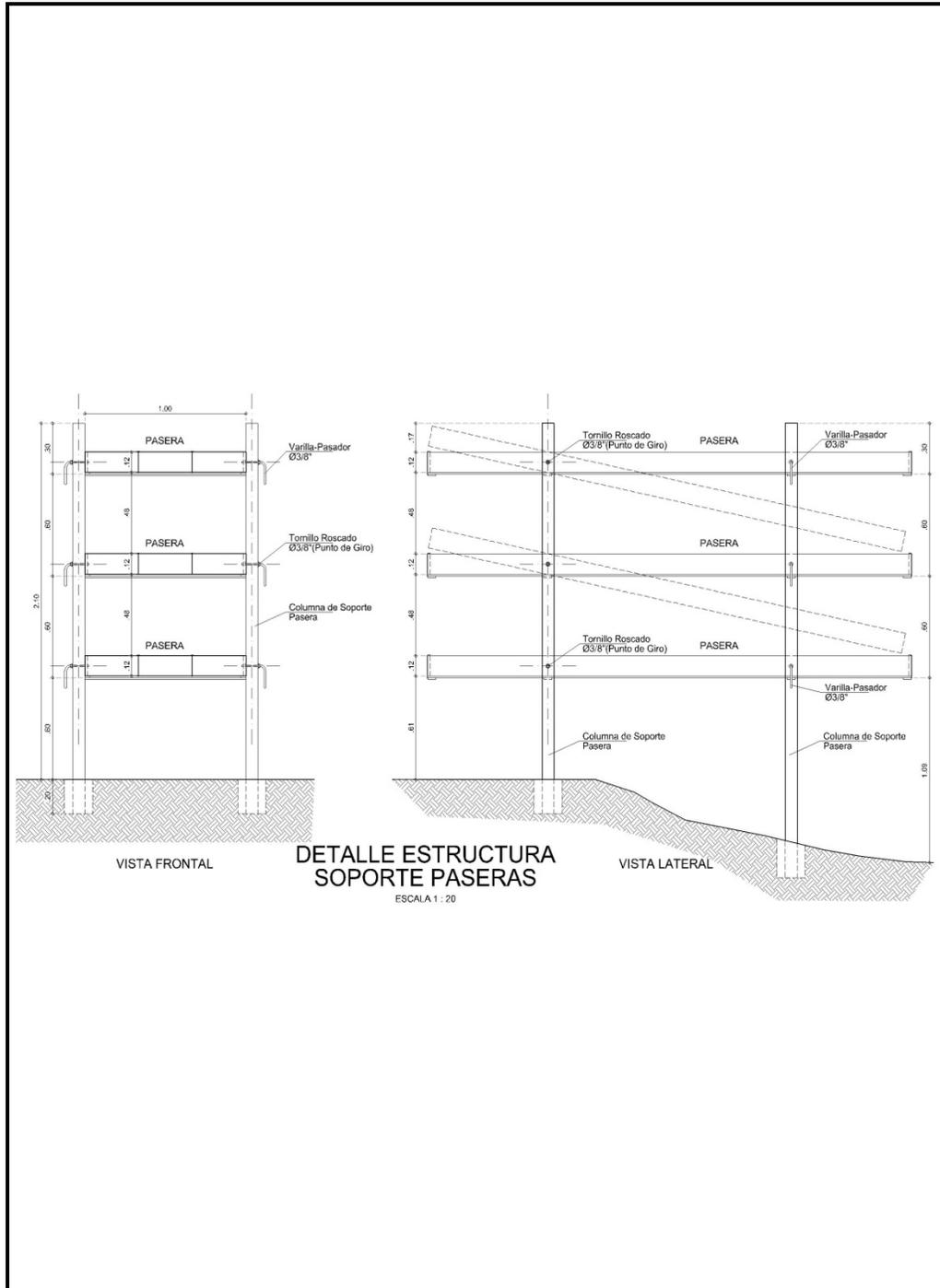


FIGURA 38. VISTA LATERAL Y FRONTAL SOPORTE PASERAS

BIBLIOGRAFIA

- ABDALA RODRIGUEZ, Jorge Luís, FONSECA FONSECA, Susana, PANTOJA ENRIQUEZ, Joel y GEN TORRES, Alonso [En línea]. Secado de café pergamino en secadores solares multipropósito y de tambor rotatorio: Tecnología química Vol. XXIII, No. 3, 2003 Centro de Investigaciones de Energía Solar. < <http://fc.uni.edu.pe/optica/secadosolares.html> > (Consulta: 9 Julio 2008).
- Association of Official Analytical Chemist. Official methods of analysis of A.O.A.C International. 13^a. ed. Washington D.C., 1980.
- CAMPO GOMEZ, José Luís y MIPAZ ORTEGA, Pedro. Evaluación y factibilidad de industrialización de un secador de granos por aire caliente forzado y radiación solar directa. Neiva 1994. Tesis. Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería. Programa Ingeniería Agrícola. 121 p.
- CASTILLO NIÑO, Álvaro. Acondicionamiento de granos: secamiento, almacenamiento y costos. Bogota (Colombia) 1980. p. 159. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Programa Nacional de Capacitación Agropecuaria.
- Centro Nacional de Investigación de Café. Avances Técnicos de Cenicafé Tomo I: Pérdidas causadas por el secado excesivo del café. Chinchiná, Caldas 1978. 161 p.

- Centro Nacional de Investigación de Café. Cartilla Cafetera Tomo II: Beneficio del café II. Cenicafé, 2004. 174 p. ISBN 958-97441-2-5.
- DELGADO María del Carmen; LEIVA, Guillermo y PERDIGON Zahymy. Familia de secadores solares secsol. 2001[En línea]. <<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia30/HTML/articulo02.htm>> (Consulta: 17 julio 2008).
- Entrevista con el Ingeniero Agrícola John Avelino Mora Rodríguez, Coordinador Proyecto Café Sostenible Santa María. Neiva, 10 de septiembre de 2008.
- Entrevista con el Ingeniero Agrícola José Miller Sánchez, Instructor SENA Centro de formación Agroindustrial. Área de construcciones rurales. Neiva, 18 de septiembre de 2008.
- FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA, CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ (CENICAFE). [En línea] Enfermedades y disturbios del café. <http://www.cenicafe.org/modules.php?name=Enfermedades_y_Disturbios_d_el_Cafe&lite=0> (Consulta: 5 agosto 2008)
- FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA, CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ (CENICAFE). [En línea] Variedades de café <http://www.cenicafe.org/modules.php?name=Variedades_de_Cafe&lite=0> (Consulta: 8 agosto 2008).

- FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA, CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ (CENICAFE). [En línea] Comportamiento del clima en la zona cafetera colombiana <<http://www.cenicafe.org/modules.php?name=News&file=categories&op=newindex&catid=3>> (Consulta: 9 agosto 2008).
- LOPEZ, Elkin. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 2006 [En línea] <http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092006000100003&script=sci_arttext> (Consulta: 8 octubre 2008).
- OROZCO, Carlos Alberto. LOAIZA, Fernando. [En línea] Calculo de flujo másico y caudal de aire para un ventilador utilizado en silos para secado de café. Vol. XIII, Nº 035. Universidad Tecnológica de Pereira 2007. <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/849/84903537.pdf>> (Consulta: 8 septiembre 2008).
- PASTRANA, Eduardo. Diseño de un colector para secado de productos agrícolas. Neiva 1983. Tesis. Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería. Programa Ingeniería Agrícola. 215 p.
- PEÑA GOMEZ, Anderson, GALINDO MURCIA, Alexander. [En línea] El café ecológico amazónico, alternativa sostenible para los campesinos. Revista agroecologica. Junio 2007. <http://latinoamerica.leisa.info/index.php?url=show-blob-html.tpl&p%5D=138084&p%5Ba_id%5D=211&p%5Ba_seq%5D=1> (Consulta: 5 agosto 2008).

- PINZON, Félix Eberto y PARRA ROJAS, Elías. Evaluación de un modelo de horno solar para secado de grano de café. Neiva 1987. Tesis. Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería. Programa Ingeniería Agrícola. 98 p.
- Programa regional poscosecha. Managua Nicaragua. [En línea] Secamiento de granos: Su importancia y las prácticas comunes. <www.postcosecha.net/fr/Home/document.php?itemID=1188&langID=3> (Consulta: 7 febrero 2009).
- VERRUETA, Víctor, LIMON, Fernando, FERNANDEZ, José y SOTO, Maria. [En línea] Participación campesina en el diseño y construcción de un secador solar para café. Volumen 37, febrero 2003. <<http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2003/ene-feb/art-10.pdf>> (Consulta: 5 agosto 2008).