CAPÍTULO 4

Secado del Café

SECADO DEL CAFÉ [41]

4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFÉ

El contenido de humedad del café cereza es de aproximadamente 67%, en base húmeda; lo cual significa que la cantidad de agua en las cerezas del café es aproximadamente igual a las dos terceras partes de la masa total; la tercera parte restante la constituyen los sólidos. El contenido de humedad del café cereza expresado en base seca es de 200% (dos veces más agua que materia seca). El fruto del café es altamente perecedero y presenta una intensa actividad fisiológica inmediatamente después de la cosecha. Para evitar la disminución de su peso seco y lo que es mucho peor, la pérdida de su calidad, que comienza a ocurrir después del primer día, se debe secar ojalá inmediatamente, después de cosechado.

El proceso más adecuado para disminuir la humedad del café consiste primero en retirarle la pulpa y el mucílago por medios rápidos; así se obtiene el **café pergamino húmedo** cuyo contenido de humedad es aproximadamente del 50% en base húmeda y el 100% en base seca. Con éste método (beneficio vía húmeda) se procesan los cafés suaves de mejor calidad en el mundo. Otro método (el de beneficio vía seca), consiste en iniciar directamente el proceso de secado a partir del café cereza; en éste, hay que retirar por medios térmicos aproximadamente el doble de la humedad (la relación de los dos contenidos de humedad expresadas en base seca) para obtener café almendra o café verde con 12% de humedad, en base húmeda.

La cantidad de agua que se retira en el secado del café pergamino es muy superior a la que se extrae en los cereales y leguminosas para obtener la misma cantidad de producto seco; por ejemplo, para secar maíz que se encuentra en el 20% de humedad y dejarlo en el 12%, hay que evaporar respectivamente 8,7 veces menos agua, en comparación con lo que ocurre en el proceso de evaporación para obtener café pergamino seco con el mismo valor del 12%.

En el caso del secado del café cereza la dificultad del proceso no sólo la constituye la mayor cantidad de agua por evaporar, sino que se trata de un producto de muy difícil manejo, que no es mecánicamente consistente y que pierde fácilmente la

[41] Preparado por Roa, M. G. y Álvarez G. J., Ingeniería Agrícola. Cenicafé.

pulpa, principalmente, si no se inicia el secado inmediatamente. Otro inconveniente se presenta con la obstrucción del paso uniforme del aire de secado, requisito indispensable para la buena calidad del producto final.

Esto ha llevado a los países que utilizan el proceso de vía seca a efectuar un presecado en secadores especiales o en patios de cemento "terreiros", o en silos "barcaças" (160) antes de llevarlos a los secadores mecánicos. En particular, en el secado al sol y si las condiciones atmosféricas no son ideales en los primeros dos días, se inicia el deterioro de la calidad del producto, observándose a menudo la proliferación de hongos en la superficie de las cerezas.

El **contenido de humedad** del café es un atributo de su calidad física. En Colombia las normas vigentes para la comercialización del café en pergamino (68) establecen que el contenido de humedad debe estar comprendido en el rango del 10 al 12% (b.h.) No es por azar que se recomienda este rango. En efecto, estos valores de humedad del grano corresponden, por las relaciones de equilibrio higroscópico o de equivalencias de presión de vapor en la superficie del grano y en el aire que lo rodea, a las condiciones ambientales medias de almacenamiento del café, como se puede apreciar en las curvas de humedad de equilibrio del café obtenidas en Cenicafé (173), (Figura 111).

La humedad es el factor individual de control más importante para la conservación adecuada de los granos. El valor del 12% de humedad corresponde al máximo valor bajo el cual se puede almacenar el café en condiciones ambientales, durante varios meses sin deterioro. Por encima de este valor las actividades fisiológicas de postcosecha como la respiración, se realizan con alta intensidad y para esto, el grano consume energía propia de su materia seca y se libera calor, lo cual se traduce en pérdida de peso, malas condiciones de almacenamiento y pérdida de la calidad del producto.

Adicionalmente, con valores de humedad del grano superiores al 12%, el aire intergranular adquiere niveles altos de **humedad relativa de equilibrio** por encima del 70%, por lo cual, la actividad de los microorganismos, especialmente hongos, mohos y bacterias se incrementa considerablemente contribuyendo al deterioro, a veces total, de la calidad del producto. Estos procesos de deterioro son más críticos en regiones de clima cálido.

4.2. DETERMINADOR DE HUMEDAD CENICAFÉ MH-2

Durante todos los tiempos y en todos los lugares se ha estudiado la eficiencia de distintos instrumentos para determinar la humedad y sus aplicaciones en el secado de los granos, profundamente (82).

A pesar de esto, los caficultores de casi todo el mundo se guían por métodos subjetivos para determinar el contenido de humedad de su producto, principalmen-

te cuando se está secando. Para ello se utiliza la observación del color de la almendra y de su dureza, ejerciendo presión con las uñas, los dientes o el filo de una navaja. Estos métodos normalmente generan resultados erróneos lo cual se concluye de los estudios de una encuesta efectuada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (37).

En efecto, de 623 muestras de café pergamino beneficiadas en igual número de fincas, el 25% tenían menos del 10% de humedad y el 13% tenían más del 12%, o sea que sumando los dos extremos de defecto y de exceso de humedad, el 38% de las muestras no poseían el contenido de humedad final adecuado, lo que trae perjuicios para todos; inicialmente para el caficultor que tiene problemas con la comercialización del grano y la pérdida de su calidad, pero principalmente para el país productor que ve deteriorada la calidad de uno de sus principales productos de exportación.

Se requiere de un determinador de humedad, que por su precisión y su precio pudiera ser utilizado en la finca cafetera, para poder conducir bien el proceso del secado, y además, como se verá en la sección 5.5.1. para hacer parte de una tecnología (CERPER) de estimación rápida del rendimiento del café cereza a café pergamino Tipo Federación.

En Cenicafé se desarrolló un medidor de humedad rústico, de bajo costo, con precisión de ± 1,0% en base húmeda y de fácil operación. Fue denominado medidor de humedad CENICAFÉ MH-2 (118, 120) (Figuras 86, 87 y 119), cuyo principio de funcionamiento está basado en el método estándar de destilación de Brown-Duvel (82).

Consta de un recipiente para la mezcla café-aceite, un condensador compuesto por un tubo de cobre de 9,53mm de diámetro y de 25cm de longitud, doblado en forma de L invertida, y una resistencia eléctrica de 550W. Además, de un depósito de

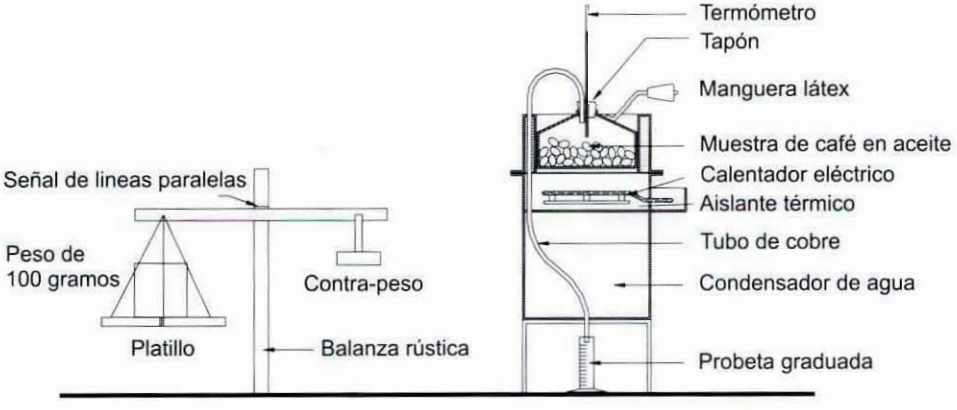

Figura 86. Esquema del determinador de Humedad CENICAFÉ MH-2.

agua con capacidad de 2,7L, un tapón de caucho para la boca del recipiente y una manguera de látex para conducir el vapor desde el recipiente hasta el condensador. Para reducir el calentamiento del agua del tanque condensador, se colocaron dos placas de asbesto-cemento de 15cm de diámetro y 3,5mm de espesor, entre la resistencia eléctrica y el condensador. Una balanza rústica de plato para pesar 100g de café, y un termómetro de mercurio de rango entre 0 y 250°C que mide la temperatura máxima a la que debe llegar la mezcla grano-agua y una probeta graduable de 25ml. En pruebas de laboratorio la precisión lograda con el determinador de humedad en el rango de 10% a 47% fue de 0,51% b.h., y se obtuvo un error estándar de ± 1,0% b.h. Como resultado de su evaluación en el campo se le incorporó un dispositivo para proteger el termómetro.

El procedimiento para utilizar el medidor MH-2, consiste en pesar una muestra de 100g y colocarla en el recipiente con aceite vegetal, calentar la mezcla hasta que alcance el valor de 193°C, medidos con el termómetro de bulbo de mercurio convencional. El calor transferido del aceite a los granos permite evaporar toda el agua que se condensa y se mide en una probeta graduada. Es necesario dejar transcurrir un tiempo aproximado de 10 minutos, desde que se interrumpe la corriente eléctrica hasta que se termina el proceso de destilación del agua. Durante este lapso, la temperatura del termómetro baja aproximadamente hasta 150°C. El valor de la medida expresada en mililitros coincide (la densidad del destilado es de 1,0g/cm^3) con el contenido de humedad expresado en porcentaje, en base húmeda.

En la evaluación respectiva (120) del medidor CENICAFÉ MH-2, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Permite determinar con facilidad, en la finca, la humedad del café pergamino sometido a secado, con una precisión de mas ó menos 1% b.h., comparado con el método de la estufa y requiere veinte minutos para obtener la lectura.
- Puede usarse con precisión en todo el rango del contenido de humedad del café pergamino 10% a 55% b.h., lo que no es posible con los determinadores indirectos, que funcionan con base a las propiedades dieléctricas.
- Es ligeramente inferior en su precisión al medidor indirecto marca KAPPA, útil solo para contenidos bajos de humedad 10 a 28% b.h. de café en reposo (fuera del contacto con el aire de secado por lo menos durante 10 horas), pero su costo es aproximadamente 10 veces menor.
- La temperatura máxima a que llega la mezcla de aceite y café pergamino influye significativamente en la precisión del medidor CENICAFÉ, que se debe desconectar de la corriente eléctrica cuando la mezcla alcance 193°C.
- La mayor precisión del medidor de humedad CENICAFÉ MH-2, se obtuvo en el rango de 10 a 20% b.h., por tanto, se puede utilizar el equipo para controlar eficazmente el proceso de secado mecánico de café.

- Su utilización potencial en la finca es múltiple; en particular, es elemento básico para la conformación del método rápido (CERPER) de determinación de la relación café cereza a café pergamino. (Sección 5.5.1.).

4.3. EVALUACIÓN DE LOS MEDIDORES COMERCIALES DE HUMEDAD

La firma DIES Ltda. de Medellín construyó los determinadores de humedad MH-2 con base en los planos de Cenicafé. Se evaluaron 5 medidores MH-2 (Figura 87), en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma (CBEA) en 1995.

Se realizaron 66 ensayos con cinco repeticiones cada uno; se utilizaron muestras de café pergamino húmedo de 100g, obtenidas en balanza con precisión de 0,1g, con humedad comprendida entre 48 y 55% b.h. correspondiente al contenido inicial de humedad del café pergamino seco. Las muestras se colocaron en el recipiente del medidor y se mezclaron con aceite vegetal hasta que fueran cubiertas totalmente. Se conectaron los medidores a la red eléctrica y se observó la evolución de la temperatura de la mezcla hasta alcanzar el límite establecido de 193°C, momento en el cual se suspendió el flujo eléctrico. De cada una de las muestras sometidas a la determinación de humedad en el medidor se tomó otra muestra, a la cual se le determinó la humedad con el método estándar de la estufa a 105°C, durante 16 horas.

En la Tabla 45 se presentan los resultados obtenidos en los cinco medidores construidos por DIES Ltda., comparados con la estufa.

Al analizar los contenidos de humedad obtenidos de los medidores MH-2 evaluados se encontró que, en promedio, tenían 52,8% b.h., con un coeficiente de variación de 2,7% en un intervalo (52,3%-53,3%) confiable al 95%, mientras que con la estufa se obtenía un promedio de 52,5% en un intervalo de (52,2%-52,9%) y un coeficiente de variación de 3,2%.

Figura 87. Banco de ocho determinadores de humedad CENICAFÉ MH-2 para control del café recibido y secado en la CBEA. (Sección 3.19.).

Tabla 45. Contenidos de humedad de muestras de café pergamino húmedo obtenidos en la estufa y en cinco determinadores de humedad MH-2. Se incluyen los límites de confianza para el promedio al 5%.

Medidores	Promedio %	Limite inferior %	Limite Superior %
MH2-1	52,44	51,92	52,97
MH2-2	52,36	51,97	52,72
MH2-3	53,17	52,58	53,75
MH2-4	53,08	52,44	53,72
MH2-4	53,16	52,59	53,73
Promedio	52,84	52,30	53,40
Estufa	52,55	52,18	52,93

De los resultados de la Tabla 45 se concluyó que los promedios obtenidos con los dos métodos fueron estadísticamente iguales; todos los medidores evaluados se enmarcan en el rango de **precisión** de mas o menos 1% b.h.

Para las correlaciones entre los medidores MH2-3, MH2-4 y MH2-5 y la estufa, el coeficiente de determinación r^2, es superior a 0,99, significativo al nivel del 1%, lo cual muestra la estrecha relación en sus lecturas de contenido de humedad. Se recomienda por tanto la utilización de los medidores en el control del secado y para la determinación de la materia seca del grano cuando se aplica el método CERPER (Sección 5.5.1.).

El estudio permitió concluir que:

- El determinador de humedad CENICAFÉ MH-2 puede utilizarse en un amplio rango de contenidos de humedad del grano de café (10- 55% b.h.).
- Permite hallar el rendimiento del café en forma precisa, aún bajo condiciones de grano brocado.
- Determina el contenido de humedad del grano de café en cualquier tipo de explotación pequeña, mediana, grande y en centrales de beneficio.
- El equipo es adecuado para ser utilizado por el caficultor.

4.4. DETERMINADORES Y MEDIDORES INDIRECTOS DE HUMEDAD

Los métodos indirectos para determinar el contenido de humedad del café, como su nombre lo indica, miden una propiedad del grano que varía con su contenido de humedad. Las propiedades más estudiadas, que han permitido desarrollar medidores de humedad de amplia utilización, son la conductividad eléctrica y la capacidad dieléctrica.

En Colombia se utilizan los medidores del tipo capacitivo, que estiman la humedad con base en las propiedades dieléctricas de los granos, para el recibo del café en

pergamino en los puestos de compra establecidos por ALMACAFE. Posada, citado por Oliveros *et al.* (120), al comparar las lecturas de humedad obtenidas con los medidores de éste tipo marca KAPPA y Dole con el método de estufa propuesto por la ISO para café trillado, que había estado almacenado, concluyó que los medidores KAPPA muestran buena precisión en las lecturas en el rango de 8 a 18% b.h. El medidor Dole posee baja sensibilidad para humedades inferiores al 10% b.h.

Por mucho tiempo se ha buscado una solución práctica para la medición utilizando métodos indirectos basados en propiedades del producto, los cuales permitan la medición de la humedad en pocos segundos y que no destruyan la muestra, cuando se está secando el café, y así poder finalizar correctamente esta importante etapa del proceso de beneficio.

El determinador de humedad electrónico indirecto es el instrumento de medición más popular en Colombia, y es usado para medir la humedad de café seco y reposado, pero es de reconocida inhabilidad para determinar correctamente la humedad del café pergamino cuando se está secando o para contenidos de humedades superiores al 30%, b.h. En efecto, los determinadores de humedad que basan su principio de determinación en las propiedades dieléctricas del café fallan por defecto, al medir principalmente la **humedad de la superficie** de los granos. Éstos, miden principalmente la humedad cercana a la superficie de los granos que presenta valores más bajos que el promedio, según el principio de difusión de humedad del café dentro del grano (Sección 4.5.) que controla el proceso del secado (28, 82). Tampoco ha sido posible desarrollar determinadores de humedad indirectos que den resultados correctos cuando el contenido de humedad es superior al 30% en base húmeda. Recientemente otro determinador que utiliza este mismo principio físico, propuesto por la industria IEC, propuso diseños más avanzados, para corregir las dificultades anotadas en las mediciones.

Se programaron experimentos para comparar las medidas de estos dos determinadores de humedad y se compararon con los valores obtenidos con la estufa a 105°C, durante 16 horas[42].

Se analizaron 20 muestras de café proveniente de silos-secadores comerciales y los resultados se presentan en la Figura 88, que muestra como el determinador IEC presentó los mismo defectos que el KAPPA al subestimar significativamente el valor real del contenido de humedad determinado por la estufa, en todo el rango de humedad estudiado.

Es importante reconocer el gran valor del determinador de humedad CENICAFÉ MH-2, evaluado exhaustivamente para altos y bajos valores de humedad, con muestras de café obtenidas directamente durante el proceso de secado, para secadores solares, mecánicos de capa fija y mecánicos de grano en continuo movimiento.

[42] Roa M., G. Comunicación personal. 1995.

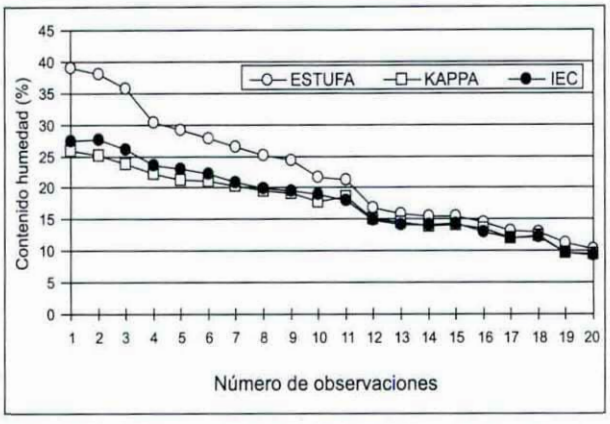

Figura 88. Comparación de dos medidores indirectos de humedad con relación al método estándar de la estufa.

4.5. DIFUSIÓN DE HUMEDAD DENTRO DEL GRANO DE CAFÉ.

Durante el proceso de secado mecánico del café pergamino, todos los granos ceden la mayor parte de la humedad al aire caliente que es forzado a pasar entre ellos; inicialmente la humedad de la superficie del grano se transfiere fácilmente al aire y en la medida que transcurre el proceso de secado se inicia una migración de agua de la parte interna del grano a la más externa, para sustituir la humedad perdida en la superficie. Este fenómeno de movimiento de la humedad dentro del grano se denomina **difusión** (28, 107). Clásicamente se distinguen dos períodos de secado: el inicial, donde la resistencia a la pérdida de humedad se da en la superficie, y el final, cuando la resistencia se ofrece dentro del grano. En la primera fase el coeficiente de transferencia de masa por convección determina las tasas de secado; en la segunda fase, que es la más prolongada para el caso del café, el coeficiente de difusión de humedad del grano del café (107), o la resistencia al paso del agua en el interior del grano, es el determinante.

Como resultado de la difusión los contenidos de humedad dentro de cada grano durante el secado son diferentes, mucho más altos en el interior y menores en la superficie. A medida que disminuye la humedad del grano la difusión del agua tiende a ser más lenta y la forma de aumentarla es incrementando su temperatura. El aumento de la temperatura origina una mayor presión de vapor del agua (que es la variable que junto con el coeficiente de difusión del grano determina directamente las tasas de pérdida de agua de los granos.

El aumento de la temperatura de los granos, a medida que progresa el secado, ocurre naturalmente porque cuando hay menos humedad, tienden a presentarse menores tasas de secado y menos enfriamiento por evaporación.

En la Sección 4. 9.1.3., se presentan, con algún detalle, las ecuaciones reales de difusión y las ecuaciones aproximadas empleadas en la simulación matemática.

4.6. SECADO SOLAR

4.6.1. El Secador Solar Rotatorio

El secado solar se practica desde el mismo momento en que se inició la producción de café y todavía se utiliza básicamente el mismo procedimiento; no se espera que el método tradicional de secado del café varíe substancialmente en el futuro, porque el aprovechamiento de la energía disponible (la radiación solar incidente y la energía propia del aire) es muy aceptable y los costos de los equipos utilizados son razonablemente bajos, principalmente para los pequeños productores.

Los intercambios de energía y de humedad toman lugar en la superficie de los granos; aquellos localizados en la parte inferior, en contacto con la superficie, prácticamente permanecen en el mismo estado de humedad porque no reciben la energía térmica necesaria para la evaporación del agua. Por tanto, es necesario revolver la masa; se recomienda hacer tres o cuatro movimientos del café por día. Tradicionalmente se utiliza un rastrillo de madera (Figura 93) sencillo para efectuar dicha operación.

Los granos que se someten al secado solar en la parte superior de la capa no llegan a estar en equilibrio higroscópico con el aire que lo rodea porque reciben una energía extra del sol, que origina su calentamiento y el aumento de la presión de vapor de agua en su superficie.

Los fenómenos de transferencia de energía y de humedad en el secado solar son muy complejos; son numerosas las variables que influyen en el proceso: la radiación solar, que varía ampliamente durante el día y de día a día; la temperatura, la humedad y la velocidad del aire que también varían; el contenido de humedad del grano que va disminuyendo (pero que puede aumentar en la noche) gradualmente; el tipo de piso sobre el cual descansa el grano; el espesor de la capa de grano; el procedimiento y la periodicidad utilizada para revolver los granos.

Como consecuencia, el tiempo total de secado sufre grandes variaciones, de dos o tres días hasta uno o dos meses.

En términos generales, para la zona cafetera colombiana se considera necesario que para un agricultor que produzca 3,75ton (300@) de café seco al año, se debe disponer de por lo menos 100 metros cuadrados para secar su café al sol. Este valor corresponde a 27 metros cuadrados por tonelada de café pergaminos seco, o a 1,5 metros cuadrados de área de secado solar por cada 62,5kg (5@) de café pergamino seco.

Se comparó un nuevo tipo de secador solar rotatorio para el café, propuesto por Cenicafé (12, 77), con sistemas convencionales y no convencionales de secado solar (carros secadores convencionales con diferentes tipos de superficies, marquesinas convencionales y no convencionales, y el patio secador convencional).

El nuevo **secador solar rotatorio** (Figura 89) consta de una bandeja rotatoria que permite recibir la energía radiante en forma perpendicular, mediante su rotación (siguiendo la trayectoria del sol) alrededor de su eje y su fijación manual temporal. Permite también aprovechar más eficientemente la energía de las corrientes del aire que encuentran las capas de café mejor dispuestas para atravesarlas, entregando su energía (entalpía) y llevando consigo la humedad desprendida de los granos. Estos dos fenómenos físicos explican la mayor eficiencia y menor tiempo de secado de todos los equipos experimentados.

Para las mismas cantidades de café (3,8cm de capa), el secador rotatorio de 1,2m^2 de superficie secó 25kg (2@) de cps en **tiempos inferiores**, aproximadamente en dos días y medio menos con relación al secado en los carros secadores, con piso de madera (Figura 90).

Otras ventajas adicionales del secador rotatorio son: la limpieza de la operación y la protección del café (con una lámina de plástico) en caso de lluvia. Su costo es comparable al de las paseras pero más costoso (aproximadamente el doble) que los pisos de concreto.

El costo, la limitación de la cantidad de café, 25kg (2@) por pasera y las dificultades del manejo del café, hicieron que esta propuesta de mayor eficiencia y de mejores características técnicas no fuera hasta el momento, adoptada por los caficultores.

4.6.2. El Secador Solar Parabólico (146)

La marquesina de estructura parabólica para el secado de café pergamino y el lombricompuesto (Figuras 91y 126) (Sección 6.4.1.[43]), es construida con materia-

Figura 89. Secador solar rotatorio para café.

[43] La diferencia que puede existir entre los secadores parabólicos para el café y el lombricultivo es el tipo de suelo. Para el café se recomienda un piso de concreto. Para el lombricultivo puede ser el mismo piso de tierra, por consideraciones nétamente económicas.

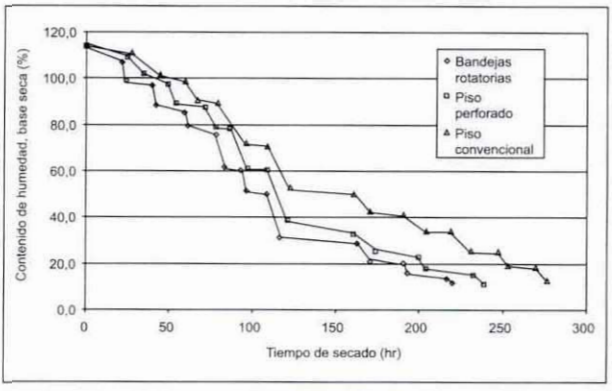

Figura 90. Comparación del secado solar con capas de café colocadas 1) en el secador de bandejas rotatorias, 2) sobre una superficie horizontal perforada y 3) sobre un piso de madera, utilizado en los carros secadores tradicionales (77).

les típicos de disponibilidad en la finca, y su estructura mejorada en Cenicafé se ha consti-tuido en la **mejor alternativa** ofrecida por Cenicafé a los pequeños agricultores (146).

Esta es una forma muy práctica (alta eficacia física, bajos costos y fácil manejo del proceso) para utilizar la radiación y la energía del aire en el secado del café. Consiste de un techo plástico transparente y una estructura rústica en guadua de forma parabólica, que permite aprovechar mejor la radiación difusa, durante los días poco soleados o lluviosos y la radiación directa durante las horas de sol. También acumula energía en forma de calor por el calentamiento de la losa de concreto, lo cual es muy importante en las últimas etapas del secado cuando se requiere de mayor temperatura del grano para acelerar la difusión de la humedad en el interior del grano.

El desempeño del secador parabólico se comparó con el del secador de carros tradicional, mediante la realización de sucesivas pruebas de secado en las cuales se midió el tiempo de secado, el contenido de humedad y la uniformidad del contenido final de la humedad del grano.

En la Figura 92 se observa la curva de secado promedio de 6 pruebas obtenidas de

Figura 91. Secador Solar con estructura de marquesina de plástico en forma parabólica.

la evaluación, considerando la variable tiempo de secado (días). En las pruebas realizadas se encontró que el tiempo de secado en el parabólico es menor en cuatro (4) días respecto al carro, siendo más eficiente en un 23,5%.

4.7. RASTRILLOS REVOLVEDORES DE CAFÉ

Los caficultores utilizan tradicionalmente rastrillos construidos en madera o en lámina de hierro para la remoción del café en los patios de secado. El peso de los materiales de construcción de los rastrillos conlleva la utilización de mangos cortos y normalmente el operario pisa el café para revolverlo, dando como resultado granos pelados, resquebrajados y contaminados con materiales extraños. La presión y fricción del rastrillo sobre el grano puede originar además aplastamientos, defectos que comprometen la calidad física del café.

Cenicafé diseñó un nuevo rastrillo revolvedor (181) (Figura 93) cuyo material de construcción es una lámina de PVC proveniente de un tubo de 152,4 (6") de diámetro y 5mm de espesor, el cual es sometido a una temperatura de 150°C durante cinco minutos para volverlo maleable y darle la forma adecuada.

El rastrillo se diseñó con ocho dientes de 40mm de ancho, con un giro 105°. El rastrillo se fija a una Te de PVC de presión de 38,1mm (1-1/2") y por medio de una reducción de 38,1mm (1-1/2") a 12,7mm (1/2") se acopla a un mango (cabo) de madera de 3m de longitud.

Para evaluar el desempeño del rastrillo revolvedor CENICAFÉ se efectuaron cinco pruebas en las cuales se comparó con el rastrillo tradicional construido en madera en forma de una tabla lisa (Figura 93). En dos carros secadores se colocó la misma cantidad de café pergamino lavado, 120kg/carro, con una capa de 35mm de espesor y se sometieron al proceso de secado. La masa de café se revolvió tres veces al día con cada uno de los rastrillos.

Para determinar la **efectividad y uniformidad de volteo** de ambos rastrillos evaluados, se pintó la capa inferior de café de uno de los carros lográndose diferenciar

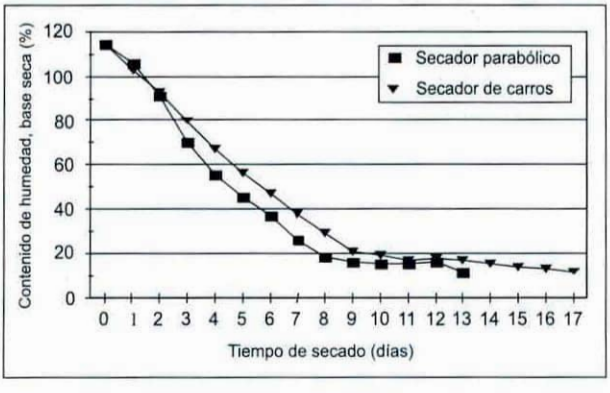

Figura 92. Comparación del secador de capas de café dispuestas en los carros tradicionales y en el secador solar parabólico

visualmente la mezcla de los granos (Figura 93). Los resultados muestran que con el rastrillo CENICAFÉ, se logra secar el café hasta un contenido de humedad final del 12% b.h., en setenta y dos horas menos que cuando se utilizó el rastrillo tradicional; el tiempo de secado se redujo en un 25%; además, el rastrillo CENICAFÉ originó 46,2% menos de daño mecánico (Tabla 46), debido a que el diseño de los dientes del rastrillo CENICAFÉ permite mover más uniformemente el café y realizar su labor desde fuera del secador, sin comprometer la calidad física.

Las siguientes son recomendaciones que permiten hacer más eficiente el empleo del rastrillo:

- Aplicarlo sobre toda la masa de café en forma uniforme, sin dejar ni crear espacios para que se seque el piso del secador.
- Realizar la operación de revolver el café, por lo menos tres veces al día.
- Ejecutar la operación cada vez, sobre la masa total en una dirección y luego en sentido perpendicular a la anterior.
- Revolver con el rastrillo desde fuera del secador, sin pisar el café.

Para evitar que los dientes se rompan por fatiga, se diseñó (11) un mecanismo de resorte para que absorbiera los esfuerzos que originaban la rotura de los dientes (Figura 94).

Figura 93. Comparación de los efectos de remoción del rastrillo tradicional y el rastrillo revolvedor CENICAFÉ.

Figura 94. Rastrillo provisto de un muelle o resorte para prolongar su vida útil.

Tabla 46. Comparación del daño mecánico producido por la utilización del rastrillo tradicional y el rastrillo revolvedor, de dientes, CENICAFÉ.

	Porcentaje de daño mecánico	
Prueba	**Rastrillo tradicional**	**Rastrillo CENICAFÉ**
1	2,43	1,25
2	0,40	0,30
3	0,48	0,12
4	0,55	0,24
5	0,46	0,10
Promedio	**0,864**	**0,402**

4.8. SECADO MECÁNICO DEL CAFÉ

El secado del café en Colombia con aprovechamiento de las energías del sol y del aire es viable para flujos de cosecha pequeños, generalmente en fincas con producción anual de menos de 12,5ton (1.000@) de cps al año.

La cosecha generalmente coincide con la época de lluvias, por lo cual, el secado bajo esta técnica es lento, a veces casi nulo. Se requiere para producciones anuales superiores a las antes mencionadas, de una elevada inversión en áreas de secado, equipos y en mano de obra para practicar el secado solar, bajo la amenaza de pérdidas de calidad por lentitud en el proceso.

En el secado mecánico se aprovechan ventajosamente las **propiedades físicas** del café. En efecto, el espacio intergranular es uniforme y amplio (los volúmenes corresponden aproximadamente al 45% del volumen total), lo que permite el paso del aire en forma uniforme y evita los excesos de requerimientos de potencia mecánica. Una gran área de la superficie de los granos, aproximadamente 780 metros cuadrados por metro cúbico de café pergamino, permite el intercambio muy eficiente de energía térmica y de humedad.

Una aproximación para la selección del sistema de secado y las especificaciones del ventilador en el secado mecánico se presentan en la Tabla 47.

4.8.1. Caudal de aire

El paso del **caudal específico** adecuado a través de la masa del café que se desea secar es muy importante para el éxito de la operación de secado. La correcta selección e instalación del ventilador (Figura 95) es el factor más importante para el éxito de la operación.

La cantidad de aire que circula por el espacio intergranular es responsable de entregar la energía para producir la evaporación y retirar el vapor de agua resultante.

Si el aire es insuficiente, se incrementa el tiempo de secado y los granos presentan

Tabla 47. Selección del sistema y especificaciones de secado según la producción de la finca

	Secado Solar y Mecánico			
Capacidad ton (@) cps/año	**Sistema ton (@) cps/año**	**Caudal m^3/min**	**Presión cm H_2O**	**Potencia hp**
Hasta 2,5 (200)	SS* paseras			
de 6,25 (500) a 12,5 (1000)	SS* carros			
de 12,5 (1000) a 25 (2000)	SM** 1ton (80@)	80	6,2	2,0
de 25 (2000) a 37,5 (3000)	SM** 1,5 ton (120@)	120	6,2	3,0
de 37,5 (3000) a 62,5 (5000)	SM** 2 ton (160@)	160	6,2	5,0

* SS = Secado Solar; **SM = Secador Mecánico.

altas desuniformidades en el contenido final de humedad, presentándose granos sobresecos, con menos del 10% y granos flojos, con humedades superiores al 14%. De otro lado, si el caudal es mayor de lo necesario, se estará costeando innecesariamente una potencia en el ventilador y mayores consumos de energía térmica para el calentamiento del aire, lo que incidirá negativamente en el costo del secado.

Es muy importante operar los secadores de café con el correcto valor de los **caudales de aire**; los resultados de investigación de Cenicafé (41) (Tabla 48) indican que para el secado de café pergamino en capa estática el valor recomendado es el de 25 metros cúbicos por minuto, por cada metro cúbico que ocupe el grano; valor equivalente al de un caudal de 66m^3/min/ton de café pergamino seco o de 20m^3/(min/m^2), cuando la capa total de los granos es de 0,8 m (incluyendo una cámara de presecado) o de 10m^3/(min/m^2) de secador, cuando la capa de grano es de 0,4m. En la Tabla 48 se indica el caudal mínimo recomendado y las equivalencias, en varias unidades.

Figura 95. Ventilador centrífugo forzando aire a un silo-secador CENICAFÉ. Obsérvese la correcta transición entre la salida del ventilador y la entrada al secador (el generador de aire caliente ha sido retirado).

Tabla 48. Caudales recomendados para el secado del café pergamino en capas estáticas.

Caudal*	Unidades equivalentes de caudales específicos
25	$m^3/(min\text{-}m^3)$
66	$m^3/(min\text{-ton cps})$
20	$m^3/(min\text{-}m^2)$ para h = 0,8m
10	$m^3/(min\text{-}m^2)$ para h = 0,4m

(*) Es preferible utilizar las primeras dos recomendaciones de caudales específicos (por unidad de volumen ocupado por el grano o por tonelada de café pergamino seco) porque estos valores siempre son constantes, para cualquier masa de café depositada en el silo-secador.

4.8.2. Paso del aire a través del café

El paso del aire por la masa de granos en cualquier tipo de secador es posible gracias a la energía mecánica suministrada por el ventilador; la resistencia ofrecida por unidad de longitud en la dirección del flujo del aire es proporcional al caudal por unidad de área y se manifiesta por una pérdida de presión estática. Para correlacionar estas variables se obtuvieron datos experimentales y resultaron tres ecuaciones, una para cada contenido de humedad (119). La relación planteada en la ecuación < 6 > (155) permite sustituir las tres ecuaciones en una sola, en función de la humedad del grano, con muy buena precisión. Los resultados de la ecuación **< 6 >** permiten estimar el caudal específico como función de la pérdida de presión específica para café pergamino y se muestra en la Figura 96. Esta expresión es muy útil para estimar el caudal real en los secadores, midiendo la perdida de presión estática, mediante un manómetro construido con un tubo en U, transparente, con agua.

$$\frac{Q}{A} = (9{,}523 - 0{,}0476\ M) \left| \frac{\Delta P}{\Delta L} \right|^{0{,}676} \qquad < 6 >$$

despejando para $\Delta P / \Delta L$:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \left| \frac{\frac{Q}{A}}{9{,}523 - 0{,}0476\ M} \right|^{1{,}4793} \qquad < 7 >$$

En donde:

Q = Caudal de aire, (m^3/min).
A = Area transversal al flujo del aire, (m^2).
M = Contenido de humedad del café, (%).
ΔP = Caída de presión en secciones distantes en L, (centímetros de agua).
ΔL = Distancia entre mediciones de la pérdida de presión P, (m).

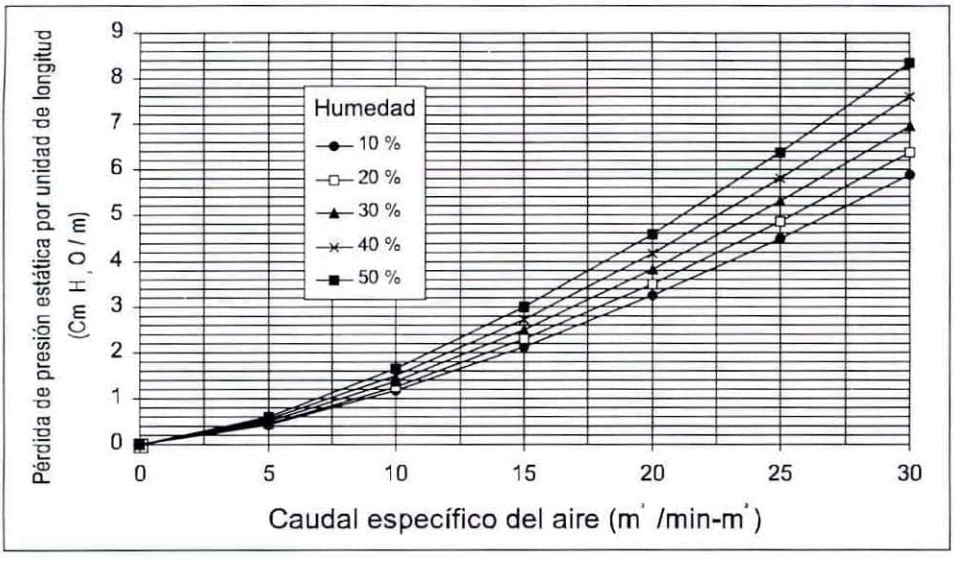

Figura 96. Relaciones de caudales y presiones estáticas por el paso del aire a través de capas de granos de café pergamino.

4.8.3. Ventiladores

Los ventiladores (Figura 95) tienen la misión de forzar cantidades adecuadas de aire por entre la masa de granos.

El **cálculo y selección del ventilador** adecuado es una tarea para especialistas que deben conocer los requerimientos de los caudales mínimos de secado del café pergamino y el cálculo de las pérdidas de presiones estáticas y dinámicas que el aire sufre al pasar por las capas del café y por cada uno de los elementos constituyentes del circuito neumático (ductos, transiciones, expansiones abruptas, curvas, compuertas, válvulas, etc.). El ventilador se selecciona calculando el caudal que debe entregar contra la suma de todas las presiones parciales de que consta el sistema (28, 82).

Otros factores importantes en la selección del ventilador son el tipo (centrífugo, axial), la eficiencia mecánica deseada, el nivel de ruido aceptable, la estabilidad mecánica, el balanceo estático y dinámico, la calidad de los materiales, la calidad de los rodamientos, el sistema de conexión entre el motor y el eje del ventilador, la posición del ventilador, etc.

La potencia total para mover el ventilador, considerando además su eficiencia se calcula en la forma siguiente:

$$Pot = \frac{Q \quad P}{458 \quad \eta} \qquad <8>$$

En donde:

Pot = Potencia, (hp).
Q = Caudal, (metros cúbicos por minuto).
P = Presión estática total, (cm de agua).
458 = Factor de conversión.
η = Eficiencia mecánica del ventilador, (decimal).

4.8.4. Generadores de aire caliente. Intercambiadores de calor

Para calentar el aire se pueden utilizar diferentes dispositivos que permiten convertir la energía química almacenada en los combustibles en energía térmica. Los combustibles más utilizados son: ACPM, coque, carbón mineral, cisco o pergamino del café (Sección 4.8.7.) y algunos productos resultantes de la refinación del petróleo.

Los dispositivos empleados para la conversión de energía deben permitir el calentamiento del aire sin que los productos resultantes de la combustión entren en contacto con él mismo (generadores de aire caliente de tipo indirecto).

La correcta operación y mantenimiento de uno de los equipos más utilizados para quemar ACPM por los agricultores, es presentada por Álvarez y Mejía (13). Los diseños adecuados de generadores de aire caliente deben disponer de características adecuadas para el mayor aprovechamiento de la energía térmica (buena eficiencia), tanto para combustibles líquidos como sólidos. Estas características incluyen la siguientes:

- Area adecuada para el intercambio del calor entre cámara de combustión y las superficies que calientan el aire, que normalmente se aumentan por medio de aletas.
- Adecuada geometría del intercambiador para garantizar un correcto coeficiente de transferencia de calor por convección.
- Flujos de gases de combustión y del aire con direcciones opuestas.

El ACPM presenta ventajas sobre el COQUE por la autonomía, por su mayor disponibilidad, por el mejor control de la temperatura de secado y por la mayor posibilidad de reducir los riesgos de contaminación del grano.

El COQUE, de menor costo que el ACPM, generalmente se quema en dispositivos de combustión directa, que permiten que los gases de combustión entren en contacto con los granos, con lo cual se afecta la calidad del café. Ambos requieren de una alimentación frecuente (normalmente inferior a 2 horas) y no es posible, en la práctica, mantener la temperatura con poca variación alrededor de 50°C, originando problemas con la calidad del café, principalmente por el cristalizado y sobresecado del grano.

La utilización del carbón mineral, o hulla, para la generación de aire caliente en el secado de café es popular. Se dispone de quemadores automáticos producidos por la industria nacional que garantizan un buen desempeño energético, con eficiencias superiores al 50%. La autonomía de alimentación del combustible y la durabilidad de las partes de los equipos, para producir un aire completamente limpio, también han sido refinadas.

Colombia produce en forma general, carbón de buena calidad, en muy buena cantidad y buena distribución por las principales zonas cafeteras. Si bien, la inversión inicial en el quemador-intercambiador de calor es más alto que cualquiera de las otras opciones, el costo del combustible es substancialmente menor.

Recientemente, en la introducción masiva del **gas** en Colombia , se han desarrollado diferentes opciones de utilizar esta fuente energética en el secado del café. El gas tendrá un espacio muy amplio por sus excelentes características de manejo, control y costo.

En la selección del tipo de combustible a utilizar se deben tener en cuenta los criterios antes mencionados y los incrementos en los costos de beneficio por el exceso de la mano de obra que se requiera para alimentar y supervisar algunos quemadores, la cual es de alto valor en horario nocturno.

Para calcular el consumo horario de combustible se debe tener presente: el flujo de aire, las temperaturas máxima de aire de secado y la mínima ambiental, la eficiencia de conversión de energía química a energía térmica. Este último factor depende del tipo de intercambiador utilizado. Desde un punto de vista práctico se puede considerar, para el caso de intercambiadores utilizados con quemadores de combustibles líquidos, lo siguiente:

- Un intercambiador con superficie aletada permite obtener fácilmente un 50% de eficiencia.
- Con los intercambiadores sin aletas rara vez se obtienen eficiencias superiores al 40%.
- Para la quema de coque, en general, los caficultores utilizan equipos que tienen eficiencia baja, máxima de 30%.

Para calcular el consumo horario de combustibles se recurre al siguiente balance de energía:

ENERGÍA GENERADA POR EL COMBUSTIBLE = ENERGÍA GANADA POR EL AIRE + LAS PÉRDIDAS

< 9 >

Las pérdidas están constituidas por las energías transferidas al ambiente por convección y principalmente, por la energía que llevan los gases de combustión y que salen por la chimenea.

A partir de este balance, y para simplificar los cálculos, se puede calcular el consumo horario con la ecuación < 10 > que permite calcular la cantidad de energía calorífica necesaria para aumentar la temperatura del aire que fluye con un caudal Q.

$$q = \frac{Q\Delta T60}{\eta c} \qquad < 10 >$$

En donde:

Q = Caudal de aire (m^3/min).
q = Flujo de combustible (kg/min).
ΔT = Diferencia de temperatura entre el aire de secado y el aire ambiental, °C.
η = Eficiencia del intercambiador, (decimal).
c = Poder calorífico del combustible, (kJ/kg).

Para los combustibles más utilizados se presentan los valores promedios de poder calorífico (c) presentados en la Tabla 49.

4.8.5. Secado mecánico de capas estáticas del café

4.8.5.1. Secado en una sola dirección del aire

Los secadores mecánicos utilizados para café en Colombia son, en general, de capa fija; ésto significa que el grano se coloca en un depósito provisto de un piso construido en lámina metálica perforada y el aire lo atraviesa en una o alternativamente, en dos direcciones.

Los secadores de capa fija de granos en los cuales el aire atraviesa la masa de café en una sola dirección, producen un gradiente muy marcado de humedad a lo largo de toda la capa. Para el caso del café pergamino esta diferencia de humedad es todavía más grande debido al alto contenido inicial de humedad del café con relación a los cereales.

Evaluaciones efectuadas en Cenicafé (124) (Figura 97) indican que al secar café en un silo secador de capa fija de 0,40m, sin invertir la dirección del flujo del aire,con temperaturas de aire de secado de 50°C y un caudal de 60m^3/min. ton cps, después

Tabla 49. Poder calorífico de algunos combustibles utilizados en Colombia.

Combustible	Poder Calorífico	
ACPM	146.000	(kJ/gal)
HULLA (antracita)	33.440	(kJ/kg)
HULLA (muestra Riosucio, Caldas)	28.750	(kJ/kg)
COQUE	30.514	(kJ/kg)
CASCARILLA DE CAFÉ	17.936	(kJ/kg)
CASCARILLA DE ARROZ	12.500	(kJ/kg)

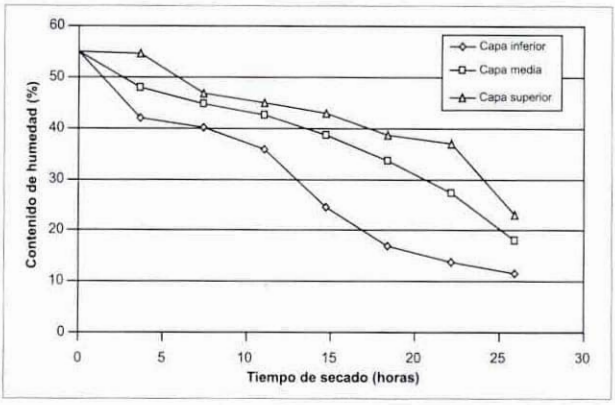

Figura 97. Curvas de secado de capa fija sin inversión del flujo del aire.

de 26 horas de secado, las diferencias en el contenido de humedad entre las capas extremas fueron del 13% (23,8 - 10,8), mientras que la humedad promedia de los granos era de 17%.

4.8.5.2. Secado con inversión de la dirección del flujo de aire

Para disminuir el gradiente de humedad en la capa estática del café se ha demostrado válida la opción de invertir la dirección del sentido del aire en la capa, a intervalos de 6 a 12 horas, de forma que se disminuye efectivamente el sobresecado en los granos que reciben el aire con mayor temperatura. Mediante esta operación los granos más húmedos quedan localizados en el interior de la capa. Si el caudal de aire utilizado es inferior al recomendado (Tabla 48), se obtendrán aún diferencias de humedad mayores, que pueden comprometer la calidad del producto.

En la Figura 98 se presentan las curvas de secado para los granos localizados en la capa inferior, en la capa media y en la capa superior en un secador CENICAFÉ, en el cual se aplicó un caudal específico de aire de secado a 50°C (64). Por medio de compuertas se invirtió la dirección del aire de secado cada tres horas. Durante las

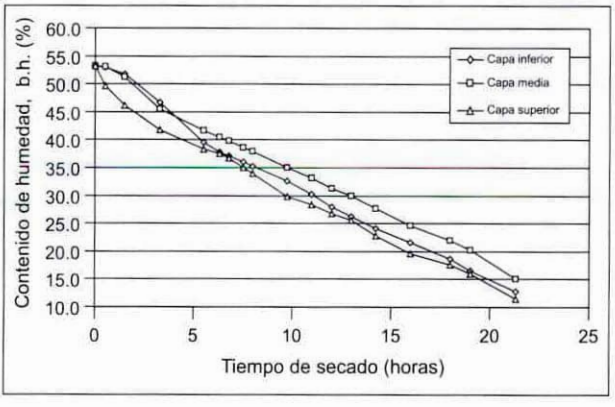

Figura 98. Curvas de secado de capa fija con inversión de la dirección del flujo del aire.

primeras 3 horas de secado el aire se forzó de abajo hacia arriba. El contenido de humedad de las tres capas al final de las 21,5 horas de secado, fue de 15,1% en la parte media, 11,5% en la superior y de 12,7% en la capa media.

4.8.5.3. Presecado del café en capas estáticas

Una forma de utilizar más eficientemente la capacidad de secado del aire consiste en aprovechar el aire de salida de la primera capa estática para que atraviese otra capa, u otras capas, antes de salir a la atmósfera. Esta(s) nueva(s) cámara(s) se denomina(n) cámara(s) de presecado. Es necesario disponer de suficiente potencia en el ventilador para poder cumplir con el caudal mínimo.

Al aumentar la masa de café, se debe aumentar en igual proporción el caudal expresado en metros cúbicos por minuto por metro cuadrado del secador. Los valores de caudales expresados en metros cúbicos por metro cúbico ocupado por el grano o por tonelada de café pergamino seco deberán quedar iguales [25 m^3/(min-m^3) ó 66 m^3/(min-Ton cps)].

En la Figura 99 se puede observar una cámara del secador CENICAFÉ, el cual se caracteriza por tener un compartimiento de secado y otro de presecado. Además, es posible invertir la dirección del flujo del aire tanto en el compartimiento de secado como en el de presecado.

La(s) cámara(s) para el presecado también puede estar localizada en la parte superior. En este caso solamente es posible la inversión del flujo del aire en la cámara de secado. Este secador, cuyo esquema se presenta en la Figura 100, es una adaptación del secador CENICAFÉ con la ventaja de que se reduce el área para su construcción y consecuentemente los costos. Estos secadores, de dos o tres capas, son de fácil construcción y son fabricados generalmente en ladrillo y concreto. Su capacidad puede variar de 0,625 a 3,75 ton de cps (50@ a 300@). La temperatura máxima del aire de secado debe ser de 50°C.

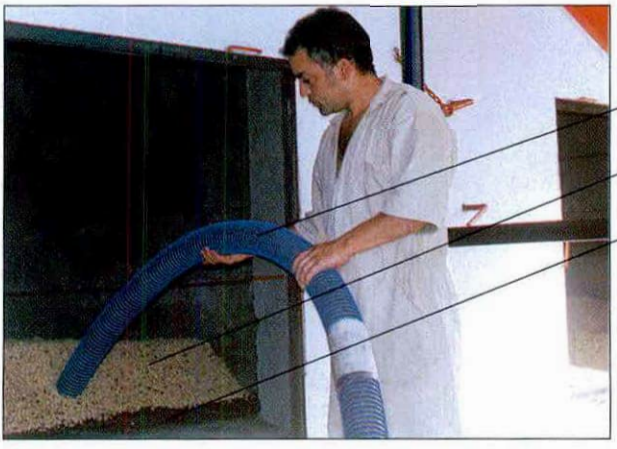

Figura 99. Silo secador tipo CENICAFÉ para café pergamino, en capas estáticas de secado y presecado, con inversión de la dirección del flujo del aire. Descarga neumática.

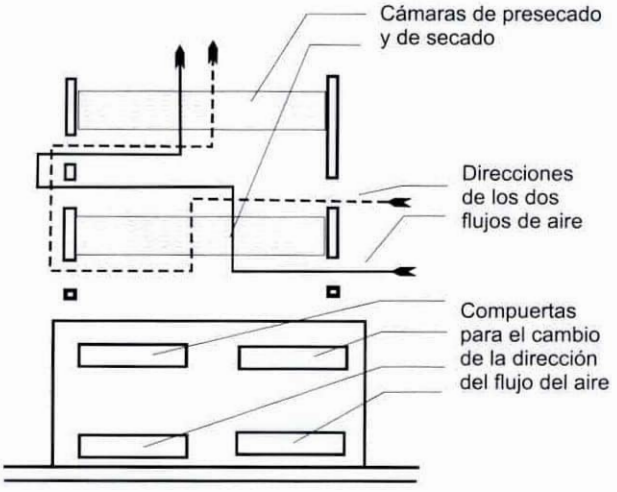

Figura 100. Esquema de un silo secador vertical, de dos capas estáticas, provisto de inversión de la dirección del flujo del aire, solamente en la cámara de secado.

Si se utilizan temperaturas superiores a los 50°C, aunque disminuye el tiempo de secado, conduce a una reducción en los ingresos del caficultor, por el sobresecado inevitable que ocurren en las capas exteriores, para obviar la presencia de granos húmedos en las capas intermedias de la masa.

4.8.5.4. Secado mecánico del café en carros convencionales para secado al sol

En Cenicafé se desarrolló otro secador mecánico de capa fija para pequeños y medianos caficultores (29), con capacidad de 750kg (60@) cps, a partir de un secador solar de carros, igual al utilizado tradicionalmente por los caficultores. El secador solar está constituido por varias plataformas de secado dispuestas una sobre otra, soportadas sobre rodachinas que facilitan su desplazamiento para exponer el grano al sol o resguardarlo en caso de lluvia.

Las siguientes modificaciones fueron necesarias en la estructura tradicional para efectuar el secado mecánico del grano.

- El piso de madera de las cuatro bandejas se reemplazó por anjeo cafetero de 4 x 4 huecos por 25,4mm (pulgada).
- El sellamiento lateral y posterior se realizó mediante la construcción de paredes de ladrillo farol revocadas internamente.
- El sellamiento frontal del espacio libre entre las bandejas se realizó mediante dos compuertas construidas en lámina metálica.
- Se construyó un techo de dos alas, con teja de zinc y vigas de madera para facilitar el manejo del café de la plataforma superior. El giro de cada ala del techo se efectuó por medio de cuatro bisagras.
- La cámara plenum del secador se formó por el espacio libre entre el anjeo de la plataforma inferior y el piso del secador.

Su operación se asemejó al manejo tradicional de un horno de panadería, el cual es alimentado indistintamente retirando la capa que ha terminado el proceso, y sustituyéndola inmediatamente con otra capa con producto fresco.

El secador presentó un comportamiento satisfactorio, obteniéndose buenos resultados en el proceso.

El caudal promedio utilizado para las cinco primeras experiencias fue de 5,6 m^3/min-m^2, lo que es equivalente a 23,5 m^3/min-m^3 o a 61 m^3/min-Ton cps. A medida que se retiraban las capas los caudales aumentaron hasta en un 80% de los valores anotados.

En la Tabla 50 se muestra el desempeño del secador en cuatro experimentos; se puede observar en el primero, que la primera capa obtuvo el contenido de humedad final de 11% a las 23 horas de secado, momento en que ésta se retiró del secador; la última capa fue retirada a las 36 horas de inicio del secado (13 horas después de retirar la primera capa).

La uniformidad del contenido final de humedad fue muy aceptable, presentando coeficientes de variación inferiores al 10%, cuando el valor correspondiente en los silos secadores con inversión del sentido del aire, y con los caudales recomendados, del mismo orden de magnitud.

La eficiencia térmica del secador fue de 4.638 kJ/kg de agua evaporada, en promedio, el cual es un valor muy aceptable.

4.8.5.5. Dimensionamiento de los secadores de capa fija

Los secadores son los elementos de mayor costo en el beneficio del café y el proceso del secado es el más demorado dentro de todo el proceso. Para la estimación inicial de la capacidad de los secadores estáticos se puede utilizar el concepto general de que la capacidad de los secadores debe ser suficiente para secar la

Tabla 50. Tiempo total de secado para cada plataforma y para cada prueba, en un secador solar de carros. Humedad final = 11%.

	Número de la prueba					
	1	2	3	4 *	5	6
Plataforma	Tiempo de secado, horas					
1	23,5	24	23,5	-	24,0	23,0
2	28,0	27	28,0	23,8	27,5	26,5
3	29,5	36	32,0	32,5	36,0	30,5
4	36,0	38	36,0	37,5	38,5	35,5

* En esta prueba no se cargó la plataforma inferior.

** En esta prueba el espesor de la capa de grano fue 0,20m.

cantidad producida en la semana pico, que puede ser estimada igual a cuatro veces la producción del día pico.

En términos prácticos, cuando se utiliza el sistema de beneficio convencional con fermentación, el número de tandas (cantidad de producto depositado en los secadores) que se secan semanalmente es generalmente igual a tres.

Mediante la introducción del desmucilaginado mecánico, que permite iniciar el secado en el primer día de la semana, la utilización de los secadores puede aumentarse a cuatro tandas, o sea 33,3% más capacidad de secado y por tanto puede reducirse en esta misma cifra la capacidad de secado instalada en la finca.

4.8.5.6. Selección del ventilador

Una vez se conoce la cantidad de café por secar en una tanda, se puede calcular el volumen que ocupa utilizando el valor de la densidad del café lavado (650kg/m^3) según la Tabla 58 que se incluye en el Apéndice A. La cantidad de aire que debe pasar por la masa de café se obtiene de la Tabla 48. La presión estática que debe suministrar el ventilador a éste caudal se calcula de la ecuación < 7 >. La potencia del ventilador se calcula mediante la ecuación < 8 >.

Cuando los ductos y las compuertas se dimensionan adecuadamente, es decir, cuando su área es aproximadamente 50% mayor que el área de la succión del ventilador, las pérdidas de presión del aire para pasar por éstos obstáculos son pequeñas, comparadas con las pérdidas a través de la capa de granos; como criterio práctico se les puede estimar como iguales a 15% de las que ocurren a través del grano.

4.8.6. Secador mecánico de café, para el aprovechamiento de la energía calorífica no utilizada en las estufas campesinas (96)

En las fincas cafeteras se emplean estufas que usan leña o carbón mineral como combustible para la preparación de los alimentos. En dichas cocinas se aprovecha una parte pequeña de la energía calórica generada para la preparación de alimentos, pero permanece encendida aún durante la noche para facilitar al día siguiente el encendido.

Dadas las dificultades del secado en los sistemas solares existentes durante la cosecha, fundamentalmente por factores climáticos (lluvia, alta nubosidad, etc.) se planteó como alternativa de secado mecánico de café para pequeños productores, mediante el empleo de elementos disponibles en la propia finca cafetera (estufa y leña de café proveniente de la zoca).

El equipo de secado se denominó "EScafé" Estufa Secadora para café, para una capacidad de 125kg (10@) de café pergamino seco/tanda y consta de: una estufa modificada, una cámara de secado igual a la desarrollada por Montenegro (105), un ventilador y un ducto (Figura 101). La estufa modificada constituye el hogar de combustión y el intercambiador de calor (formado por dos componentes) para el

Figura 101. Equipo de secado "EScafé" para el aprovechamiento de energía calorífica en los hogares campesinos.

equipo de secado, a saber, el primero es una camisa que recubre dos paredes, lateral y fondo de la estufa para así aprovechar el calor generado por ellas, y el segundo es un ducto denominado carcaza que recubre concentricamente la chimenea, a la cual se le adicionó cuatro aletas longitudinales.

El equipo cuenta con un sistema simple para la inversión del flujo del aire en la capa de café, conformado por un ventilador tipo axial de 0,154kW, con un caudal de 30 m^3/min acoplado a un eje sobre el cual gira alrededor de un punto fijo, permitiendo la inversión de acuerdo al avance del secado.

En la estufa, la energía no empleada en la preparación de alimentos durante una prueba de secado, proveniente de combustibles como el carbón mineral y la leña de café, es aproximadamente 635kW-h (78%) y 731kW-h (81%) respectivamente. De ésta se aprovecha para el secado de café más del 33 %.

El **tiempo de secado** de café en el equipo fue de 3 días, o sea 7 días menos que el secador solar operando con el funcionamiento habitual de las horas empleadas para cocinar, es decir 15 horas en las que se le suministraba combustible y se regulaba la temperatura (compuertas) para obtener en la cámara de secado un promedio de 47,3°C con carbón y 49,3°C con leña.

Durante el secado del café se emplearon 96,1kg de carbón y 183,1kg de leña. Se obtuvo un contenido de humedad final del café del 10% (b.h.), en promedio.

La Tabla 51 muestra los resultados obtenidos empleando cada uno de los combustibles y con el secado natural.

4.8.7. Secador Intermitente de Flujos Concurrentes, (IFC)

Los secadores de capa fija ocupan gran área en los beneficiaderos, aún los de diseño vertical con dos o más capas. El aire debe pasar simultáneamente por todas

Tabla 51. Valores obtenidos de la energía disponible, la energía utilizada en el secado, el tiempo de secado y el contenido de humedad final.

	Energía Disponible	Energía utilizada en el secado	Tiempo de secado	Contenido de humedad final promedio
Carbón mineral	78%	35%	3 días	10,10% b.h.
Leña de café	81%	33%	3 días	10,15% b.h.
Secado natural			10 días	10,78% b.h.

las capas, con volúmenes específicos altos para disminuir la desuniformidad intrínseca en este tipo de secadores y para garantizar un tiempo de secado aceptable. De otro lado, los secadores deben quedar dentro de estructuras convencionales.

Con el fin de presentar alternativas para superar las limitaciones inherentes de los secadores de capa fija y disponer de una tecnología de mejor desempeño técnico, Cenicafé, después de un examen minucioso sobre las diferentes alternativas posibles, inició un programa de investigación para desarrollar un tipo de secador intermitente de flujos concurrentes (IFC).

El secador IFC consta, en su estructura básica (Figuras 102, 103 y 104) de dos partes principales: la cámara de secado y la cámara de reposo. La cámara de reposo se divide en dos, inferior y superior. La masa de granos se mueve continuamente dentro del secador, por medio de un sistema de descarga inferior y de un transportador de cangilones.

En la cámara de secado el aire y el grano fluyen en el mismo sentido, hacia abajo, de donde se origina su nombre se secador de flujos de aire y granos concurrentes; en ésta, el aire de más alta temperatura proveniente del generador de aire caliente, encuentra a los granos más húmedos produciéndose altas tasas de evaporación. Estas tasas impiden el excesivo calentamiento de los granos, de forma que su temperatura no sobrepasa los 45°C, valor muy distante de la temperatura del aire que puede llegar hasta los 40°C (Figura 107); de esta forma se conserva la calidad del

Figura 102. Secadores intermitentes de flujos concurrentes, CENICAFÉ - IFC.

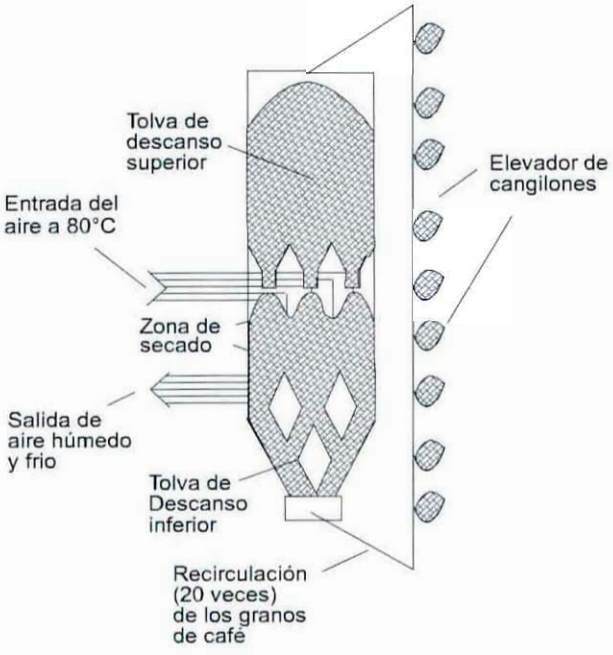

Figura 103. Esquema de un secador intermitente de flujos concurrentes, CENICAFÉ - IFC.

café. Además, el sistema de secado con flujos de aire y grano en forma concurrente y con temperaturas relativamente altas es muy eficiente, por consideraciones termodinámicas.

De la cámara de secado el grano pasa a la de **cámara de reposo inferior**, en la cual los granos no quedan en contacto con el aire caliente; en este espacio ocurre la redistribución de humedad, desde el interior al exterior, en cada uno de los granos. La masa se descarga por gravedad controlada por un dosificador macánico y la toma el transportador de cangilones, el cual a su vez la descarga en la parte superior del secador, donde continúa su período de reposo en la **cámara de reposo superior.** El sistema de recirculación de los granos a través del secador se repite aproximadamente 20 veces, hasta obtenerse el contenido de humedad deseado en el rango de humedad del 10 - 12% b.h. Todos los granos reciben la energía en forma discontinua, de ahí que el secador reciba el nombre de **secador intermitente.**

Inicialmente se construyó (92) y se evaluó (52) un secador IFC prototipo con capacidad de 500kg de cps (40@). Su desempeño técnico y la calidad final del café dieron resultados muy promisorios (123).

El mismo secador prototipo se modificó para mejorar el sistema de transporte del grano. En una evaluación de la operación y de la calidad del producto obtenido (123) se realizaron 8 observaciones con el secador, variando las temperaturas de aire de secado de 80 a 86°C y los flujos de granos de 0,024 a 0,048 $m^3/min.m^2$. El tiempo total de secado varió entre 26 y 32 horas. El contenido de humedad inicial promedio fue de 53,8% (1,65% coeficiente de variación, CV). El contenido de

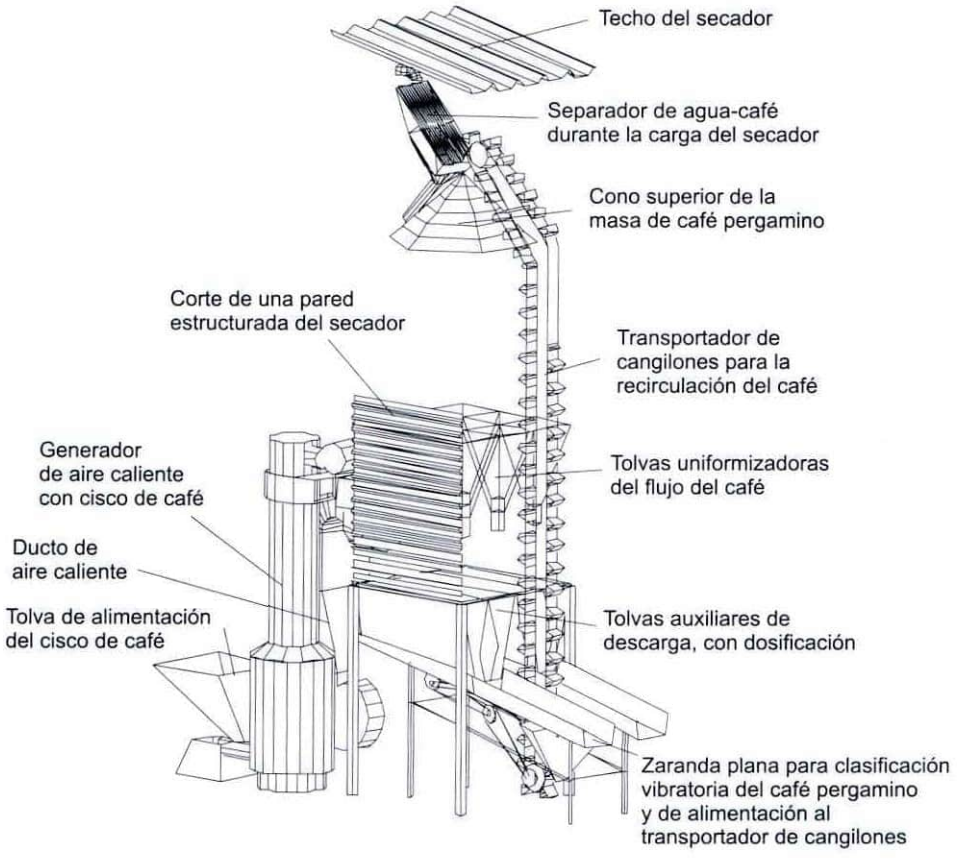

Figura 104. Diagrama tridimensional de un Secador Intermitente de Flujos Concurrentes, CENICAFÉ – IFC.

humedad final promedio fue de 11,0% (5,72 CV). Este valor bajo de coeficiente de variación indica la casi perfecta uniformidad de contenido final de humedad, requisito que facilita la comercialización y permite una conservación buena durante el almacenamiento. Además, es aproximadamente 3 veces más bajo que el valor correspondiente a los secadores de capa estática.

El hecho de poder trabajar a temperaturas relativamente altas de secado es muy conveniente desde el punto de vista de eficiencia termodinámica; en efecto, en la Figura 105 se muestran las humedades absolutas de salida y de entrada en el secador, que indican que la extracción de la humedad es muy alta (cerca a la saturación), y constante, a lo largo del todo el proceso de secado (lo que se también se puede confirmar por el carácter lineal de la curva de secado (Figura 106).

Todas las curvas de secado (variación de la humedad con relación al tiempo de secado) obtenidas en el secador IFC, prototipo y comercial, muestran disminución de la humedad lineal con relación al tiempo (Figura 106) y la temperatura del grano estable

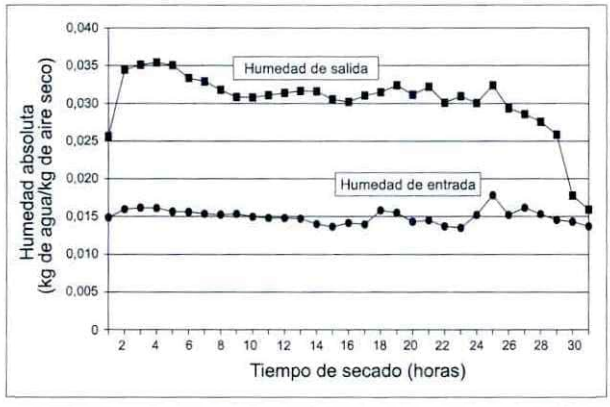

Figura 105. Uniformidad en las diferencias entre las humedades absolutas de entrada y de salida al secador.

por debajo de 40°C, cuando la temperatura del aire de secado no sobrepasa 80°C (Figura 107). Las pruebas de calidad física y de taza de todas las muestras fueron muy aceptables, obteniéndose calificaciones de café de alta calidad (123).

Durante estos experimentos se desarrolló una metodología para finalizar el proceso del secado utilizando la energía propia de los granos; para ello se desconectó la fuente de calor y se continuó inyectando aire ambiente, para reducir los dos últimos puntos de humedad y obtener el contenido de humedad final deseado (11 a 12%, b.h.) (123).

Como conclusión general del estudio se comprobó que el secador de flujos concurrentes para café pergamino era un sistema de secado válido y potencialmente competitivo con relación a otros sistemas mecánicos (123).

Con base a los resultados de optimización operacional del secador IFC (106, 107) se construyó y evaluó un secador IFC de capacidad de 1.000kg de cps similar al prototipo (111). En este segundo prototipo se efectuaron reformas e innovaciones para optimizarlo y disminuir a menos de 1% la trilla de granos, durante toda la operación. Para evitar las reacciones químicas originadas por el contacto del café

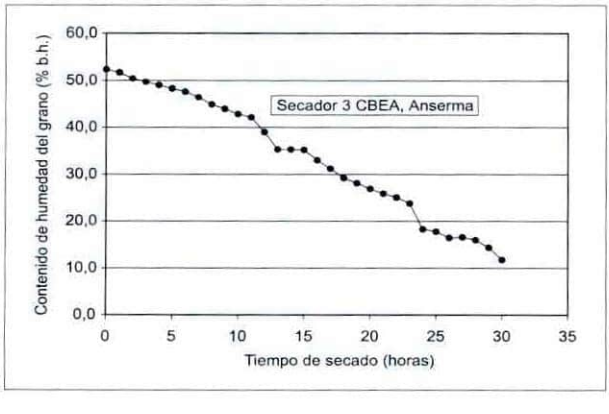

Figura 106. Curva de secado obtenida en los secadores CENICAFÉ - IFC. Se caracteriza por la reducción lineal de la humedad durante el tiempo de secado.

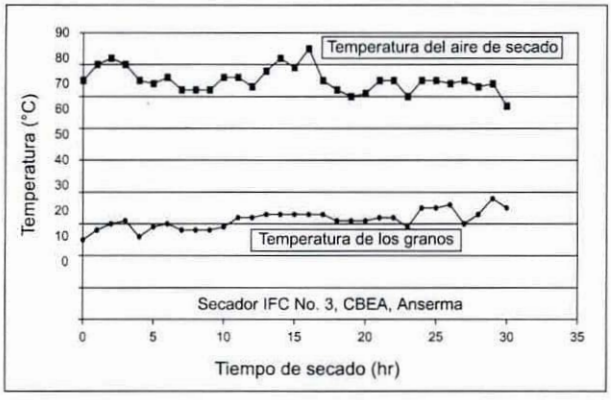

Figura 107. Comparación entre las temperaturas del aire de secado y de las temperaturas de los granos en una operación típica de los secadores CENICAFÉ – IFC.

pergamino húmedo con las paredes de lámina galvanizada del secador, se revistió con láminas delgadas de acero inoxidable de costo muy reducido.

Se evaluó el secador IFC de 1.000kg con mejoramientos mecánicos y utilizando un quemador de carbón mineral y se comprobaron las excelentes condiciones de secado con disminución lineal de la humedad desde 54%, hasta 12%, b.h. La temperatura de secado se mantuvo constante en un valor de 83°C, con un coeficiente de variación de sólo 3,3%, gracias a un dispositivo electrónico que controla el quemador de hulla construido en Cenicafé (197).

La eficiencia del secador expresada en kJ/kg de agua evaporada se determinó con la ayuda de un programa sicrométrico computarizado (28). El valor resultante de 3.763kJ/kg de H_20, indica la altísima eficiencia del secador. En términos relativos, la eficiencia del secador comparada con la evaporación de agua libre, en la que no existe ninguna resistencia de difusión, es del 63,4%.

A continuación se presentan resultados experimentales correspondientes a los secadores IFC evaluados en forma experimental en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma. (Sección 3.19.)

El área de la sección del secador es de $4m^2$. El volumen de secado efectivo es de $4m^2$ x 0,65m = $2,6m^3$. El volumen de descanso (tiempo en que el café no está sometido al flujo de aire caliente es de: 10,85 m^3. La relación **volumen de secado a volumen de descanso** igual a 0,24.

La temperatura de secado utilizada fue de 75°C, en promedio. Al final del secado, cuando la humedad fue del orden del 14% se apagó el generador de aire caliente y se dejó forzar el aire a través de los granos en movimiento a temperatura ambiente, durante dos horas. Al final de este tiempo, el grano presentaba el 12% de humedad.

El caudal de aire en el secador es de 45 m^3/min-m^2 que aplicado a un área transversal de $4m^2$ de los secadores dio un caudal total de $180m^3$/min.

La potencia necesaria para vencer la resistencia de los granos en este secador es de

6,0hp pero debido a la gran resistencia que ofrece el intercambiador de calor al paso del aire, la potencia total para todo el sistema neumático de secado es de 13,5hp.

El **tiempo medio de secado**, utilizando temperaturas de 75°C para una carga de 3,4ton (270@) de café pergamino seco fue de 28 horas. El tiempo de carga media del secador por medio de las motobombas fue de 45 minutos. El tiempo de descarga media fue de 30 minutos.

En la Figura 108 se indica la calidad del café pergamino seco obtenido en el secador de torre, cargado con 2.620kg de café lavado.

Se demostró que al descargar el secador, el café tenía **contenidos de humedad muy uniformes** y cercanos a la humedad ideal (para asegurar el mayor peso de venta) del 12%, (Figura 109). El coeficiente de variación de la humedad fue de 3,3%, (cuando no se presentaron fallas con el sistema de dosificación), lo que corroboró que este tipo de secador presenta aproximadamente 3 veces menos desuniformidad que los secadores de capa estática.

En la Figura 110 se indica la excelente calidad del café verde obtenido. El café fue catalogado como **café tipo Federación**.

Todos los secadores fueron utilizados con **cisco del café**, como combustible. El consumo de cisco fue de 310kg de cisco por tonelada de café pergamino seco, ó sea que con un kilogramo de cisco se secaron 3,22kg de café pergamino seco. Es decir, el contenido de cisco en el café pergamino seco contiene el 61% de la energía necesaria para secar el grano, en un quemador con una eficiencia del 60%. Si la eficiencia fuese ideal, (100%) el pergamino contenido en un grano podría producir toda la energía para secar el café pergamino. El costo de la materia prima (enero de 1996) fue de aproximadamente $27,8/kg cps.

En el presente año se está programando la modificación del sistema de descarga de los granos de los secadores, para lograr la recirculación de los mismos, de forma que se consiga completamente la uniformidad de este proceso y así garantizar el mismo tratamiento de secado a cada uno de los granos.

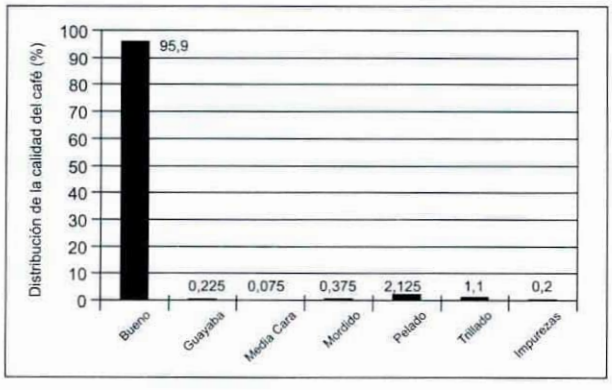

Figura 108. Calidad del café pergamino secado en el secador IFC de torre.

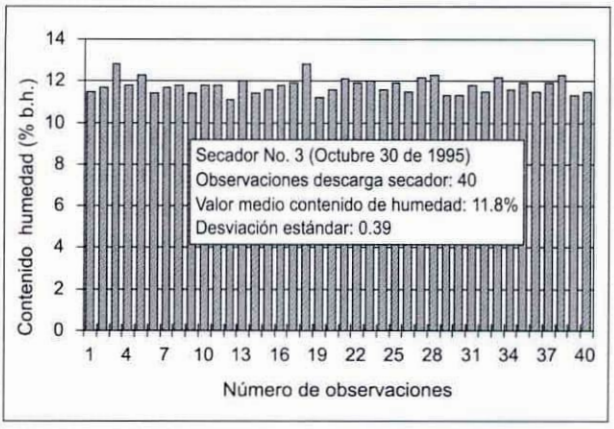

Figura 109. Uniformidad del café pergamino secado en el secador IFC de torre, Anserma, Caldas.

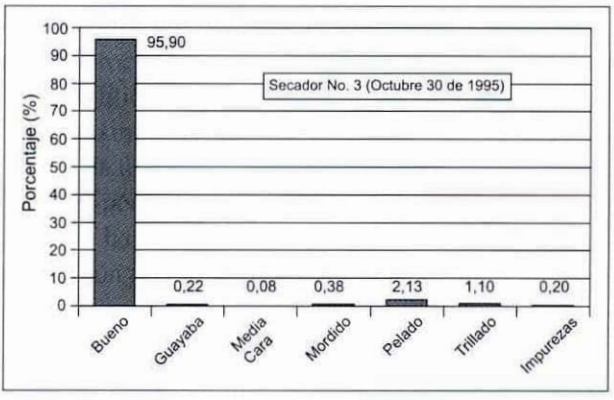

Figura 110. Calidad de la almendra del café secado en el secador IFC de torre, Anserma, Caldas.

4.9. SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL SECADO

Desde hace tres décadas, cuando se inició el uso masivo de los computadores, se han utilizado los modelos matemáticos para describir los procesos de secado y enfriamiento de los granos.

Desde el inicio de esta nueva tecnología digital aplicada, se consideraron los procesos de secado y almacenamiento de granos (28) como muy buenos ejemplos de la gran utilidad práctica de la simulación matemática, que en los inicios trataba de justificarse.

En efecto, los granos presentan **propiedades físicas ideales** para su secado, enfriamiento y modelación matemática, dispuestos a granel, debido a la adecuada uniformidad de sus dimensiones físicas en su tamaño, forma y espacio intergranular; su estructura fuerte y los coeficientes de fricción entre los propios granos le permiten su disposición en capas de granos de varias decenas de metros de altura; el valor considerablemente alto y uniforme del área superficial por unidad de volumen de granos y en general sus excelentes propiedades físicas, en las que también se incluyen sus dimensiones reducidas, la alta conductividad y difusividad térmica en su

estado húmedo, facilitan la transferencia de calor y de humedad a bajas temperaturas cuando se hace circular una corriente de aire, bajo condiciones controladas, cuando se disponen en los secadores y en los silos adecuados.

Se ha demostrado en los estudios de secado y de almacenamiento de granos con aire forzado que, cualquiera sea la configuración del secador y los sistemas de almacenamiento, es siempre posible modelar los procesos matemáticamente, mediante ecuaciones. Se obtienen así las variaciones de la humedad y temperatura de los granos y del aire, en cualquier instante y en cualquier posición de los equipos.

Desde que se demostró la validez de estos principios se ha hecho uso intensivo de los modelos matemáticos para diseñar y operar óptimamente los secadores y los sistemas de almacenamiento.

Estos procesos de diseño y de optimización de equipos se han conseguido en tiempos muy cortos, debido a que con la simulación matemática se predice el secado y almacenamiento en tiempos breves y con menos errores, con relación a los procesos reales.

4.9.1. Propiedades físicas

4.9.1.1. Contenido de humedad de equilibrio

El proceso de transferencia de humedad del grano al aire termina cuando **la presión de vapor** del agua en la superficie del grano se iguala con la presión de vapor del aire, evento que puede presentarse si se dispone del tiempo necesario para desarrollarse el proceso. Depende del contenido de humedad del grano, de la humedad y del aire y en temperatura que es igual a la temperatura del aire del grano.

En los secadores mecánicos normalmente no se llega al equilibrio higroscópico, porque no es necesario y porque la humedad de equilibrio podría estar cercana a cero. No obstante, las tasas de secado de los granos dependen esencialmente de los valores "potenciales" de humedad de equilibrio y no podría lograrse la modelación matemática sin el conocimiento de esta propiedad física.

Es posible también que el grano absorba humedad del aire, cuando su presión de vapor en la superficie es menor que la presión de vapor del aire.

Cenicafé ha desarrollado trabajos para la obtención de datos experimentales de equilibrio en los laboratorios, obteniendo ecuaciones que se aproximan con suficiente exactitud a los valores experimentales y utilizado estos modelos para conformar los sistemas de simulación en secado y almacenamiento de café, en éstas dos importantes etapas de la producción y conservación del café. Las curvas de humedad de equilibrio para café pergamino (173) se ampliaron a un rango más amplio de temperatura (10 a 56°C) y de humedad (4 a 26%, en base seca) (107). Mediante la ecuación < 11 > se determina el contenido del humedad (%, base seca) de equilibrio

del café pergamino, como función de la humedad relativa (dec) y la temperatura (°C).

$$M_{eq} = (61{,}030848\,\varphi - 108{,}37141\,\varphi^2 + 74{,}461059\,\varphi^3)e^{(-0{,}037047\,\varphi + 0{,}070114\,\varphi^2 - 0{,}035177\,\varphi^3)\,\theta} \quad < 11 >$$

En donde:

M_{eq} = Contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, (%), b.s.
φ = Humedad relativa, (decimal)
θ = Temperatura del aire, (°C), grados centígrados

Las curvas correspondientes a ésta ecuación se presentan en la Figura 111.

4.9.1.2. Calor latente de vaporización

El calor latente de vaporización del café pergamino es una propiedad física que indica exactamente la **cantidad de calor** necesaria para evaporar el agua contenida en el grano; depende de la temperatura y de la humedad del producto. La relación se obtiene a partir de los datos de humedad de equilibrio (82), la cual está representada por la ecuación < 12 >, de calor latente de vaporización del café pergamino (173):

La expresión obtenida es:

$$L = (2502{,}4 - 2{,}4295\,\theta)\,[\,1 + 1{,}44408\,e^{(-21{,}5011\,M)}\,] \quad < 12 >$$

En donde:

L = Calor latente de vaporización del café pergamino, (kJ/kg)
θ = Temperatura, (°C), grados centígrados
M = Contenido de humedad del café, (decimal) base seca

4.9.1.3. Secado de capa delgada. Difusión de humedad

La capa delgada de café pergamino es un concepto físico-matemático indispensable para referirse a la parte elemental de constitución de una masa de granos dispuesta en un secador o en un silo de almacenamiento, sometida a la acción del aire forzado a través del espacio entre granos. El espesor de la capa delgada puede asumirse como la altura de un grano.

Para obtener en el laboratorio las curvas experimentales de secado de capa delgada se colocan varios granos en una capa delgada sobre una malla perforada y se someten a diferentes condiciones de temperatura y de humedad del aire forzado en un secador de laboratorio. Es deseable colocar **las capas delgadas entre capas espe-**

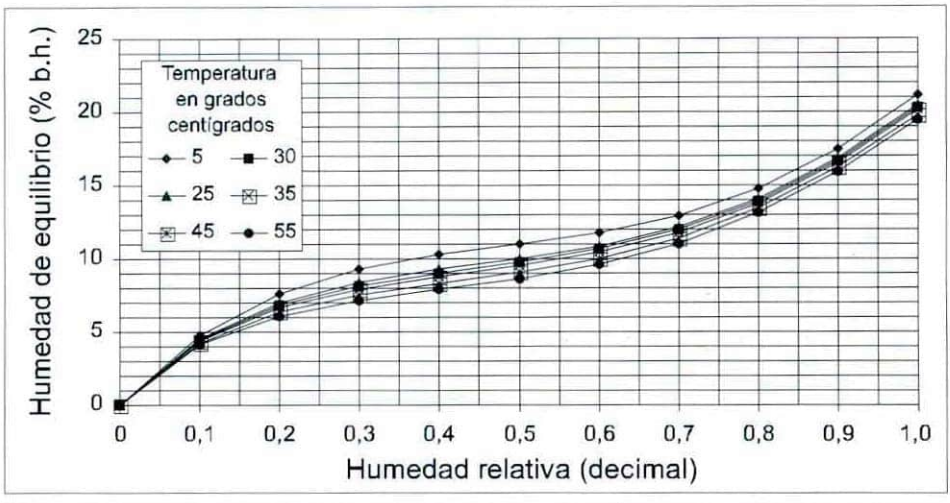

Figura 111. Curva de contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, calculada con la ecuación 11, transformada a base húmeda.

sas, del mismo material, para obtener datos en condiciones más reales de los secadores (87 y 161). Los valores de las variaciones del contenido de humedad del grano con relación a la variación de las condiciones de temperatura y humedad del aire, presentan muy buena correlación en la ecuación semiempírica de capa delgada (154), que ha sido utilizada para café y otros productos (87, 94, 107, 124, 154 y 161). Mediante esta misma tecnología se desarrolló la ecuación de secado de capa delgada para café pergamino (87, 94, 125 y 155). La ecuación de secado de capa delgada en su forma diferencial está dada por :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = - mq (M - M_{eq}) (p_{vs} - p_v)^n t^{q-1} \qquad < 13 >$$

En donde:

$\partial M/\partial t$ = Tasa del cambio del contenido de humedad del grano por unidad de tiempo.

m, n, q = Parámetros de la ecuación de capa delgada, que se obtienen mediante procedimientos de regresión lineal o nolineal, e integración numérica.

M = Contenido de humedad del café en el tiempo "t", (decimal) base seca.

M_{eq} = Contenido de humedad de equilibrio del café, dec., base seca.

p_{vs} = Presión del vapor saturado, (kPa).

p_v = Presión parcial del vapor de agua, (kPa).

t = Tiempo, (horas).

Si las condiciones de temperaturas y humedades son constantes durante el secado,

la ecuación diferencial se puede integrar para obtener la ecuación de secado de capa delgada de café pergamino, integrada para condiciones controladas del aire:

$$\frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = e^{-m\,(p_{vs} - p_v)^n\, t^q} \qquad < 14 >$$

En donde el miembro izquierdo de la ecuación es la razón de humedad y:

M_o = Contenido inicial de humedad, decimal, base seca

e = base de los números naturales = 2,7183

Los valores de m, n y q para el rango 10-70°C y contenidos de humedad del 5 al 55%, base seca, fueron: m = 0,01430; n = 0,87898; q = 1,06439 (Figura 112). La ecuación es válida para los estudios de almacenamiento y secado a altas temperaturas.

Se estudió (106) el fenómeno de difusión de humedad que permite describir el movimiento del agua dentro del café, en lugar de solo manejar los valores promedios, como lo descrito por la ecuación < 13 >. Se utilizó exitosamente la ley de Fick (28) para correlacionar las tasas de secado de café. La ecuación de Fick < 15 > describe la humedad dentro del café pergamino:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -D\,\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{C}{r}\,\frac{\partial M}{\partial r} \qquad < 15 >$$

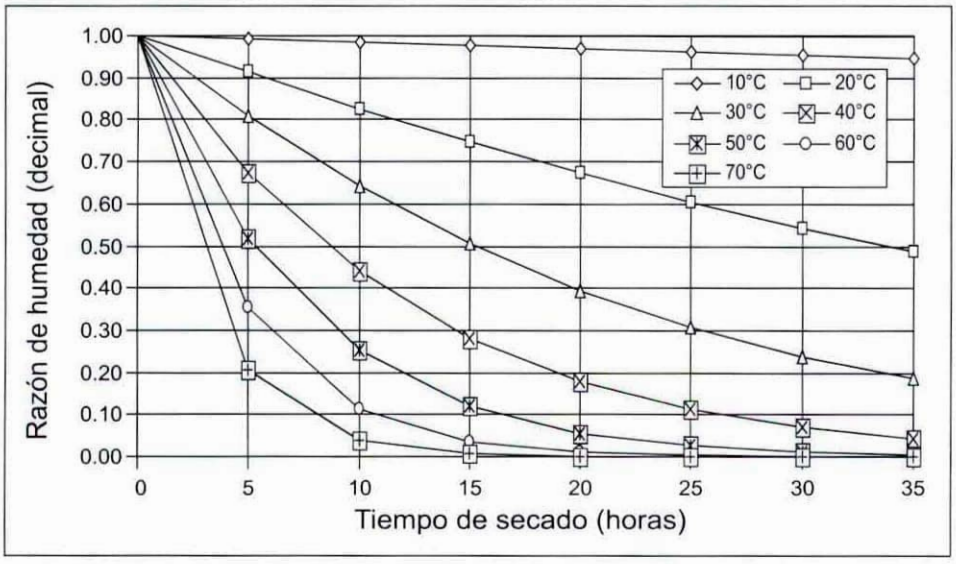

Figura 112. Curvas de capa delgada para secado y almacenamiento de café pergamino. m = 0,01430 n = 0,87898 q = 1,06439, calculada con la ecuación 14.

En donde:

M = Contenido de humedad, b.s.
t = Tiempo de secado, (s)
D = Coeficiente de difusión, ($m^2.s^{-1}$)
r = Coordenada espacial dentro de una esfera, (m).

El **coeficiente de difusión de humedad** de diferentes granos de café se determinó en función del contenido de humedad y de la temperatura del producto; los datos experimentales se obtuvieron de las mediciones del tiempo y del contenido de humedad del grano y del aire, y de la temperatura común del aire y del grano. La cámara experimental utilizada (175) para la toma de datos se construyó en los laboratorios de Cenicafé. El coeficiente de difusión se expresó en función solamente de la temperatura del grano cuando este presenta alto contenido de humedad; como resultado del estudio analítico se obtuvo el coeficiente de difusión de humedad (107).

Se encontró que, al igual que para otros granos, el coeficiente de difusión de humedad dentro del café pergamino depende del contenido de humedad promedio y de su temperatura.

El modelo obtenido, para el coeficiente de difusión de humedad del café pergamino, según ajuste tipo Arrenihus fue:

$$D = 4{,}158210^{-8} e^{(0{,}1346\,\theta + 2{,}2055)\,\overline{M} - \frac{1.184}{\theta + 273{,}16}} \qquad < 16 >$$

En donde:

D = Difusión de humedad, ($m^2.min^{-1}$)
$\overline{M}$ = Contenido de humedad media del grano, (decimal), b.s.
θ = Temperatura del grano, (°C)

El coeficiente alcanza su mayor valor cuando la humedad y la temperatura del café son las más altas.

4.9.1.4. Área superficial

Al considerar el grano de café como una esfera, se obtuvo (107) un área específica de 779,8 m^2 / m^3 para café pergamino, en el rango de humedad del 10% - 25,6% b.h.

En la validación de la metodología utilizada para calcular el área superficial del café pergamino, considerando su forma esférica, y mediante la medida del área del pergamino con el planímetro se observó coincidencia en un 50% con los datos experimentales.

4.9.1.5. Calor específico

La expresión encontrada para calcular el calor específico del café pergamino (107) es:

$$CS = 1{,}3556 + 5{,}7859\ M \qquad < 17 >$$

En donde:

CS = Calor específico del café, (kJ/kg-°K)
M = Contenido de humedad, (decimal), b.s.

4.9.1.6. Densidad aparente

Las densidades aparentes del café pergamino fueron determinadas para diferentes valores de contenidos de humedad (87, 116 y 175).

Se obtuvo una expresión para la densidad aparente del café pergamino como función de su contenido de humedad (106):

$$D_{ap} = 365{,}884 + 2{,}707\ M \qquad < 18 >$$

En donde:

D_{ap} = Densidad aparente del café pergamino, (kg/m^3)
M = Contenido de humedad del café, (%) base seca

4.9.2. Simulación de Procesos Comerciales.

La simulación matemática para el secado y el enfriamiento del café pergamino almacenado ha sido aplicada con éxito en Cenicafé (106, 107, 125, 174). En esos trabajos se presenta la fundamentación físico-matemática de los modelos. En forma general, el trabajo realizado consistió en introducirles las propiedades físicas del café necesarias para construir los modelos de transferencia de calor y de masa basado en los mejores modelos existentes para otros granos.

A los modelos de Thompson (171) y de la Universidad Estadual de Michigan, MSU, (28), se les incorporaron las propiedades físicas del café pergamino obtenidas en los laboratorios de Cenicafé. Los resultados experimentales correspondientes a las experiencias de enfriamiento y de secado fueron comparados con las predicciones de los modelos.

4.9.2.1. Enfriamiento en silos.

La Figura 113 presenta una muy buena predicción de los datos experimentales de enfriamiento de café pergamino seco con las curvas simuladas (174), utilizando el

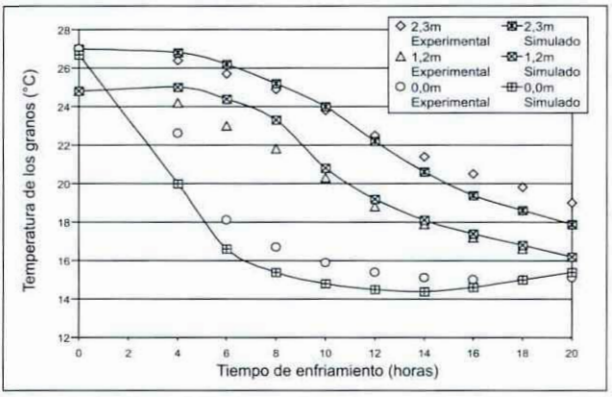

Figura 113. Comparación de datos experimentales y curvas simuladas de enfriamiento (modelo de Thompson) de café pergamino, colocados a granel, en silos. (175).

modelo de simulación de Thompson, correspondientes a tres alturas sobre el nivel del piso del silo de almacenamiento, 0m, 1,2m y 2,3m (Sección 2.3.).

Los silos se construyeron con dimensiones de 0,5 x 0,5 x 2,8m, geométricamente similares a los de las baterías de 60 silos de ALMACAFE, en Bello, Antioquia, de 30m de altura; 6,5m de diámetro, para que los resultados pudieran predecir mejor el funcionamiento de la futura aireación nocturna en cada uno de éstos silos, como en efecto ocurrió posteriormente. Las experiencias de laboratorio se efectuaron variando la humedad del café pergamino entre 8 y 12,5% (b.h.); el rango de temperatura de enfriamiento utilizado estuvo entre 14°C y 22°C: el rango de la humedad relativa entre 65% y 100%; y el del flujo de aire entre 6 y 25m^3/h. En particular, para el ensayo No. 6, cuyos resultados se indican en la Figura 113 (de 11 pruebas efectuadas) se experimentó con una temperatura de enfriamiento de 14,5°C; **humedad relativa de 97,7%**; caudal del aire de 18,7 m^3/h; el volumen del aire utilizado dividido por el volumen del silo fue de 541,1; la temperatura de los granos disminuyó, en promedio desde 26,8°C a 17,4°C y el contenido de humedad del grano varió entre 12,2% (b.h.) a 12,0%, (b.h.), en un tiempo de 18 horas. El modelo de Thompson predijo con **muy buena precisión** los resultados experimentales. Con base a ésta información se procedió en ALMACAFE, a introducir el concepto de aireación nocturna y diurna por períodos de varios días, con valores de la humedad del aire en ocasiones superiores al 90% de humedad relativa, con muy buenos resultados comerciales (76).

4.9.2.2. Secado en capas estáticas

Los Modelos de simulación de secado de granos más utilizados son el Modelo de Thompson y el Modelo de la Universidad de Michigan (MSU). En Cenicafé se han utilizado los dos modelos para predecir el comportamiento del café durante el proceso de secado, en secadores estáticos (Silo secador CENICAFÉ) y en secadores de flujos concurrentes intermitentes (IFC) (106, 124, 125).

En la Figura 114 se presentan los resultados obtenidos experimentalmente y me-

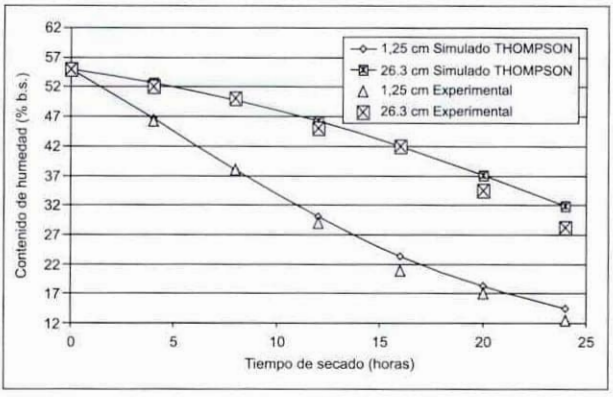

Figura 114. Comparación de datos experimentales y curvas simuladas de secado de café, colocados en capas estáticos a dos alturas diferentes.

diante el modelo de simulación de Thompson (125) para un silo secador CENICAFE (sin inversión del flujo de aire). En ella se observa que el modelo predice bien el proceso de secado en este tipo de secador, presentando un contenido de humedad mayor al experimental en 2% (b.h.), para un tiempo de secado de 24 horas. Durante el proceso, el café redujo su contenido de humedad promedio de 54,9% (b.h.) a 18% b.h., cuando se utilizó una capa de café de 0,33m y un caudal de aire de 23,5m^3/min-m^2 a una temperatura de 45°C.

4.9.2.3. Secado en Secador Intermitente de Flujos Concurrentes

Se utilizaron las ecuaciones de las propiedades físicas del café para conformar el modelo de secado de la Universidad del Estado de Michigan (28). Se demostró la validez del modelo y se le utilizó (106) para hacer el diseño optimizado del secador CENICAFE – IFC. Después de la construcción y evaluación de 4 secadores, incluyendo 3 secadores de capacidad de 4ton, cada uno, de la Central de Beneficio de Anserma, se hizo la verificación de la exactitud de las predicciones.

La Figura 115 presenta los resultados obtenidos experimentalmente y mediante los modelos de simulación de Thompson (125) y MSU (105), para un secador de

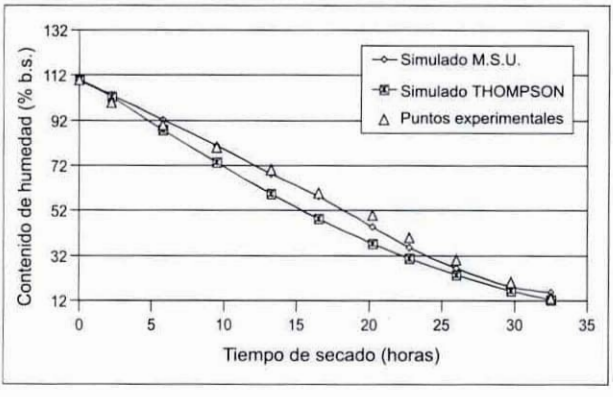

Figura115. Comparación de datos experimentales con curvas de simulación de secado de café pergamino, en secador intermitente de flujos concurrentes, IFC, mediante dos modelos matemáticos (M.S.U. y de Thompson).

flujos concurrentes (IFC), con una altura de la columna de secado de 0,87m y sección transversal de 0,7m. x 0,7m. En ella se observa que los dos modelos de simulación utilizados, **predicen bien el proceso de secado** en este tipo de secador. El modelo de Thompson predice un contenido de humedad final del grano inferior al experimental en 0,5% (b.s.), mientras que el modelo M.S.U. predice un contenido de humedad final del grano superior al experimental en 2,8% (b.s.), para un tiempo de secado de 32,5 horas. Durante el proceso, el café redujo su contenido de humedad promedio de 52,4% en b.h. (110% en b.s.) a 10,3% en b.h. (11,5% en b.s.), cuando se utilizo un flujo de café de 20kg/min-m^2 y un caudal de aire de 48m^3/min-m^2 a una temperatura de 87°C.