

EVALUACION DE DOS VARIABLES DE DISEÑO  
DE UN SECADOR SOLAR DE FRUTA

EVALUACION DE DOS VARIABLES DE DISEÑO  
DE UN SECADOR SOLAR DE FRUTA  
**BIBLIOTECA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**  
ROBERTO ALFREDO PAZ SCHLEIFINGER

Trabajo de investigación presentado para optar  
por el grado académico de licenciatura en  
ingeniería y ciencia de alimentos

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades

EVALUACION DE DOS VARIABLES DE DISEÑO  
DE UN SECADOR SOLAR DE FRUTA

ROBERTO ALFREDO PAZ SCHLESINGER

Trabajo de investigación presentado para optar  
al grado académico de licenciatura en  
ingeniería y ciencia de alimentos

Guatemala

1987

Vol. 82 :

(3) Ingeniero Oscar Gil G.  
Asesor

Tribunal

(4) Ingeniero Oscar Gil

Agradezco al Ingeniero Oscar Gil,  
al señor Julio Aguilar y en  
especial a mi amigo Héctor Ochoa  
por su desinteresada colaboración.

(5) Licenciado Roberto de los Rios

(6) Ingeniero Celso Escalza

Fecha de aprobación. 15 de Julio de 1987

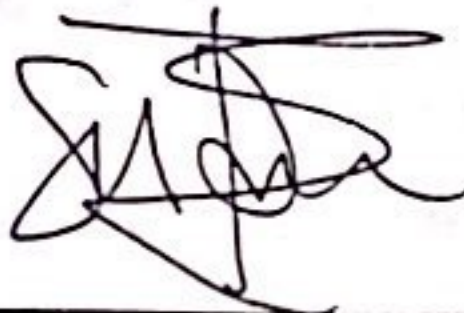
Vo. Bo.:



(f)

Ingeniero Oscar Gil G.  
Asesor

Tribunal



(f)

Ingeniero Oscar Gil

(f)

Licenciado Roberto de León

(f)

Ingeniero Celedonio Loaiza

Fecha de aprobación: 15 de julio de 1987

## PREFACIO

Se utilizó un secador solar indirecto de fruta para obtener así información pertinente a su operación. Dicho secador está ubicado en Xecaracoj, un cantón a unos 8 kilómetros al sur de la ciudad de Quezaltenango. Se utilizó el banano coco (*Musa sapientum*) en la evaluación. La cantidad de banano fue un factor limitante en el estudio, por lo que no fue posible evaluar el secador operando a su capacidad máxima. El trabajo experimental se realizó en el período del 2 al 19 de diciembre de 1986.

Se evaluaron los siguientes parámetros: entrada del aire fresco al secador, insolación total, temperatura alcanzada dentro del secador en función de la insolación (con 100% y 75% del área total del colector funcionando), curvas de secado, determinación cualitativa de los principales sitios de intercambio de aire.

Se estableció que existen fugas de aire caliente en la parte alta del colector y entradas de aire fresco en las rendijas de las puertas del secador. Por métodos indirectos se estimó que la entrada de este aire fresco decrece exponencialmente al decrecer la humedad de la fruta. Aunque no fue posible establecer la humedad mínima a que es posible dejar el producto, se llegó a obtener un

producto con 20% de humedad (en base húmeda).

La insolación promedio durante el período de evaluación fue de 48 Langley/hora, la temperatura promedio alcanzada dentro del secador de 41°C y la humedad relativa de 38.5%.

La temperatura dentro del secador puede predecirse en base a la insolación mediante una ecuación lineal con una buena correlación. Existe una diferencia significativa en la temperatura alcanzada dentro del secador con el 100% y el 75% del colector solar.

Con el secador cargado a 50% de su capacidad máxima, el banano entero se seca en 4 días (o 3 días si las condiciones de insolación mejoran) mientras que el banano partido por la mitad puede secarse en un día y medio.

El alcance de este trabajo no incluye un análisis de la calidad del producto final, aunque se da por un hecho que ésta es aceptable, dada la receptividad de los usuarios. Se enfocan básicamente las variables de diseño del secador y se describen sus características de operación.

A.	Secador	16
B.	Carrros portahojas	17
C.	Equipo de medición	18
D.	Fruta para el procesamiento	19
E.	Metodología	21
1.	Fabricación de la entrada de aire fresco	21
2.	Curvas de secado	24

LISTA DE CUADROS Y GRÁFICOS

Cuadro	Página
6.1 Secado de banana en diferentes condiciones	24
<b>VI. RESULTADOS</b>	<b>30</b>
6.2 A. Entrada de aire fresco	30
B. Curvas de secado	31
<b>VII. DISCUSION DE RESULTADOS</b>	<b>47</b>
5.1 A. Circulación de aire	47
5.2 B. Curvas de secado	51
5.3 C. Calidad del producto y velocidad de secado	56
<b>VIII. CONCLUSIONES</b>	<b>58</b>
<b>IX. RECOMENDACIONES</b>	<b>60</b>
<b>X. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>62</b>
6.3 APENDICE	40
6.4 A. Glosario	64
6.5 Curva de secado en cámara 4	40
6.6 Curva de secado en cámara 1 (punto por punto)	41
6.7 Curva de secado en cámara 1 (7.4 del colector)	42
6.8 Curva de secado (todas las cámaras)	43
6.9 Diagrama de curva A.6	44
6.10 velocidad de secado	46

## LISTA DE CUADROS Y GRAFICOS

Cuadro		Página
6.1	Secado de banano en diferentes condiciones	34
6.2	Insolación y temperatura promedio	35
6.3	Resumen de resultados experimentales	36
Gráfico		
5.1	Dibujo en corte del secador	26
5.2	Dibujo en planta del secador	27
5.3	Detalle del colector	28
5.4	Dibujo en elevación de carros portabandejas	29
6.1	Entrada de aire fresco vrs. humedad de fruta	38
6.2	Curva de secado en carro 1 (100% del colector)	39
6.3	Curva de secado en carro 2	40
6.4	Curva de secado en carro 3	41
6.5	Curva de secado en carro 4	42
6.6	Curva de secado en carro 1 (punto por punto)	43
6.7	Curva de secado en carro 1 (75% del colector)	44
6.8	Curva de secado (todos los carros)	45
6.9a	Segmento de curva 6.6	46
6.9b	Velocidad de secado	46

## I. INTRODUCCION

### A. Secado y secadores solares

1. Generalidades sobre secado de alimentos. El secado es un proceso utilizado para la preservación de productos agrícolas. En la mayoría de los diversos países productores, existe una intensa preocupación por extender y perfeccionar la industria de la fruta desecada.

El secado de un producto consiste en extraerle parte del agua que naturalmente contiene cuando ya ha alcanzado su madurez fisiológica, hasta que solo contenga la humedad que permita almacenarlo durante un período largo en condiciones ambientales ordinarias, y sin que pierda sus propiedades nutricionales y organolépticas.

La masa de agua que se remueve en el proceso de secado puede llegar a ser hasta cinco veces la masa total del producto seco, tal como ocurre con los productos de muy alta humedad inicial. En el producto ya secado, a causa de que cesan casi totalmente sus actividades metabólicas, se dan condiciones desfavorables para el desarrollo de microorganismos. De aquí que la preservación de alimentos por secado está basada en el hecho que los microorganismos y enzimas necesitan agua para estar activos. Al preservar

alimentos por este método, se busca bajar el contenido de humedad del alimento a un punto donde se inhibe la actividad de los microorganismos responsables de la putrefacción y producción de toxinas.

Aunque algunos microorganismos mueren durante el proceso de secado, no es el proceso en si mismo letal para los microorganismos y aún pueden ser recuperados varios tipos de ellos de los alimentos secos, especialmente si se parte de alimentos de mala calidad o no se observan normas de higiene.

En la ausencia de crecimiento de hongos, los alimentos están sujetos a cambios químicos que pueden ser indeseables. Jay presenta cuatro métodos para minimizar los cambios químicos en alimentos secos: 1) mantener el contenido de humedad tan bajo como sea posible; 2) reducir el nivel de azúcares reductores; 3) si se blanquea, usar agua cuyo contenido de sólidos solubles blanqueados se mantenga bajo. Si no se renueva el agua con que se blanquearon vegetales antes de volver a blanquear una nueva tanda, los azúcares reductores y aminoácidos extraídos anteriormente se impregnan en la superficie del producto tratado en niveles muy altos; 4) el uso de dióxido de azufre.

Los alimentos pueden ser secados a) con aire caliente, b) con vapor supercalentado, c) con vacío, d) con gases

inertes y e) mediante la aplicación directa de calor. Sin embargo, el aire es el método generalmente empleado industrialmente por las siguientes razones: es más barato y conveniente de instalar y operar desecadores que utilicen aire como medio secante; fácilmente se controla y evita el sobrecalentamiento; el aire puede utilizarse para conducir calor al producto y para conducir la humedad liberada del mismo; el uso de aire permite el secado gradual y así evita pérdidas de jugos por goteo.

Las dos funciones del aire en el secado son la transferencia de calor del elemento calefactor al producto y la transferencia de humedad a la atmósfera exterior.

Lo que en realidad produce la evaporación es el calor y no el aire. Se requieren 1000 BTU para cambiar una libra de agua a vapor, lo que se conoce como calor latente de vaporización del agua. Sin embargo, se ha mostrado que la velocidad de evaporación del agua de una superficie libre es directamente proporcional a la velocidad del aire si los demás factores se mantienen constantes (Cruess). Esto es debido a que la transferencia de masa se acelera con el movimiento relativo del aire.

La recirculación del aire en el secado de frutas es un factor importante. Si el aire que ha servido para secar la fruta se deja escapar a la atmósfera, se puede perder una gran cantidad de calor. Por lo tanto, el aire caliente que

sale del secador se recalienta y se mezcla con cierta proporción de aire fresco. Sin embargo, la recirculación no se usa en todos los casos, pues solo es ventajosa para las frutas; mientras que para las hortalizas es inconveniente (Bergeret).

Por último se considera la marcha de la deshidratación: la pérdida de humedad es alta en el primer período de desecación y desciende a medida que el producto se va deshidratando. Durante el período inicial de la desecación, la superficie del producto está húmeda. Se produce una transferencia de la humedad de los tejidos internos al exterior de la fruta a medida que se evapora la humedad de la superficie. Ya cerca del final de la desecación, la difusión de la humedad es lenta, por lo que el aire caliente del secador tiene dificultad para extraer la humedad del producto (Bergeret).

2. Secado de Frutas. La fruta es un producto eminentemente alterable; después de la cosecha prosigue su ciclo biológico, continuando la maduración con sus reacciones químicas y enzimáticas hasta llegar a la sobremaduración. Por otra parte, la fruta puede ser asiento de bacterias, levaduras, mohos e insectos que la atacan y aceleran su descomposición.

La reducción del contenido de humedad de la fruta hasta

llegar a actividades de agua ( $a_w$ ) inferiores a 0.75 (0.70 es el valor usual de la fruta deshidratada) impide la proliferación de bacterias gram negativo y la de la mayoría de las gram positivo con la excepción de cocos, algunos formadores de esporas y lactobacilos. Además del efecto inhibitorio de la reducción de  $a_w$ , la actividad antimicrobiana resulta de una interacción combinada del pH, el potencial de óxido-reducción (que cambian por la concentración de los elementos químicos en disolución), los aditivos añadidos y la microflora competitiva (Jay).

Las ventajas que ofrece la desecación de la fruta pueden resumirse en los siguientes puntos: 1) permite aprovechar la fruta cuando el precio es bajo, 2) permite regular el mercado en los períodos de sobreproducción, 3) hace que el consumo se prolongue durante todo el año, 4) se disminuye el peso y el volumen de la fruta, haciendo así más fácil su transporte, 5) su valor alimenticio por unidad de peso es mayor que el de cualquier otra fruta en cualquier otra forma que sea preparada.

La oxidación de las frutas y la reacción continua de las enzimas, provocan el oscurecimiento cuando se cortan y exponen al aire. Si no se trata la fruta para reducir el oscurecimiento y la reacción enzimática, el empardeamiento seguirá durante el proceso y almacenamiento. Esto puede provocar pérdida del sabor y de vitamina A y C.

En relación a los tratamientos químicos aplicados al producto, se mencionan:

- Tratamiento con dióxido de azufre que puede lograrse de dos formas; 1) exponiendo la fruta al dióxido de azufre gaseoso o 2) por inmersión de la fruta en una solución de bisulfito de sodio. Cualquiera de las formas de este tratamiento, son las más efectivas para retardar la oxidación y la descomposición.

- Blanqueo en almibar (entre 40 y 60% de azúcares). Se mantiene un buen color en la fruta, pero resulta más dulce y de textura más suave que las frutas sulfuradas o sulfitadas. Además la pérdida de vitamina A y C es mayor.

- Blanqueo por vapor. Destruye el sabor natural y la textura de la fruta y mucho de la vitamina A y C. Es el método menos efectivo para pretratar fruta para secado (De Long).

- Inmersión en ácido ascórbico (vitamina C) para reducir al mínimo la oxidación de la fruta, ya que actúa como antioxidante. Suele utilizarse disuelto en jarabe de azúcar, en proporciones de 0.02 a 0.05%.

### 3. Principios básicos de captación de energía solar.

La forma de captación más importante, tanto desde el punto de vista de su magnitud como desde el punto de vista de su eficiencia, ocurre en las plantas verdes; éstas reciben la

luz solar, la captan y luego la aprovechan en el proceso de fotosíntesis mediante el cual la energía luminosa es transformada en energía bioquímica.

Los dispositivos hechos por el hombre para captar la energía solar se denominan genéricamente colectores solares. Un colector solar es un equipo diseñado para absorber la radiación solar y transferir la energía a un fluido que circula en su interior y que está en contacto con él. El agua y el aire son los fluidos generalmente empleados en los colectores solares.

Se clasifican los colectores solares en dos tipos: planos y concentradores. Los primeros aprovechan tanto la insolación directa como la insolación difusa; es decir, pueden funcionar tanto en días claros como en días nublados. Los colectores concentradores utilizan únicamente la radiación solar directa y tienen la ventaja de que pueden producir temperaturas más altas que las que producen los colectores planos. Los colectores planos pueden instalarse fijos en su posición, aunque a veces pueden ser movidos cada cierto tiempo para ajustarlos según sea la estación del año o la posición instantánea del sol (heliostatos); los colectores concentradores casi siempre se instalan de manera que puedan moverse durante el día o periódicamente, para seguir el curso del sol.

Existen dos conceptos fundamentales en el estudio de la

captación de la energía solar: cuerpo negro y efecto de invernadero.

Si un cuerpo oscuro y ligeramente rugoso se interpone en la trayectoria de la luz, se consigue atrapar parte de la energía transportada por los rayos luminosos. A todo material que atrape energía solar en ésta forma se le llama "placa negra" o "cuerpo negro". Un "cuerpo negro perfecto" es un ente capaz de absorber toda la energía que incida sobre él.

El mecanismo de captación de energía, en forma simplificada es el siguiente: Los rayos solares (predominantemente de los espectros visible y ultravioleta) al chocar con un cuerpo, ceden parte de su energía a los electrones exteriores de éste. Esta energía aumenta la amplitud de la vibración de los átomos del cuerpo y lo calienta progresivamente. El remanente de energía que no es absorbido, es devuelto o reflejado en forma de ondas de mayor longitud (rayos infrarrojos).

Por otra parte, los materiales transparentes (vidrio, plástico) permiten el paso de las ondas luminosas visibles y ultravioleta, pero no el de todas las radiaciones infrarrojas. Por eso, si una cámara cerrada tiene paredes transparentes, y en el fondo un absorbedor, la luz ingresa a través de las paredes y es parcialmente absorbida por aquél, en tanto que los rayos no absorbidos se reflejan

como ondas infrarrojas que no pueden salir de la cámara, ya que las paredes no lo permiten. Estas ondas infrarrojas quedan atrapadas y calientan el aire del ambiente del interior de la cámara. Este es el llamado efecto de invernadero.

Un colector solar está integrado por diferentes componentes:

- La cubierta transparente: consiste en una o varias placas transparentes de vidrio o de material plástico. Su función es triple: 1) provocan el efecto invernadero, 2) reducen las pérdidas de calor del aire encerrado y 3) protegen al absorbedor de los efectos de la intemperie.

- El absorbedor: capta energía y cambia la longitud de onda de los rayos incidentes que resultan reflejados de su superficie. Suele construirse con uno de los siguientes materiales: placas metálicas, plástico negro, arena, rocas, cemento, etc. (Aplicaciones de Energía Solar).

Los secadores solares en general, pueden clasificarse como directos, indirectos y mixtos. Cada una de estas clasificaciones pueden subdividirse en activos y pasivos.

Son directos cuando el producto a secar está expuesto directamente a los rayos del sol, recibiendo un calor adicional, al que le proporciona el aire circundante.

Son indirectos, cuando solamente el aire le transfiere energía calorífica al sólido, estando éste en una cámara

como ondas infrarrojas que no pueden salir de la cámara, ya adyacente al colector, cuyas paredes son opacas a la luz que las paredes no lo permiten. Estas ondas infrarrojas quedan atrapadas y calientan el aire del ambiente del interior de la cámara. Este es el llamado efecto de invernadero.

Un colector solar está integrado por diferentes componentes:

- La cubierta transparente: consiste en una o varias placas transparentes de vidrio o de material plástico. Su función es triple: 1) provocan el efecto invernadero, 2) reducen las pérdidas de calor del aire encerrado y 3) protegen al absorbedor de los efectos de la intemperie.

- El absorbedor: capta energía y cambia la longitud de onda de los rayos incidentes que resultan reflejados de su superficie. Suele construirse con uno de los siguientes materiales: placas metálicas, plástico negro, arena, rocas, cemento, etc. (Aplicaciones de Energía Solar).

Los secadores solares en general, pueden clasificarse como directos, indirectos y mixtos. Cada una de estas clasificaciones pueden subdividirse en activos y pasivos.

Son directos cuando el producto a secar está expuesto directamente a los rayos del sol, recibiendo un calor adicional, al que le proporciona el aire circundante.

Son indirectos, cuando solamente el aire le transfiere energía calorífica al sólido, estando éste en una cámara

adyacente al colector, cuyas paredes son opacas a la luz del sol y le impiden todo contacto con el sólido.

Son mixtos, cuando se combinan los dos mecanismos anteriores.

Son pasivos cuando el movimiento del aire es provocado únicamente por los cambios de densidad y las diferencias de presión entre el interior y el exterior del aparato.

Son activos cuando el movimiento del aire se produce por la acción de ventiladores u otros mecanismos que incrementen la velocidad del aire dentro del secador.

#### B. El Sol, fuente de energía

El Sol es la estrella más cercana a nuestro planeta. Dentro de él se producen reacciones de fusión nuclear que liberan inmensas cantidades de energía. Las altas temperaturas alcanzadas en su superficie (5800 a 6300°C), permiten que emita hacia el espacio, en forma de ondas electromagnéticas, la energía liberada por los procesos nucleares. Aunque a la Tierra solo llegan unas dos billonésimas partes de ésta energía, a ella se puede atribuir casi la totalidad de los procesos meteorológicos y biológicos que se desarrollan en la Tierra.

El espectro visible e infrarrojo cercano constituyen un 86% de la energía solar que llega a la atmósfera y se ve sujeta a reflexiones, refracciones, absorciones y a

irradiación hacia el espacio exterior (por nubes, gases, polvo).

Debido a la variabilidad de la energía en diferentes puntos de la Tierra, se llegó a establecer la llamada Constante Solar. Esta representa la cantidad mayor de calor teóricamente aprovechable por unidad de área y por unidad de tiempo, medida fuera de la atmósfera terrestre. La Constante Solar es:  $1.94 \text{ cal/cm}^2\text{-min} = 1353 \text{ vatios/m}^2 = 429 \text{ BTU/pie}^2\text{-hora}$ .

La insolación es la cantidad de energía solar recibida por la unidad de área en la unidad de tiempo. Existen varios tipos de insolación:

- La insolación directa es toda aquella radiación que llega en línea recta desde la fuente (el Sol). Se caracteriza porque forma sombras fuertes y bien delimitadas.

- La insolación difusa es aquella radiación que no procede directamente de la fuente porque ha sufrido refracciones o reflexiones en objetos distantes. No produce sombra y parece provenir de todo el cielo. En días claros se puede considerar que el 20% de la insolación es difusa y en días nublados la insolación es totalmente difusa.

- La insolación reflejada es la que llega rechazada por superficies de cuerpos sólidos cercanos (edificios,

nóculos, etc.) o por superficie terrestre (nieve, lagos, asfalto, etc.)

La insolación es una energía de baja intensidad, por lo que se requieren superficies relativamente extensas para captarla. Además su intensidad es variable e intermitente pues sólo está disponible en horas del día.

Hay factores que afectan el grado de insolación como el número de horas sol, que es el tiempo que dura la iluminación solar, expresado en horas, y el ángulo de incidencia. La insolación óptima es aquella que es perpendicular a la superficie considerada. Estos factores dependen directa o indirectamente de condiciones tales como: latitud, configuración orográfica, época del año, nubosidad, altitud, contaminación atmosférica y otros.

Por último cabe mencionar las ventajas de la energía solar:

- a) es la más "limpia" de todas las formas de energía: no produce contaminación.
- b) es abundante en casi todo el mundo y no está sujeta a restricciones de origen humano.
- c) es gratuita.

## II. ANTECEDENTES

La evaporación es un fenómeno natural que consiste en un cambio de estado en el que una sustancia en estado líquido pasa al estado gaseoso en forma de vapor. Ocurre en todos los líquidos y su velocidad depende de tres factores principales: volatilidad, temperatura del líquido, y porcentaje de humedad en el ambiente.

Entre los usos en que puede aprovecharse la energía solar, como productora de evaporación están: secado de productos agrícolas, producción salinera y producción de agua destilada.

Las condiciones del proceso de evaporación están influenciadas directamente por la intensidad de la radiación solar, así como por la temperatura y humedad del medio ambiente. En el secado de productos agrícolas, si el producto se confina a un compartimiento cerrado y se mejoran las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire de secamiento, se acelerará el proceso (Farral; Aplicaciones de Energía solar, ICAITI).

El secado solar de productos agrícolas se realiza ya sea por el método natural que consiste en la exposición de la materia húmeda a las corrientes naturales de aire y a los rayos solares o por secado artificial que consiste en

tratar el producto húmedo en un secador en el que una corriente de aire que ha sido calentado, lo seca.

Cuando el aire es calentado, se reduce su humedad relativa, y pasa a ser un "aire seco". Este aire seco tiene la propiedad de poder absorber humedad de un cuerpo con el cual se le ponga en contacto.

Entre los diversos productos que pueden secarse con secadores solares, están: granos (maíz, frijol, arroz, café, cacao, etc.), vegetales (ajo, cebolla, papa, etc.), frutas (banano, piña, uva, melocotón, etc.), carnes (pescado, res, etc.), leña, madera aserrada.

En Centroamérica, el Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI) ha estado experimentando desde hace casi una década con diferentes modelos de secadores solares para distintos usos y condiciones.

Desde un punto de vista técnico, los secadores solares de alimentos han dado buenos resultados. Sin embargo, desde el punto de vista económico, no todos los tipos de secadores solares para granos básicos son funcionales. Otros granos como el café y el cacao ya están siendo secados con el uso de secadores solares.

### III. JUSTIFICACIONES

1. La descomposición de los alimentos ha representado un problema para el hombre desde el momento que observó sus efectos, tanto en los productos frescos-crudos, como en los alimentos procesados por él.

Los esfuerzos que se realizan para evitar la descomposición de los alimentos producen un beneficio inmediato. Es decir, el costo que amerita conservar un alimento se compensa con el alargamiento de la vida útil del mismo. Esto es especialmente valedero para los alimentos perecederos.

La deshidratación de fruta es una alternativa viable para la conservación de dicho alimento, y la energía solar un recurso altamente disponible para tales fines en países como Guatemala.

2. Actualmente en el área centroamericana se han desarrollado varios modelos de secadores solares, pero aún se cuenta con poca información técnica concerniente al resultado de éstos diseños. De hecho el modelo del secador utilizado en este estudio fue construido como una adaptación de modelos similares que se han hecho para el secado solar de madera, siendo solo similares en la forma de captar y distribuir la energía.

Se pretende con este trabajo dejar escritas, aparte de los resultados, conclusiones y recomendaciones para construcciones futuras de este tipo de secadores.

En el presente se describen el área de colector y de evaporador de la zona de estudio de este trabajo.

### Objetivos

El primer objetivo es determinar la influencia de la temperatura ambiente en la velocidad de secado del producto.

El segundo objetivo es determinar la influencia de la velocidad del viento en la velocidad de secado del producto.

El tercer objetivo es determinar la influencia de la humedad relativa en la velocidad de secado del producto.

El cuarto objetivo es determinar la influencia de la altura del colector en la velocidad de secado del producto. Para esto se realizaron curvas de secado con el 10% y el 70% del área del colector funcionando.

El quinto objetivo es determinar la influencia de la temperatura ambiente en la velocidad de secado del producto. Para esto se realizaron curvas de secado con el 10% y el 70% del área del colector funcionando.

El sexto objetivo es determinar la influencia de la velocidad del viento en la velocidad de secado del producto. Para esto se realizaron curvas de secado con el 10% y el 70% del área del colector funcionando.

#### IV. OBJETIVOS

##### A. General

Estudio de un secador solar indirecto para fruta, con énfasis en dos aspectos: a) área de colector y b) estimación de la tasa de cambio de aire fresco.

##### B. Específicos

- Buscar la correlación entre la entrada de aire fresco y la humedad del producto.
- Determinar los principales sitios de purga de aire húmedo y entrada de aire fresco.
- Estimar la entrada de aire fresco con el 100% del colector funcionando y con el 25% del área bloqueada.
- Determinar si la insolación es un factor crítico en el secado del banano al utilizar diferente área del colector. Para esto se construyen curvas de secado con el 100 y el 75% del área del colector funcionando.
- Predecir la temperatura dentro del secador en función de la insolación y determinar si la diferencia obtenida al utilizar solo el 75% del colector es o no significativa.
- Sentar precedentes en la obtención de datos de ingeniería básica en este tipo de secadores indirectos para fruta.

## V. MATERIALES Y METODOS

### A. Descripción del secador solar

El modelo del secador tipo paquete utilizado está en la figura 5.1 y 5.2. Por su diseño, se le dió el nombre de secador tipo paquete y tiene la ventaja de ser modular, esto es, que puede ampliarse o reducirse por módulos o secciones.

1. Secador. El secador puede dividirse, para fines de descripción, en el colector, la cámara de secado y el cuarto de preparación de la fruta.

El colector hace las veces de techo y el cuerpo negro lo constituye un cielo falso de lámina de hierro galvanizado pintada negro mate. El techo propiamente del cuerpo colector son 64 vidrios claros de 3 mm de ancho montados sobre un angular y sellados con masilla para vidrio. Los rayos solares inciden sobre la lámina y esta energía es aprovechada para calentar el aire que recircula entre la cámara de secado y el colector.

La cámara de secado es el lugar donde se lleva a cabo el proceso de deshidratación de la fruta. El aire que baja caliente del colector, sube por convección a través de las bandejas cargadas con la fruta y es de nuevo forzado mediante ventiladores de 9 Watt (cuatro en total, uno por

cada carro portabandejas) hacia la parte inferior del cuerpo del colector. El aislante térmico de esta cámara es paja de trigo y está colocado dentro de las paredes, dentro de las puertas y debajo del piso de madera.

El área de preparación de la fruta abarca el área restante que queda debajo del colector y no es ocupada por la cámara de secado. Es en realidad un pequeño cuarto que está protegido del viento, el polvo, el sol y la lluvia. En él se prepara la fruta y se cargan las bandejas.

Un diagrama en corte y uno en planta pueden verse en las figuras 5.1, 5.2 y un detalle del colector en la 5.3.

(Nota: el material de construcción fue adquirido localmente)

2. Carros portabandejas. En total son cuatro carros donde se colocan las bandejas con el producto a ser secado. Estos se colocan en un orden secuencial dentro de la cámara de secado y, para fines de este estudio, fueron numerados del uno al cuatro comenzando en uno de los carros del extremo. Su colocación dentro del secador puede verse en la figura 5.2. Cada carro consta de ocho bandejas cuadradas de  $0.85 \times 0.85$  m, con superficie de malla de alambre de 12.5 mm. Las bandejas fueron numeradas del uno al ocho y las determinaciones de pérdida de peso durante las corridas se hicieron en la número 2, 5 y 7. El plano en

La elevación de estos carros puede verse en la figura 5.4.

También se colocó un banco de banco para el día. También se colocó un banco de banco longitudinalmente.

### B. Equipo de medición

El equipo consiste en:

- Piranómetro marca Eppley modelo 8-48 y un integrador de los registros del piranómetro, marca Li-cor modelo LI-550 para el registro diario de insolaciones por períodos de una hora.

- Seis termopares conectados a un convertidor central.

- Un Anemómetro para registrar velocidades de viento superiores a 2 m/s.

- Balanza marca Ohaus modelo 1119 D para veinte kilos con sensibilidad de un gramo para registrar cambios de peso en la fruta durante el secado.

- Lámpara infrarroja con balanza para determinaciones de humedad en la fruta.

- Recipientes plásticos para agua. Estos con el propósito de mantener húmeda la gasa del bulbo húmedo.

- Gasa.

El termopar que servía para registrar la temperatura de bulbo húmedo fue envuelto en

### C. Fruta para el procesamiento

Se utilizó el banano coco (Musa sapientum) cuya cáscara ya presentaba cierta coloración café sobre el amarillo. Si el banano está ligeramente verde, al secarse, su sabor no es tan dulce y su textura es dura (De Long).

Se preparó pelándolo manualmente y colocándolo en las bandejas sin que un banano tocara al otro. También se experimentó con banano partido longitudinalmente.

#### D. Metodología

1. Estimación de la entrada de aire fresco. Debido a que el flujo de aire en la bajada del colector era menor de 2 m/s no fue posible registrar con el anemómetro su velocidad. Debido a esta limitación, se recurrió a un método indirecto.

Se instalaron las terminales de los termopares en distintos lugares del secador:

- a) a la salida del colector (en la entrada al secador),
- b) en la entrada del colector (en la salida del secador, después de los ventiladores de extracción) y
- c) en la parte de afuera del secador propiamente, pero dentro del área de preparación a 50 cm. del secador.

En cada lugar de estos, se colocó un par de sensores: uno para registrar la temperatura de bulbo seco y otro para la de bulbo húmedo. El termopar que serviría para registrar la temperatura de bulbo húmedo fue envuelto en una gasa. Esta gasa se dejó con un excedente inmerso en un recipiente con agua para mantenerla húmeda durante todo el día. Este recipiente se llenaba por las mañanas.

Al inicio de la corrida se cargaron y pesaron bandejas

con banano pelado y cuando el carro estaba lleno y listo para ingresar al secador, se procedió a tomar las lecturas de bulbo seco y bulbo húmedo en cada punto antes mencionado. Seguidamente se ingresó el carro al secador y se registró la hora y fecha de ingreso.

Cada dos horas se tomaron las lecturas de temperatura (bulbo húmedo y seco) en los puntos a), b) y c).

Al final de la tarde (entre 16:30 y 17:00 hr.) se volvió a sacar el carro y se pesaron las bandejas 2, 5 y 7. Se registró el peso y se volvieron a ingresar al secador. Cada día se repitió el proceso hasta obtener un producto con 30% o menos de humedad en base húmeda (por razones del tiempo asignado para el trabajo, no pudo llevarse toda la fruta hasta un 20% de humedad como normalmente se comercializa la fruta).

Como uno de los objetivos generales de este trabajo fue el estudio del área de colector de este secador, tanto la estimación de circulación de aire fresco como la obtención de las curvas de humedad, se hicieron utilizando el 100% y el 75% del área del colector. Para bloquear el 25% del área de colección, se utilizó plástico de polietileno negro que se colocó y sujetó sobre el techo de vidrio del secador. Aparte de esta pequeña variante, la metodología no varió tanto en la estimación del aire fresco como en la obtención de curvas de secado.

La fórmula de cálculo del aire de entrada puede plantearse de la siguiente manera:

$$Ae = (Ha_{\text{sal}} - Ha_{\text{ent}}) * As + Ha_{\text{ent}} \quad \text{ec. 5.1.}$$

donde

Ae: agua evaporada

$Ha_{\text{sal}}$ ,  $Ha_{\text{ent}}$ : humedades absolutas de salida y entrada al secador  
(se toman los promedios del día)

As: masa de aire fresco (promedio del día)

$Ha_{\text{ent}}$ : humedad residual en el secador: humedad en la tarde - humedad en la mañana.

Para calcular  $Ha_{\text{ent}}$ , se necesitan los datos de densidad del aire húmedo en el momento considerado, así como el volumen total del interior del cuarto de secado. Con estos datos y la humedad absoluta y temperatura del aire, se calcula la masa de agua que se encuentra dentro del secador.

Para obtener la humedad absoluta a partir de las temperaturas de bulbo seco y húmedo, hubo necesidad de recurrir a la carta psicrométrica elaborada para una atmósfera de presión y corregir por la diferencia de presión debido a la altura (2,380m).

El agua evaporada durante el día se obtiene sustrayendo el peso de la fruta que se obtuvo en la tarde al peso que se obtuvo en la mañana.

Teniendo cuatro de las cinco variables en la ecuación,

se procede a despejar la incógnita, en este caso la masa de aire fresco que entró en el secador durante el día.

Ya que la masa de aire que entra no es un dato medible fácilmente, se transformó este dato a flujo volumétrico de la siguiente manera:

$$Fv = As / (\rho_o * t) \quad \text{ec. 5.2}$$

donde  $\rho_o$  es la densidad del aire fresco en la que se realizó el trabajo experimental.

Fv: flujo volumétrico de aire de entrada entre las 0:00 y las

As: masa de aire de entrada durante un tiempo t

$\rho_o$ : densidad del aire fresco, tomando en cuenta la temperatura promedio y la humedad promedio durante el tiempo t.

t: tiempo desde que se iniciaron hasta que finalizaron las mediciones durante el día.

Este dato de flujo volumétrico se graficó en el eje "Y" de un papel semilogarítmico versus la humedad porcentual de la fruta (en base húmeda).

2. Curvas de secado. Después de cargadas las bandejas de la manera antes descrita, se pesaron las bandejas 2,5 y 7, se registró el tiempo de inicio y se ingresó el carro al secador. Cada dos horas se extrajo el carro para volver a pesar las bandejas 2,5 y 7, y se reingresó al secador. Este procedimiento se repitió los días que fue necesario

hasta tener una fruta con por lo menos una humedad de 0.5 (50%) en base seca (33% en base húmeda).

Para estudiar la relación entre la insolación y la temperatura de bulbo seco alcanzada en el secador, también se registró la temperatura de bulbo seco en la entrada del colector cada dos horas.

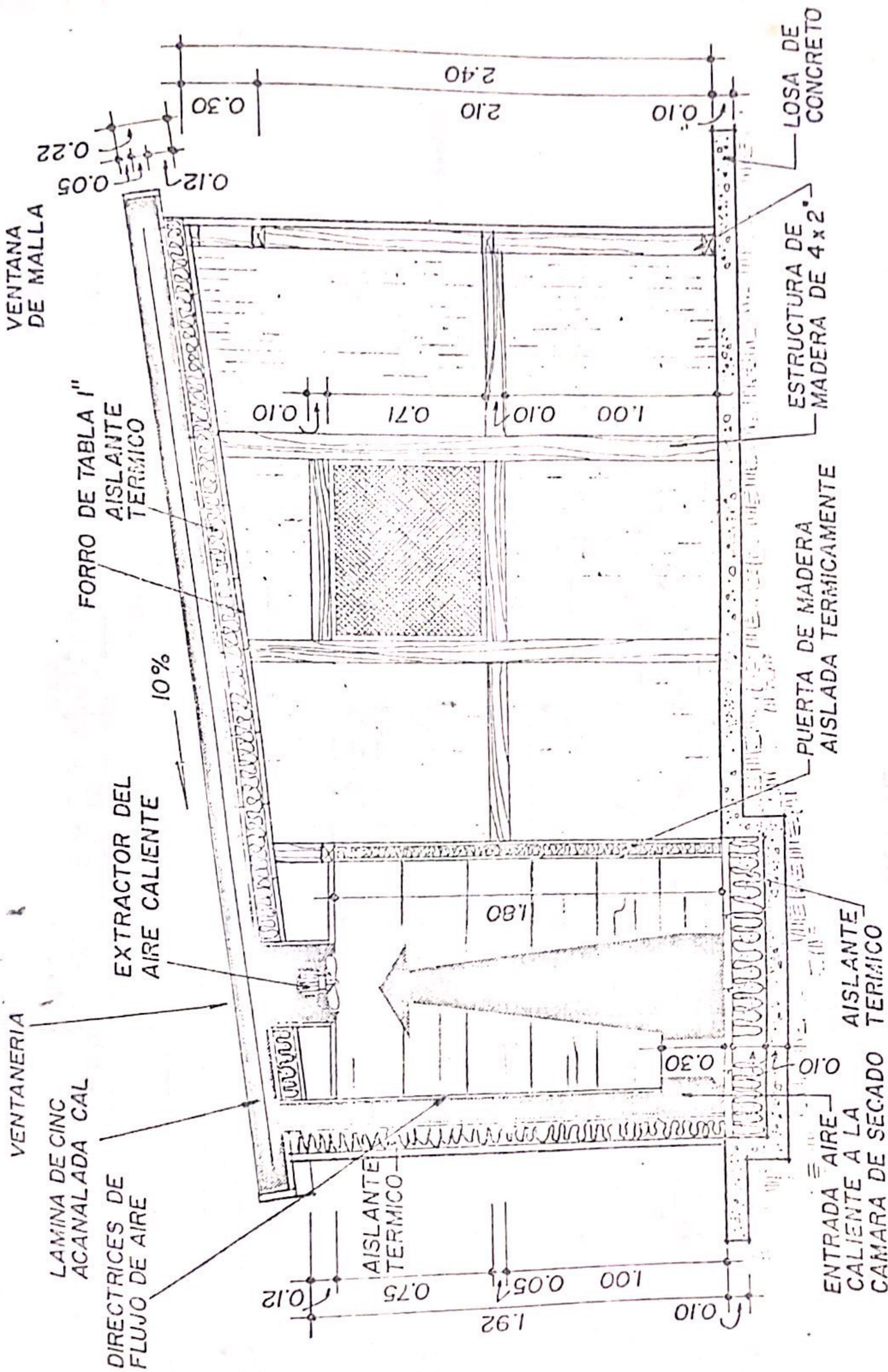
Todos los días en lo que duró el trabajo experimental, se registró la insolación cada hora entre las 8:00 y las 17:00 horas.

Para las graficar las curvas de secado, se calcularon los siguientes datos: a) humedad (base seca): kg de humedad/kg de sólido seco. El banano que se utilizó tenía un contenido de humedad del 68% en base húmeda; b) tiempo: se registró el tiempo continuo en horas.

Con estos datos se graficó la humedad (base seca) (eje "Y") versus el tiempo transcurrido (eje "X") primero para cada bandeja y luego como el promedio de las bandejas.

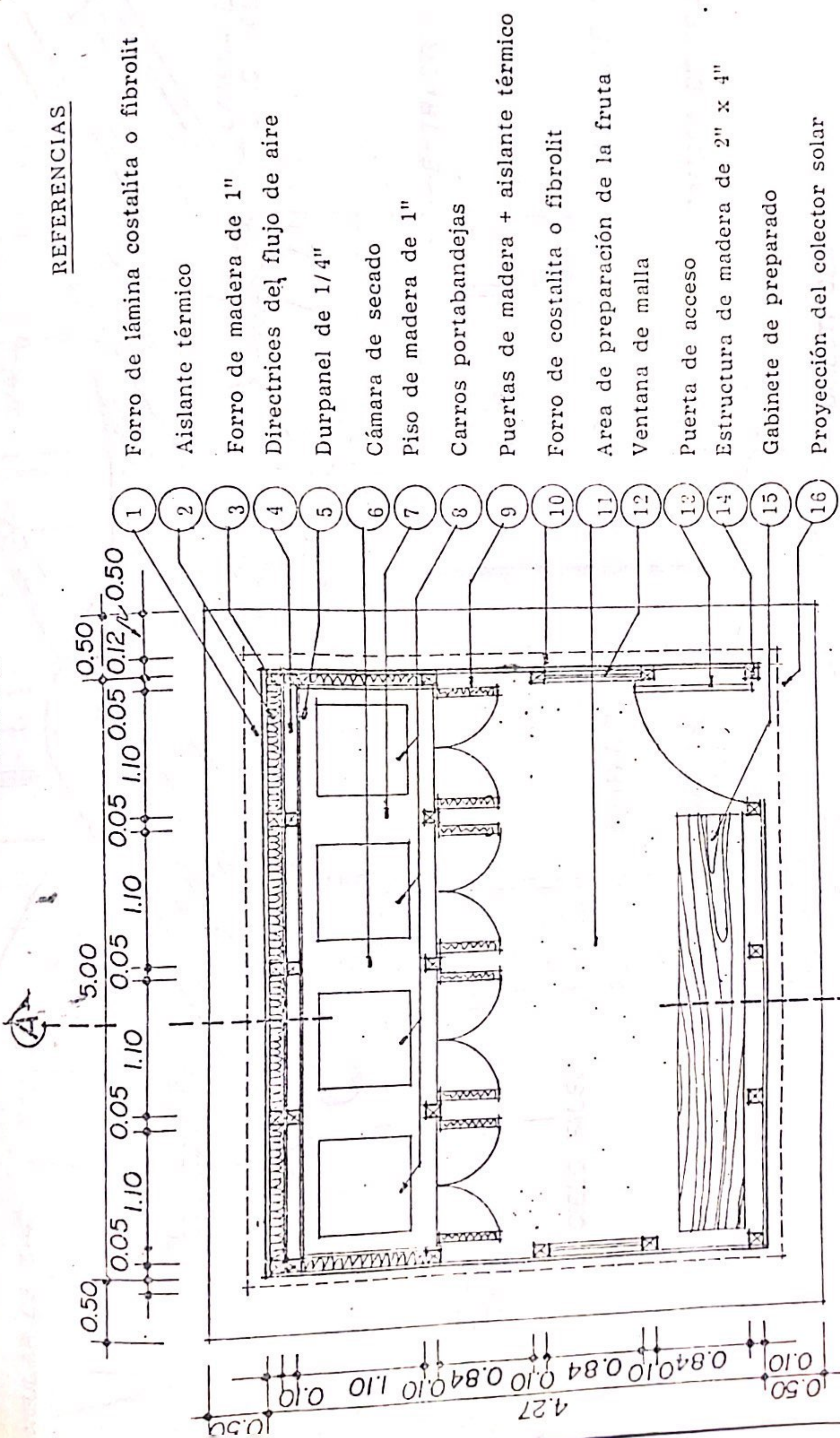
(Nota: un análisis de control de calidad del producto terminado está fuera del alcance y objetivos de este trabajo).

FIGURA 5.1



CORTE A-A  
Escala 1:25

FIGURA 5.2



REFERENCIAS

- 1 Forro de lámina costalita o fibrolit
- 2 Aislante térmico
- 3 Forro de madera de 1"
- 4 Directrices del flujo de aire
- 5 Durpanel de 1/4"
- 6 Cámara de secado
- 7 Piso de madera de 1"
- 8 Carros portabandejas
- 9 Puertas de madera + aislante térmico
- 10 Forro de costalita o fibrolit
- 11 Area de preparación de la fruta
- 12 Ventana de malla
- 13 Puerta de acceso
- 14 Estructura de madera de 2" x 4"
- 15 Gabinete de preparado
- 16 Proyección del colector solar

PLANTA SECADOR SOLAR  
Escala 1:50

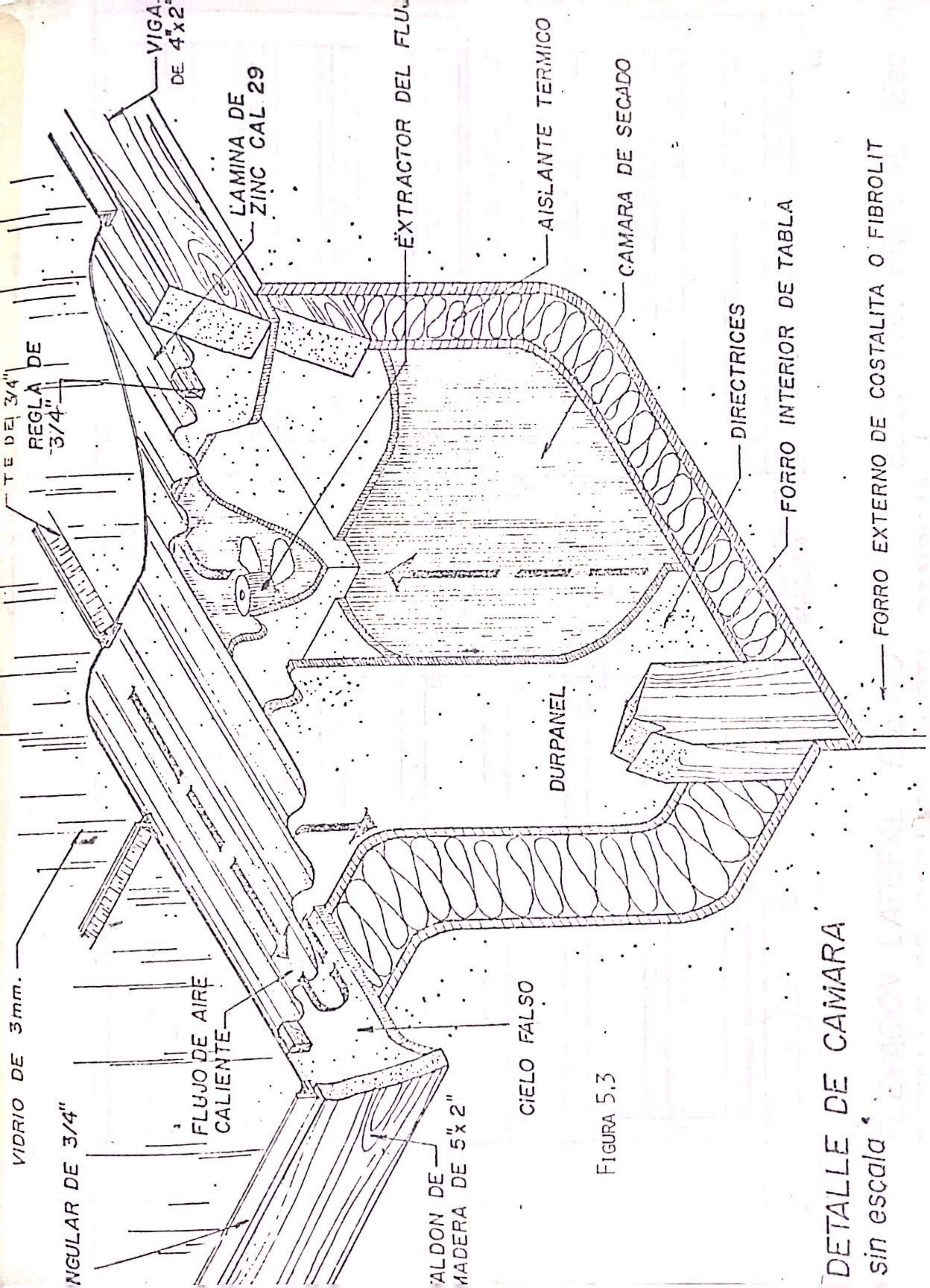


FIGURA 5.3

DETALLE DE CAMARA

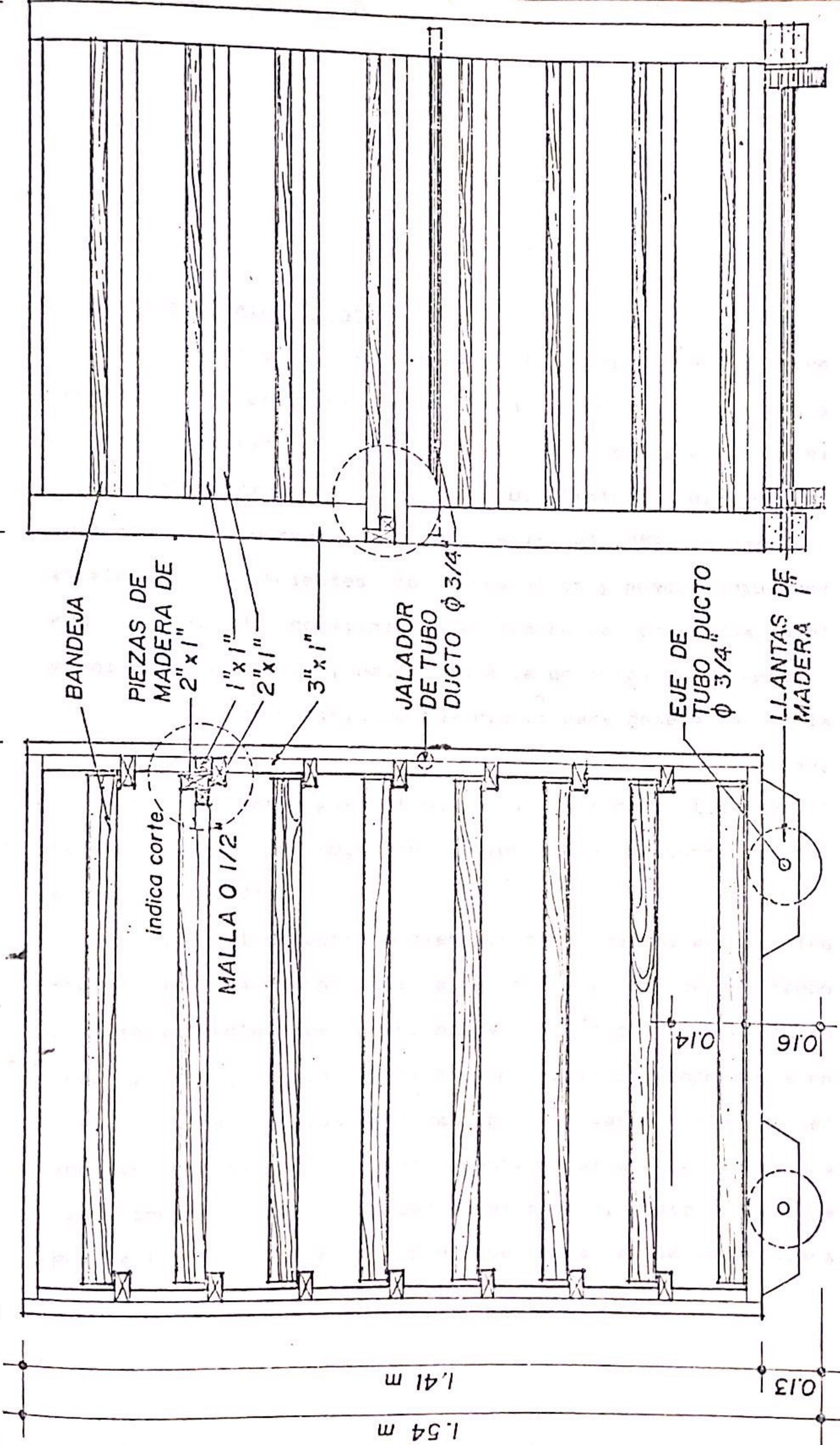
SIN ESCALA

FIGURA 5.4

0.95 m

1.02 m

1.54 m  
1.41 m



ELEVACION LATERAL Esc. 1:10  
DETALLE DE CARRILLO PORTA BANDEJA  
ELEVACION FRONTAL Esc. 1:10

## VI. RESULTADOS

### A. Entrada de aire fresco

Como muestra el gráfico 1, el flujo de entrada de aire fresco no es constante durante todo el secado. Existe una relación logarítmica entre la humedad del producto y el flujo volumétrico de aire fresco. Tanto con el 100% del colector funcionando como con solo el 75%, se obtienen excelentes coeficientes de correlación y puede asegurarse con un 99% de confianza que las curvas obtenidas en el papel semilogarítmico, responden a la ecuación de la recta.

No se hizo análisis de covarianza para determinar si la diferencia entre ambas rectas es o no significativa, porque se variaron tres parámetros a la vez: carga total en el secador, área de colector y forma del producto (banano entero y partido).

Ya que el secador no tiene un ducto de entrada de aire fresco ni una purga del aire húmedo, se determinaron cualitativamente los principales sitios de intercambio de masa y energía. Se localizó un descenso de temperatura en las rendijas de las puertas en la parte interior del secador de manera que podía sentirse al acercar la mano a las rendijas una "cascada" de aire frío. Esto indica que por allí entra aire fresco que está a la temperatura

ambiente. En el extremo que está más alto en el piso del colector, se observó un incremento de la temperatura dentro del cuarto de la preparación de la fruta (ver figura 5.1. y 5.2.) con respecto a la temperatura ambiente. Esto indica una salida del aire caliente y húmedo. No se registraron cambios sensibles de temperatura en otros sitios del secador.

Como se indicó en el capítulo anterior, solo fue posible la medición experimental de la velocidad del aire en la entrada al colector y no en la salida del mismo. Se obtuvo un valor de 2.5 m/s. Esto implica que en el colector fluyen 1480 m/hr.

#### B. Curvas de secado

En los gráficos del 2 al 5 se observan las curvas de secado del banano. El gráfico 2 y el 3, son con banano entero, y el 4 y el 5 con banano partido longitudinalmente por la mitad. Estos gráficos se obtuvieron a partir de los puntos medios del contenido de humedad y el tiempo durante cada día, de gráficos similares al número 6.6 (eliminando los puntos extremos de cada día se obtienen líneas rectas con coeficientes de correlación mayores a 0.99).

El gráfico 7 muestra el secado del banano en el carro 1 con solo el 75% del área del colector operante.

En el gráfico B se tiene una comparación de todas las curvas de secado obtenidas. Aparentemente el carro 1 funciona mejor con 25% del colector bloqueado. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la insolación y la temperatura promedio dentro del secador fueron superiores en el secado con el 75% del colector que con el 100% para el carro 1 (ver cuadro 6.1.).

El carro 1 y el 2 se cargaron en la misma corrida, así mismo se cargaron el 3 y el 4 en otra. Puede notarse un secado más rápido en el carro 2 que en el 1 y en el 3 que en el 4. En la sección B del capítulo siguiente se propone una explicación para ésta diferencia.

Las curvas de secado obtenidas para cada carro fueron muy similares en su forma a la graficada en el gráfico 6.6, que corresponde al carro 1 con 100% del área del colector. Si se toma un segmento de esta gráfica (por ejemplo el correspondiente al cuarto día de secado) y se amplía, se obtiene el gráfico 6.9a. A partir de tal gráfico se puede obtener la velocidad de secado. Aunque el gráfico 6.9a no es una curva típica para un secado a temperatura constante, lo es bastante buena para un secado solar con temperatura variable. Además, debe recordarse que solo es un segmento de la curva de secado.

Para determinar si la temperatura obtenida dentro del secador con el 100% del colector funcionando o con solo el

75% es significativamente diferente, se debe hacer un análisis más detallado de ambas variables (temperatura e irradiación). Como se sospecha una correlación entre la irradiación promedio (variable independiente) y la temperatura promedio (variable dependiente), se hace una regresión de mínimos cuadrados para ambas áreas utilizadas (los datos están tabulados en el Cuadro 6.2).

Efectivamente se obtienen correlaciones altamente significativas (más de 99.9% de confiabilidad) para cada una de las áreas bajo estudio. Las rectas de regresión son:

ec. 6.1.  $T = 0.6366 * I + 14.638$  correlación: 0.968  
para el 100% del colector y

ec. 6.2.  $T = 0.6637 * I + 9.002$  correlación: 0.993  
para el 75% del colector, donde

T: Temperatura de bulbo seco dentro del secador (°C) y

I: Insolación recibida en el plano horizontal (L/hora).

Debido a que las pendientes son similares (i.e. las rectas son paralelas) se procede a un análisis de covarianza (ancova) para determinar si existe diferencia significativa en la temperatura alcanzada en cada caso, si se toma en cuenta la irradiación.

En el cuadro 6.3 se presenta en forma tabular un resumen de los resultados experimentales.

TEMPERATURA INSOLACION TIEMPO (ORA) FORMA DEL AREA DEL PROMEDIO PROMEDIO AREA DE COLECTOR

FECHA	HORA	TEMPERATURA	INSOLACION	TIEMPO (ORA)	FORMA DEL AREA DEL	PROMEDIO	PROMEDIO	AREA DE COLECTOR
1/12	12:00-13:00	27.10	18.00	1	ENTERO	100%	100%	100%
4/12	8:00-12:00	27.10	18.00	4	ENTERO	100%	100%	100%
5/12	8:00-12:00	27.10	18.00	4	ENTERO	100%	100%	100%
6/12	8:00-12:00	27.10	18.00	4	ENTERO	100%	100%	100%
7/12	8:00-12:00	27.10	18.00	4	ENTERO	100%	100%	100%
8/12	8:00-12:00	27.10	18.00	4	ENTERO	100%	100%	100%
9/12	8:00-12:00	27.10	18.00	4	ENTERO	100%	100%	100%
10/12	8:00-17:00	45.11	115.7	9	ENTERO	100%	100%	100%
11/12	8:00-17:00	47.53	102.0	9	ENTERO	100%	100%	100%
12/12	8:00-16:00	48.33	102.0	8	ENTERO	100%	100%	100%
13/12	12:30-17:00	49.53	45.6	5	PARTIDO	75%	75%	75%
16/12	8:00-17:00	49.88	52.1	9	PARTIDO	100%	100%	100%
17/12	8:00-17:00	49.88	65.5	9	ENTERO	100%	100%	100%
18/12	8:00-17:00	49.88	52.1	9	PARTIDO	100%	100%	100%
19/12	8:00-17:00	49.88	65.5	9	ENTERO	100%	100%	100%
20/12	8:00-17:00	49.88	52.1	9	PARTIDO	100%	100%	100%
21/12	8:00-17:00	49.88	65.5	9	ENTERO	100%	100%	100%
22/12	8:00-17:00	49.88	52.1	9	PARTIDO	100%	100%	100%
23/12	8:00-17:00	49.88	65.5	9	ENTERO	100%	100%	100%
24/12	8:00-17:00	49.88	52.1	9	PARTIDO	100%	100%	100%
25/12	8:00-17:00	49.88	65.5	9	ENTERO	100%	100%	100%
26/12	8:00-17:00	49.88	52.1	9	PARTIDO	100%	100%	100%
27/12	8:00-17:00	49.88	65.5	9	ENTERO	100%	100%	100%
28/12	8:00-17:00	49.88	52.1	9	PARTIDO	100%	100%	100%
29/12	8:00-17:00	49.88	65.5	9	ENTERO	100%	100%	100%
30/12	8:00-17:00	49.88	52.1	9	PARTIDO	100%	100%	100%

CARD # PROMEDIO EN PROMEDIO (L) SECADOR 1.07

C U A D R O 6.2

FECHA	HORA	TEMPERATURA PROMEDIO	INSOLACION PROMEDIO	AREA DE COLECTOR
3/12	12:00-17:30	27.25	18.89	100%
4/12	8:00-17:00	33.67	32.18	100%
5/12	8:00-17:00	36.67	42.20	100%
6/12	8:00-17:00	38.17	36.64	100%
7/12	8:00-17:00	40.50	39.93	100%
8/12	8:00-17:00	42.67	46.98	100%
9/12	8:00	18.00	8.08	100%
9/12	12:00-17:00	44.67	42.00	100%
10/12	8:00-17:00	46.11	47.52	100%
11/12	8:00-17:00	47.53	46.82	100%
12/12	8:00-10:30	48.33	20.60	100%
17/12	12:30-17:00	49.50	55.39	100%
18/12	8:00-17:00	45.00	49.59	100%
19/12	8:00-11:00	37.00	42.75	100%
12/12	12:30-17:00	39.80	48.93	75%
13/12	8:00-16:30	41.75	48.59	75%
14/12	8:00-16:30	42.75	52.04	75%
15/12	8:00-16:30	43.30	51.07	75%
16/12	8:00-16:30	44.30	50.89	75%
17/12	8:00	19.00	15.01	75%

65% (base húmeda)

Cuadro 6.3

Resumen de resultados experimentales

Nombre común	Banano coco
Nombre científico	Musa sapientum
Forma de secado	Entero y mitades longitudinales
Secador utilizado	Secador tipo paquete; indirecto y activo
Diámetro promedio sin cáscara	3 cm
Largo aproximado	14 - 18 cm
Porcentaje de desperdicio (cáscara y tronco)	38%
Carga usual por metro cuadrado de bandeja	15 kg de banano entero 7.5 kg de banano en mitades
Pretratamiento	Ninguno
Cambios registrados	Ennegrecimiento y encogimiento
Características del producto seco	Consistencia "pasa". Olor y sabor característicos
Contenido de humedad inicial	68% (base húmeda)

Contenido de humedad

final

se llegó a un mínimo de 20% en base húmeda

Condiciones de secado

48 L/hr de insolación promedio;  
41C temperatura promedio (100% del colector) y 38.5% de humedad relativa dentro del secador

Tiempo mínimo de secado

4 días banano entero  
2 días banano en mitades

Grafico 6.1

FLUJO VOLUMETRICO DE ENTRADA DE  
AIRE FRESCO VRS. HUMEDAD

100% Colector	—	$Y = 10 \exp(0.02183 X + 0.4839)$	$r = 0.993$
75% Colector	- -	$Y = 10 \exp(0.02237 X + 0.3566)$	$r = 0.075$

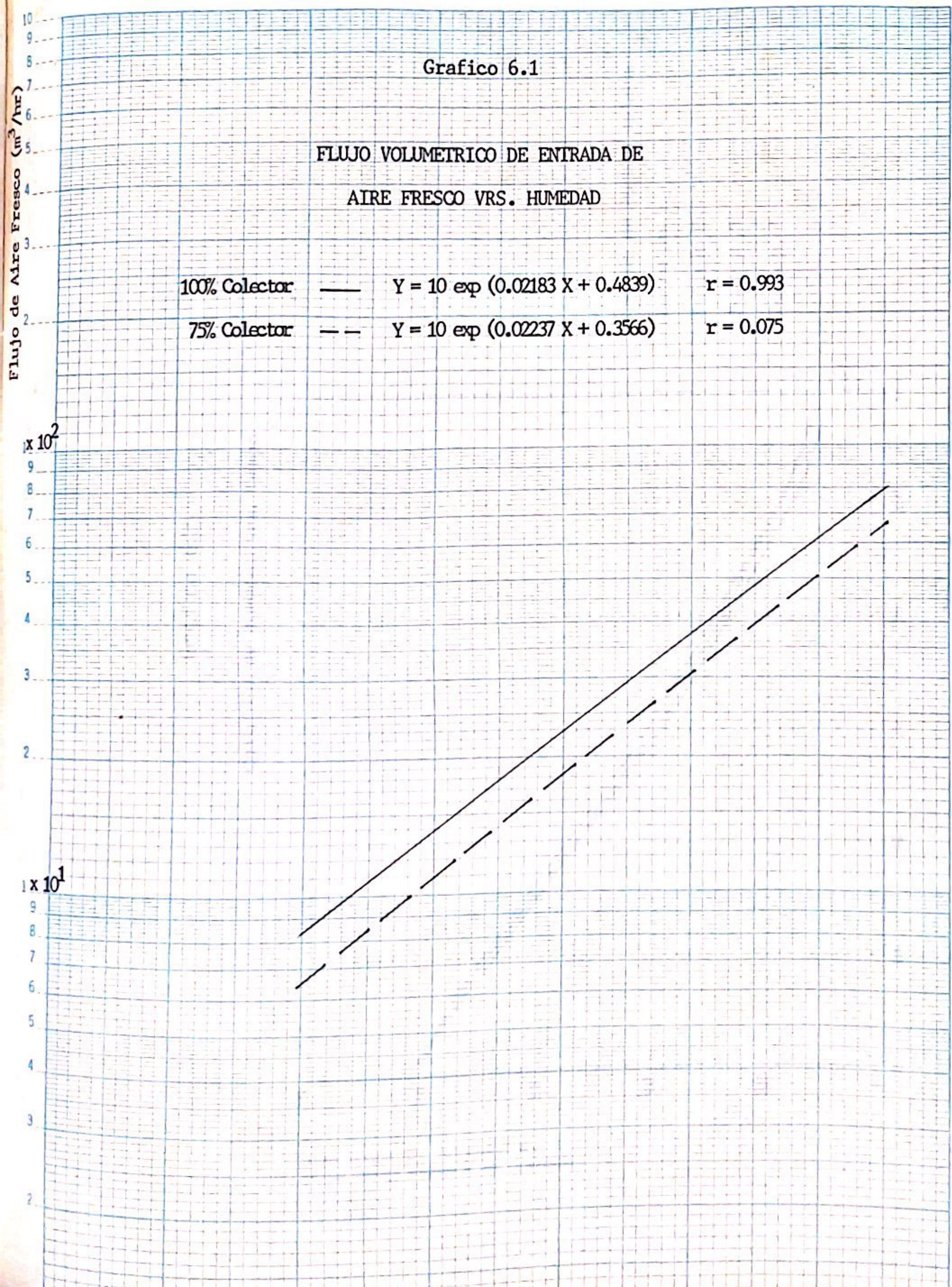
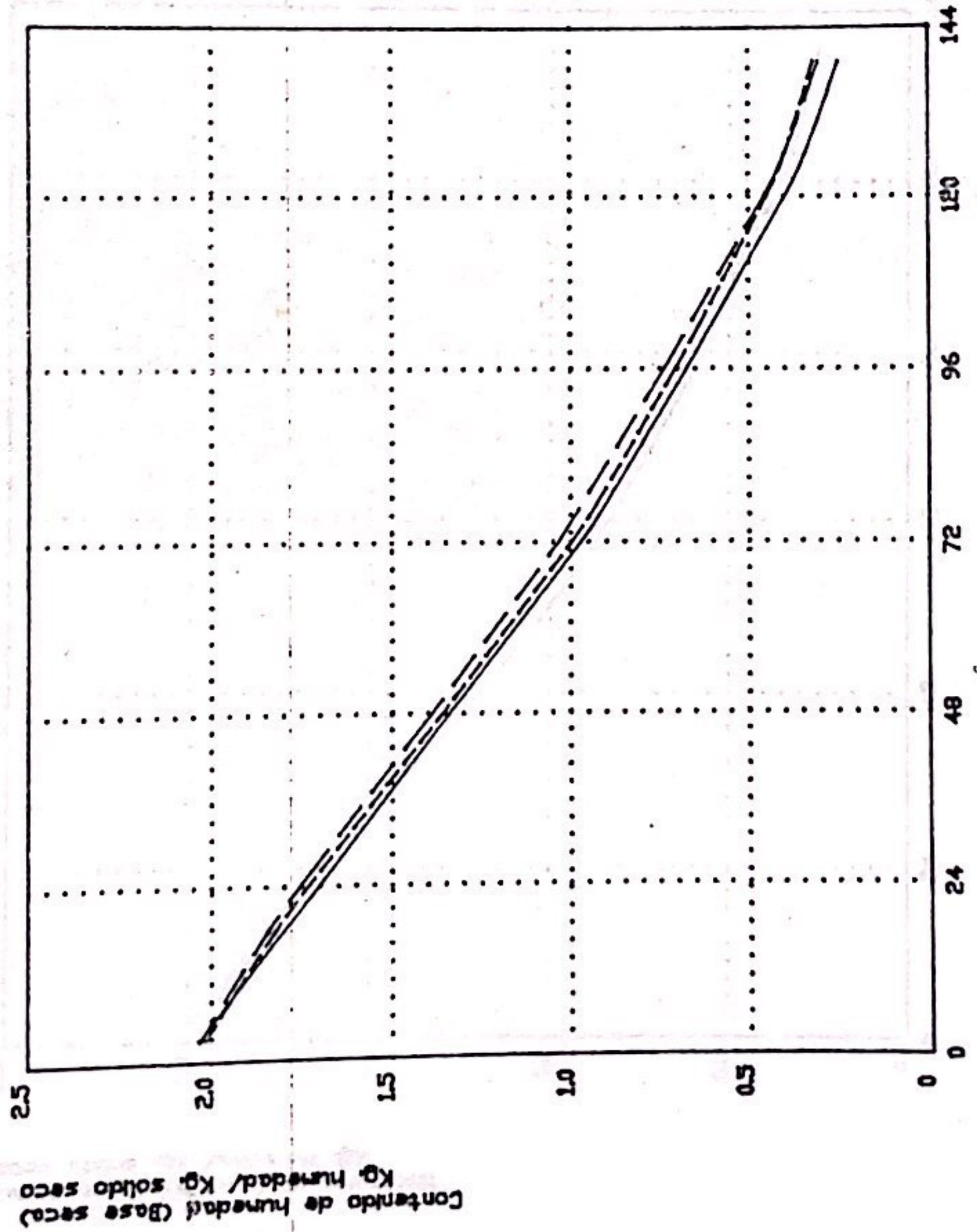


Grafico 6.2

Contenido de humedad vrs. tiempo



Secado de banano entero

Carro No. 1 —————

Bandeja 2 - - - - -

Bandeja 5 - . - . -

Bandeja 7 - - - - -

Grafico 6.4

### Grafico 6.3

Contenido de humedad vrs. tiempo

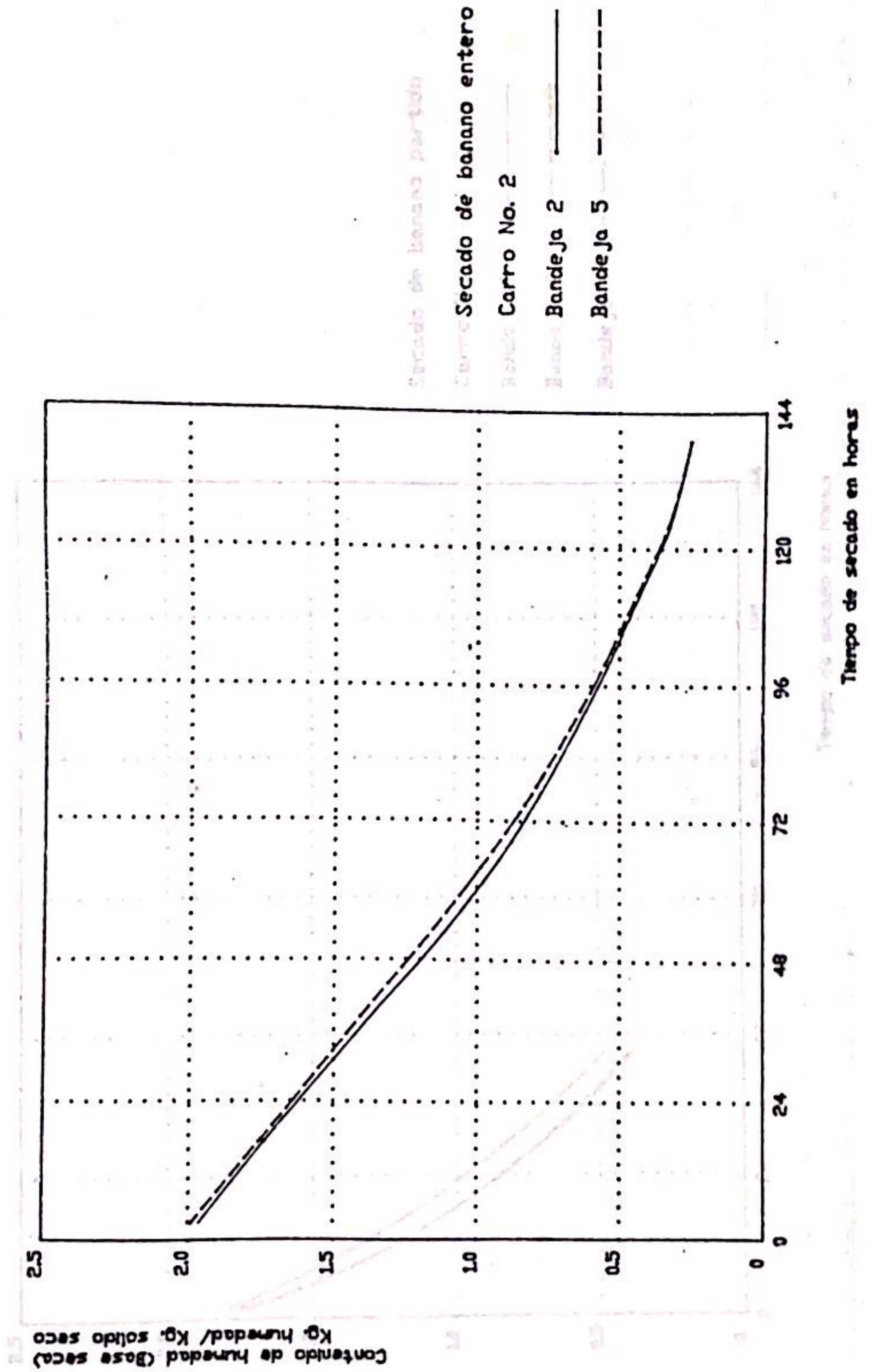
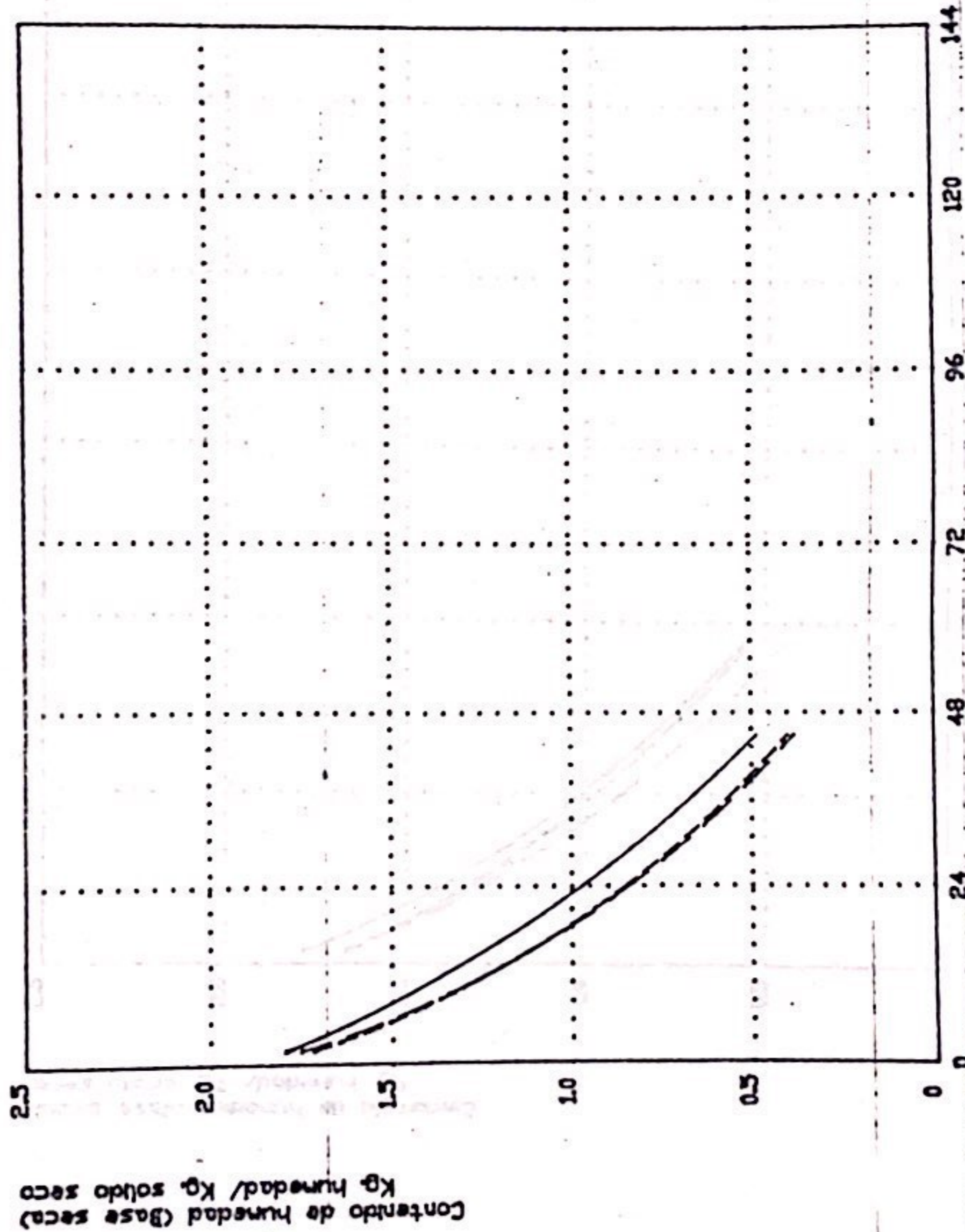


Grafico 6.4

Contenido de humedad vrs. tiempo



Secado de banana partido

Carro No. 3

Bandeja 2

Bandeja 5

Bandeja 7

**Grafico 6.5**  
**Contenido de humedad vrs. tiempo**

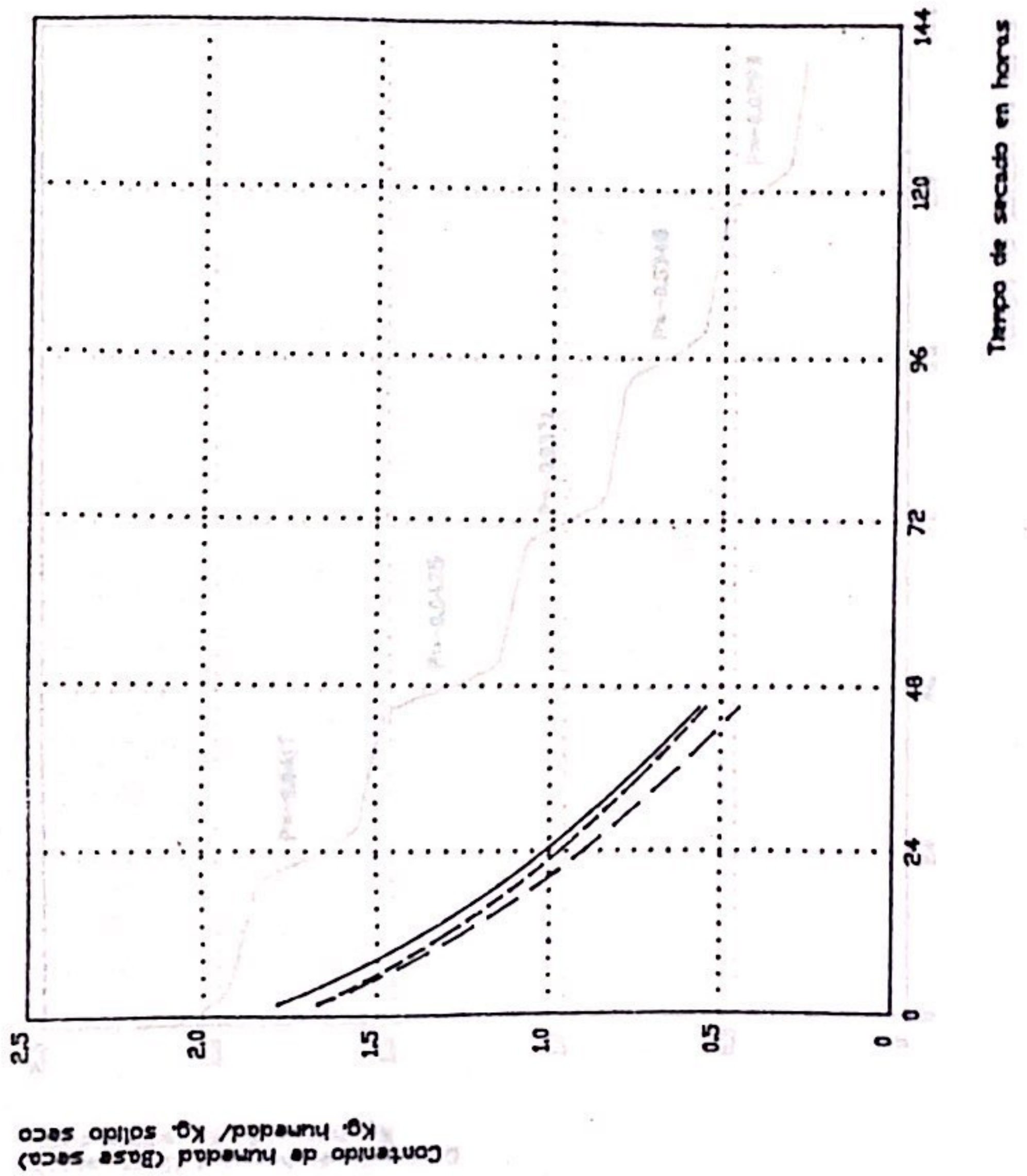
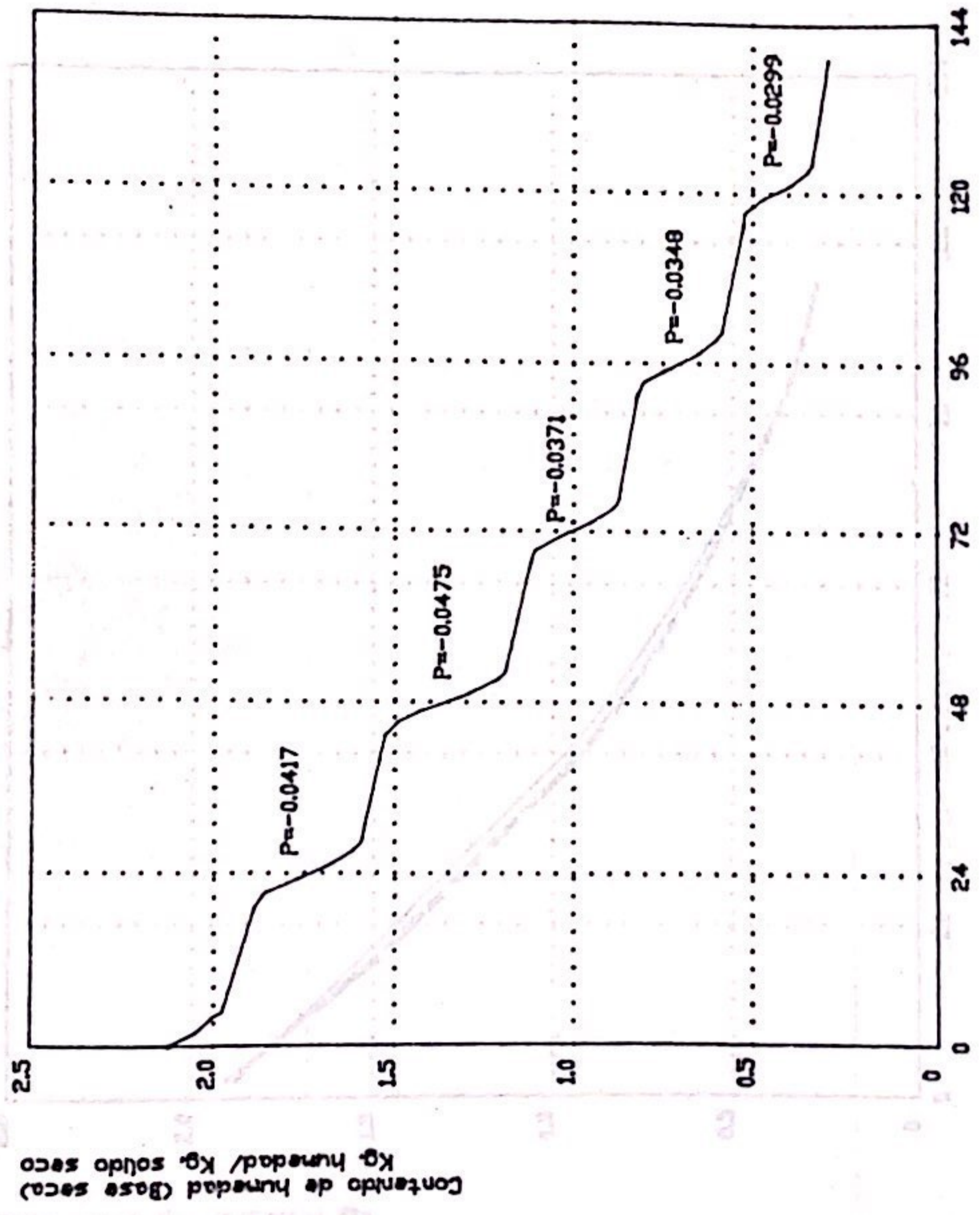


Grafico 6.6

Contenido de humedad vrs. tiempo



Secado de banana entero  
 Secado de banana entero  
 Carro No. 1  
 (Datos diarios no promediados)

Tiempo de secado en horas

Grafico 6.7

Contenido de humedad vrs. tiempo

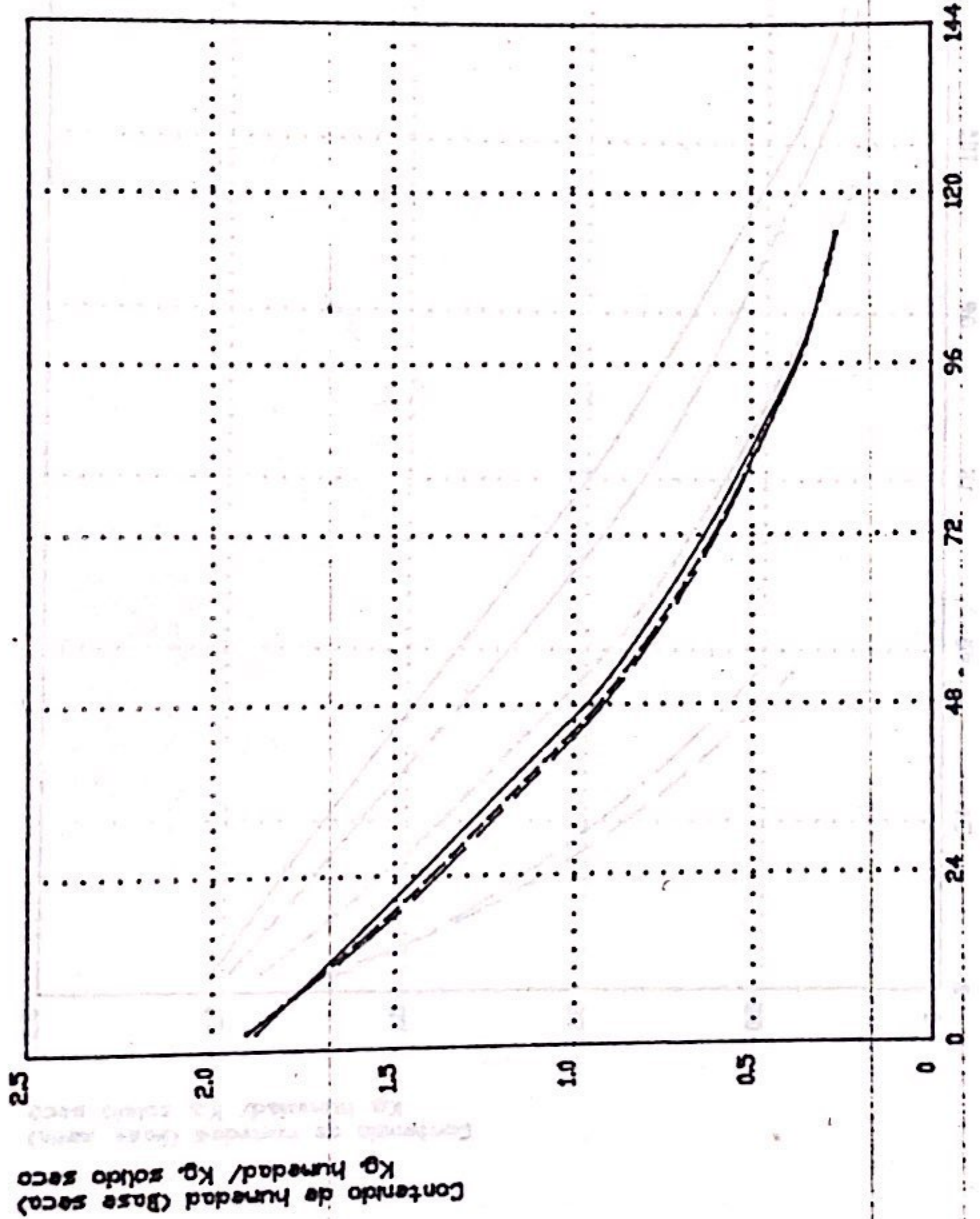


Grafico 6.8

Contenido de humedad vrs. tiempo

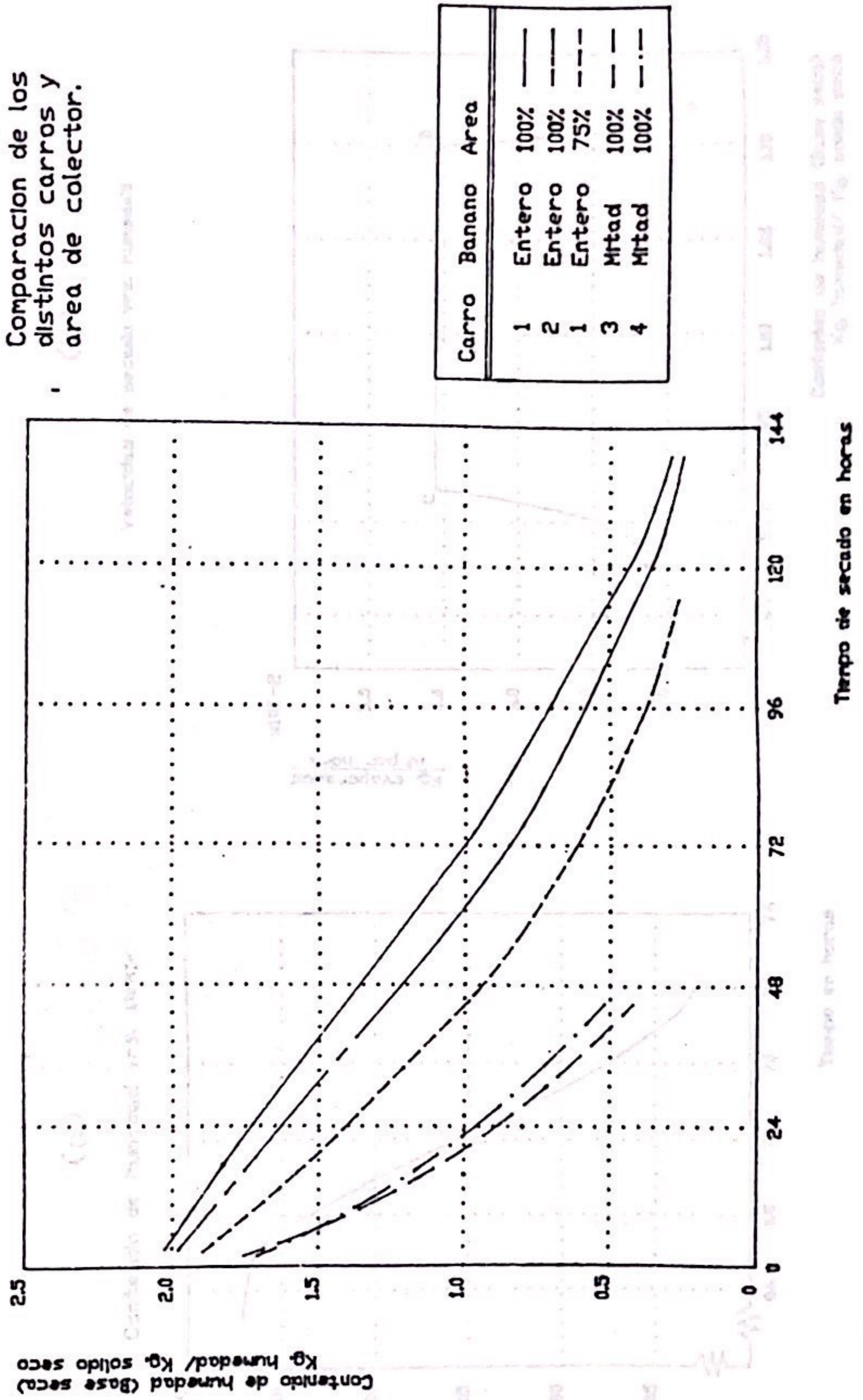
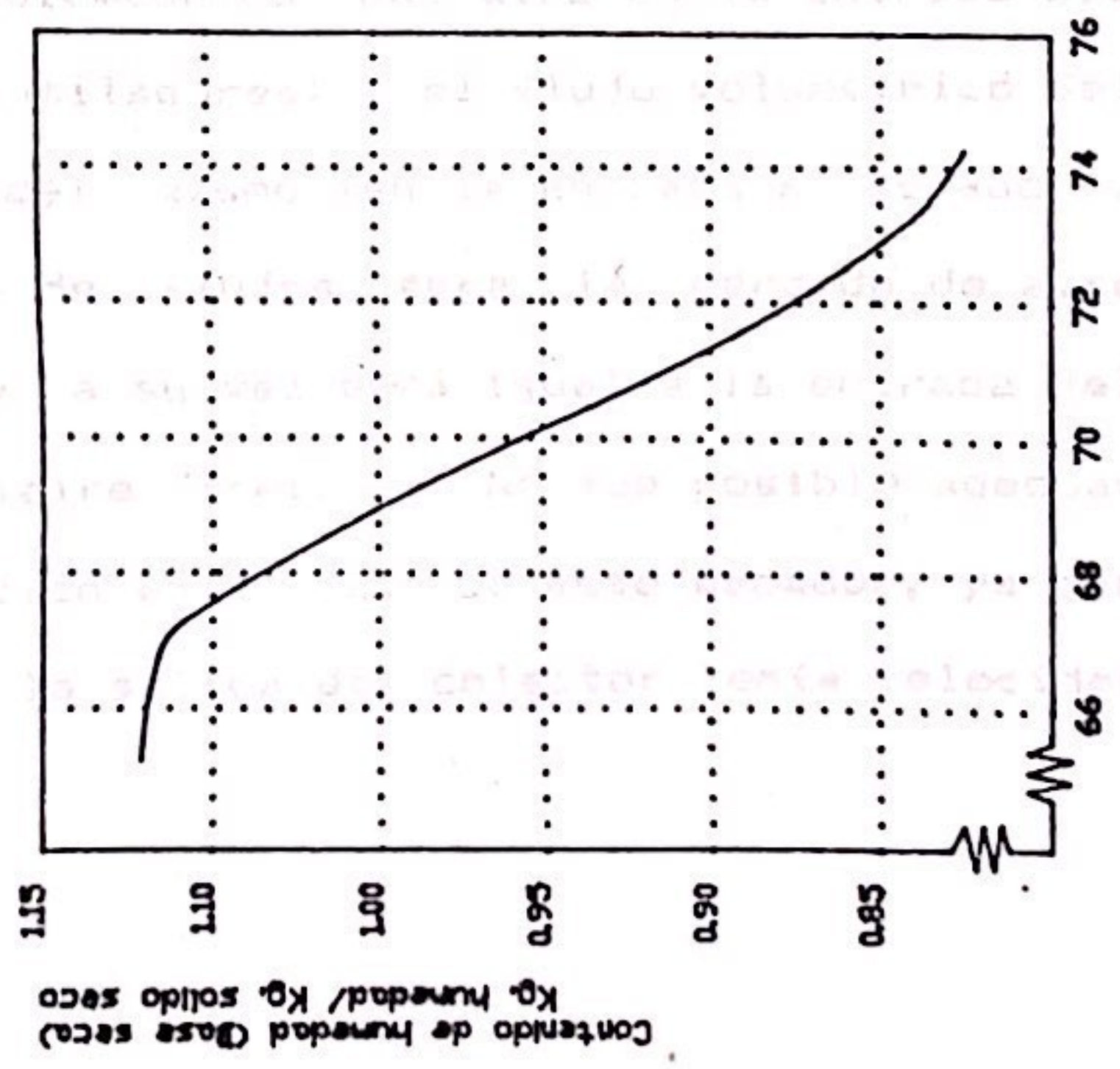


Grafico 6.9

(a)

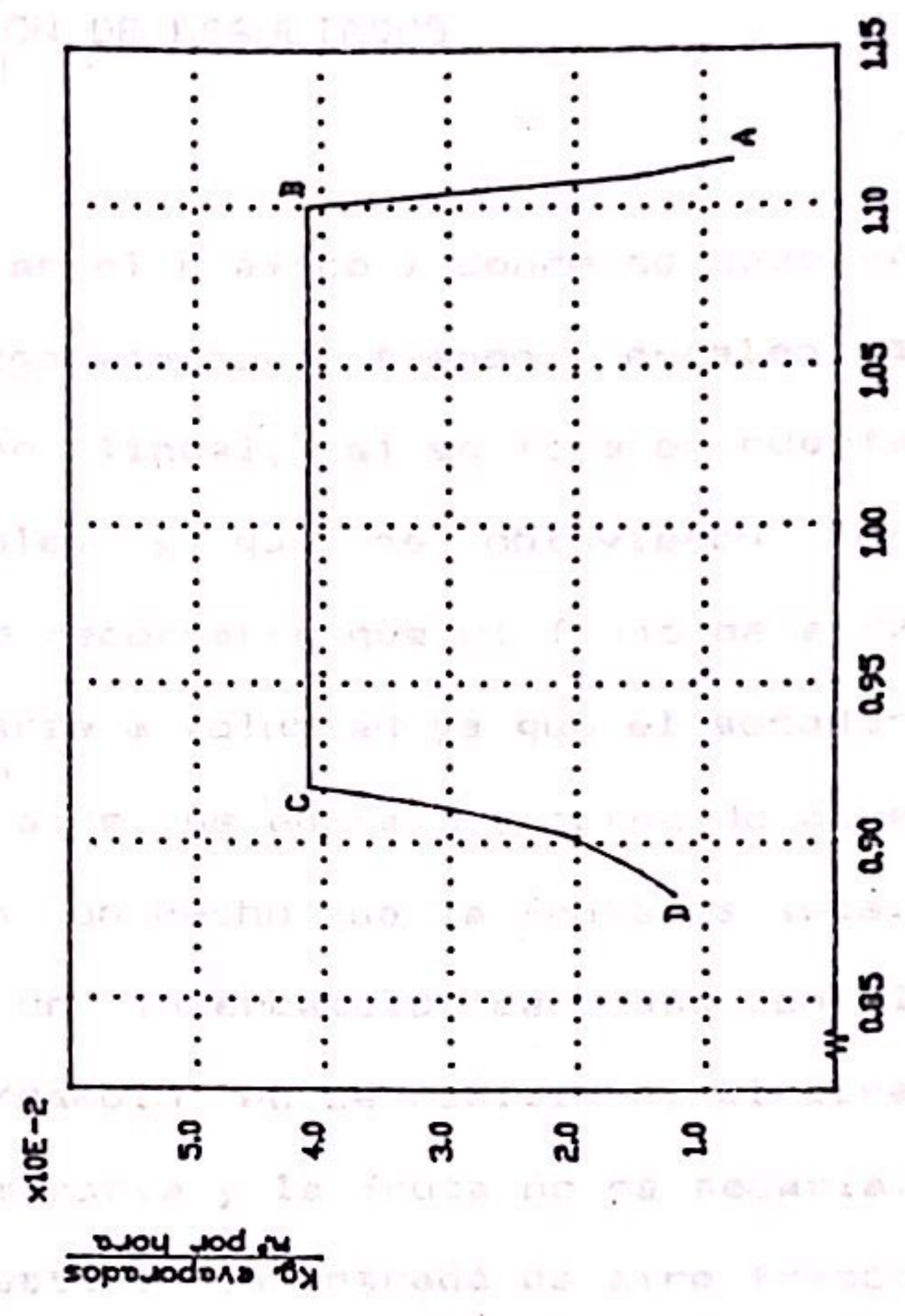
Contenido de humedad vs. tiempo



Tiempo en horas

(b)

Velocidad de secado vs. humedad



Contenido de humedad (Base seca) Kg. humedad/ Kg. solido seco

## VII. DISCUSION DE RESULTADOS

### A. Circulación de aire

Las curvas obtenidas en el gráfico 1 donde se observa una correlación semilogarítmica, tienen excelentes coeficientes de correlación lineal, si se toma en cuenta que son datos experimentales y que se obtuvieron por métodos indirectos. Debe recordarse que el flujo de aire de entrada no puede variarse a voluntad ya que el secador carece de ventilas para aire de entrada y purga de aire húmedo. Sin embargo, es un hecho que la fruta se seca. Esto implica que existe un intercambio de masa con el exterior. Si este intercambio no se realizara, el aire dentro del secador se saturaría y la fruta no se secaría. La forma más sencilla de estimar la entrada de aire fresco al colector, habría sido por simple sustracción de flujos. Se mide el flujo volumétrico del aire en la entrada del colector (en los ventiladores) y el flujo volumétrico del aire en la salida del mismo (en la entrada al secador). Luego la diferencia de flujos será la pérdida de aire húmedo y caliente y a su vez será igual a la entrada del aire del ambiente (aire fresco). No fue posible adecuar este método de medición en el caso de este secador, ya que el flujo de aire en la salida del colector tenía velocidad

lineal menor que 2 m/s y el anemómetro del que se disponía no registraba fielmente flujos de tan baja magnitud. Por esto, únicamente fue posible medir el flujo de aire en la entrada al colector. El método utilizado para la estimación de la entrada del aire fresco requiere de muchos cálculos intermedios para lograr el resultado final, lo que provoca una mayor propagación del error que ya conllevan las mediciones. La idea básica detrás del método es la siguiente: el peso del agua evaporada de la fruta es igual a la humedad que lleva el aire en la salida del secador (en la entrada al colector) menos la humedad del aire fresco que entra, más el agua residual que queda en el cuarto de secado entre la medición inicial y la medición final. Teniendo en cuenta las características psicrométricas del aire, puede averiguarse la humedad total en este aire. Para visualizar esto en forma de modelo, vease la ecuación 5.1.

Aunque este método es indirecto, se obtuvo una buena correlación en ambas corridas (con 100% y 75% del colector) como para poder decir con un 99% de confianza que el comportamiento del flujo de aire fresco es semilogarítmico con respecto a la humedad porcentual del banano.

Las rectas del gráfico 1 no son comparables porque como se mencionó en el capítulo anterior, se variaron tres parámetros entre una y otra corridas. Por esta razón, este

trabajo se limita a hacer una representación gráfica y no inferencias estadísticas de ambos casos.

Instalando un ducto de entrada y uno de salida de aire en la parte baja y alta del secador, puede regularse el flujo de aire tanto el fresco como el de purga. La purga del aire húmedo antes de pasar al colector, tiene la ventaja que no se desperdicia energía en calentar aire húmedo que va a escapar en la parte alta del colector. Las fugas en las redijas pueden ser selladas y así tener un mejor control de la humedad en el secador.

Es un hecho que ocurrió el proceso de secado en la fruta. Sin embargo nada puede decirse si este proceso ocurre a una velocidad óptima o si podría mejorar (sin estropear la calidad del producto) al aumentar el flujo del aire de entrada. Las curvas mostradas en el gráfico 1, representan el flujo de aire fresco, bajo las condiciones de operación de este secador (i.e. ningún control sobre la entrada o purga de aire). Estas son posiblemente solo dos curvas de lo que podría ser una familia de curvas del flujo de aire fresco durante el proceso de secado. Con este gráfico se cuenta por lo menos con un parámetro para continuar en futuras investigaciones en las que se pueda controlar a voluntad el flujo volumétrico.

El flujo de circulación de aire a través del secador es de 1480 m/hr, de los cuales el 6% es aire fresco cuando

dentro de la madera, existe una difusión debida al gradiente de humedades. Debido a que el exterior del

la fruta está húmeda (alrededor de 66% de humedad) y el 1% cuando ya está seca (alrededor de 27% de humedad). Cuando la fruta está húmeda, se requiere que el aire en el secador esté más seco para que exista una fuerza impulsora de evaporación. Al irse secando la superficie, se requiere de menos aire seco para mantener esta misma fuerza impulsora. Además, cuando la fruta está húmeda, el aire que la pasa secando se humedece. Esta humedad del aire dentro del secador va decreciendo a medida que la fruta se va secando. Se tiene pues que el gradiente de humedad entre el exterior e interior del secador es mayor al inicio que al final del secado. Este gradiente es en parte también el responsable de la diferencia de flujo de aire fresco entre el inicio y el final del proceso de secado.

Otras fuerzas que son capaces de hacer variar el flujo de aire en el interior del secador y que están fuera de control del operador, son: corrientes convectivas dentro del secador y gradientes de presión por las corrientes de aire en el exterior del secador. Debe tomarse en cuenta que una posible fuente de error en estos cálculos es la cantidad de agua que es absorbida por la madera con que está construido el secador. Al estar seca la madera, ésta absorbe parte del agua que está en el ambiente del secador. Dentro de la madera, existe una difusión debida al gradiente de humedades. Debido a que el exterior del

secador (el medio ambiente) es más seco que el interior, el agua absorbida por un lado, se irá evaporando lentamente en el otro. Esto ocurre solamente en el piso y las partes internas del colector que están sin pintar, ya que la pintura es una capa que actúa como impermeabilizante.

#### B. Curvas de secado

El gráfico 6.6 representa una curva típica de secado solar. Los lapsos cuya pendiente no aparece escrita en el gráfico, representan las horas que la insolación es nula o insignificante, por lo que la evaporación resulta nula o escasa por tantas horas. Entre las 8:00 y las 16:30 se recibe el 99% del total de la insolación diaria. En lugares en donde el medio ambiente es muy húmedo y el material secado es muy higroscópico, no solo la humedad del material no disminuye sino que aumenta durante la noche. Las pendientes en los distintos días de operación en el mencionado gráfico tienden a decrecer, a pesar que la insolación fue en incremento durante esos días. Esto se debe a que la velocidad de secado se hace más lenta conforme el material se va secando.

Al graficar el punto medio de cada día (gráfico 6.8), se tiene una visión continua del proceso global del secado. Puede notarse cómo es necesario que transcurra más tiempo para evaporar una masa de agua dada, conforme se va

secando el banano. Esto se debe a que la presión de vapor del agua dentro de la fruta se va acercando cada vez más al equilibrio con el vapor de agua en el aire circundante. Esto disminuye la fuerza impulsora del secado. Además, una vez la humedad superficial se ha evaporado, el otro factor limitante en el secado es la difusión molecular, que en el período decreciente de secado está directamente relacionada con la velocidad de secado, la cual varía en relación al cuadrado del espesor del material (Saravacos). Así la transferencia de masa se hace más lenta conforme el material se va secando, lo que también contribuye a que el proceso se torne más lento. Es entonces también comprensible por qué el banano partido por la mitad se seca más rápido que el entero. Por un lado aumenta la superficie de secado y por el otro se reduce el problema de transferencia de masa dentro del banano.

En el gráfico 6.8 pueden compararse entre sí, las curvas que corresponden al carro 1 y 2 (100% colector) y el 3 y 4 respectivamente. Para un análisis estadístico de estas curvas, deben hacerse réplicas de estas corridas y será necesario normalizar éstas por las diferentes condiciones de insolación y temperatura. Sin embargo puede a priori atribuirse la diferencia del secado a la circulación del aire dentro del secador. El ventilador que provoca turbulencia dentro del secador, está colocado entre

el carro 3 y el 4, y el flujo está orientado hacia el carro 3 (y por consiguiente hacia el 2 y el 1). El resultado obtenido puede esperarse si se toma en cuenta que el otro factor importante en el secado (además de las diferencias entre presiones de vapor) es la velocidad del aire secante respecto al material secado. Esta velocidad es mayor sobre las bandejas del carro 3 que sobre las del 4 y mayor sobre las del 2 que sobre las del 1.

La forma del gráfico 6.9b representa una curva de velocidad de secado. La línea A-B, corresponde a un período de ajuste del material a las condiciones del secado. La línea B-C representa un período de rapidez de secado constante, durante el cual la humedad se evapora uniformemente en la superficie del material. La línea C-D corresponde a un período de secado decreciente durante el cual la humedad del material fluye del interior para evaporarse en la superficie. La humedad de transición de un valor constante de rapidez de secado a uno decreciente (punto C) se llama humedad crítica, y a la rapidez correspondiente, rapidez crítica.

Debido a que el gráfico 6.9 solo es el comportamiento en un día aislado del conjunto del proceso global de secado, no puede decirse que el punto C sea correspondiente a una humedad y rapidez críticas. De aquí se concluye que no necesariamente el valor máximo obtenido en esta curva da una explicación parcial al fenómeno. Cuando se hizo la prueba con el 75% del colector, había mayor

sea la máxima velocidad de secado en este secador. Este, al igual que el gráfico 6.1, solo son gráficos de referencia para que en futuras investigaciones en versiones modificadas de este tipo de secador (por ejemplo con ventilas graduables para entrada y salida de aire) pueda compararse contra un parámetro experimental.

Sin embargo, la forma del gráfico sí es representativa del gráfico global de secado a una temperatura constante. Esto puede explicarse de la siguiente manera: el banano que se ha calentado durante el día, permanece caliente en su interior las primeras horas de la noche y la migración del interior a la superficie continua durante toda la noche. De esta forma, al día siguiente, cuando comienza a calentar el secador, la superficie ya está de nuevo húmeda y es como si comenzara el proceso de secado desde el principio (excepto que las humedades y rapidez de secado son distintas a las del día anterior).

Un análisis comparativo en las curvas de secado con 100 y 75% del colector (gráfico 6.8), haría pensar que existe un sobre diseño en el área de colector ya que a pesar de estar bloqueada el 25% de área total de colección de luz, se secó más rápido el banano que cuando el 100% estaba en funcionamiento. Si se da un vistazo al cuadro 6.2, puede darse una explicación parcial al fenómeno. Cuando se hizo la corrida con el 75% del colector, había mayor insolación

promedio que cuando estaba el carro 1 con el 100% del colector. Esta mayor insolación provoca mayor temperatura dentro del secador lo que produce un incremento en la fuerza impulsora de la transferencia de masa (Perry y Chilton).

El incremento de la temperatura al aumentar la insolación es de tipo lineal y está expresado para ambas áreas de colector estudiadas (100 y 75%) en el capítulo anterior. Argueta presenta una ecuación obtenida para un secador solar directo:  $T = 0.40 * I + 20.39$ , donde "T" e "I" equivalen a "Y" y "X" en las ecuaciones 6.1 y 6.2. Aunque esta ecuación arroja resultados similares para las insolaciones horarias promedio obtenidas, no es realmente comparable con las obtenidas en este estudio porque el área de colector usada en el experimento de Argueta es menor que el 75% del área de este secador tipo paquete.

El análisis de covarianza revela una diferencia significativa en las temperaturas logradas con 100% y 75% del área de colector si se considera una misma insolación. Existe una heterogeneidad en las medias alrededor de sus pendientes de regresión, lo que indica que para una insolación dada, se produce una temperatura significativamente mayor con el 100% del colector que con solo el 75%.

proceso. Esto es especialmente cierto si se parte de  
botas de plástico o se tiene una higiene muy pobre

### C. Calidad del producto y velocidad de secado

En un proceso de producción industrial, se desea obtener el mayor volumen de producto en el menor tiempo posible. El secado de fruta con fines comerciales no es la excepción. Siguiendo este principio general, podría pensarse en orientar esfuerzos en el diseño de secadores con mucho mayores tasas de secado. Debe tenerse precaución en estos diseños porque no necesariamente va a coincidir un secado más rápido con un producto de mejor calidad. Por ejemplo el banano puede secarse hasta  $65^{\circ}\text{C}$  por las primeras dos horas del secado y luego la temperatura no debe de exceder más allá de  $55^{\circ}\text{C}$  para no tener problemas con la calidad del producto final (De Long). Aunque en promedio la temperatura no pasa de  $50^{\circ}\text{C}$ , se alcanzaron temperaturas pico de hasta  $60^{\circ}\text{C}$  por unas horas. Con esto, al pensar en mejoras al modelo, no se hará énfasis en lograr una mayor temperatura en el secador. Si se hace pasar aire muy caliente o muy seco por la fruta húmeda, ésta tenderá a secarse en su superficie y causar una capa dura y poco permeable al resto del agua en la humedad de la fruta. Esto provoca el endurecimiento en el exterior de la fruta e impide la evaporación, lo que redunda en un producto duro por fuera y húmedo por dentro.

Por otro lado, si el secado es muy lento, se corre el riesgo de crecimiento de microorganismos durante el

proceso. - Esto es especialmente cierto si se parte de materia prima contaminada o se tiene una higiene muy pobre durante la preparación de la fruta.

Se ha establecido que el flujo de aire fresco que entra en el secador bajo las condiciones no controladas que se describen en este caso decrece exponencialmente al decrecer la humedad (o más húmeda) del banano.

La temperatura alcanzada en el secador después del contacto con la fruta está directamente relacionada con la insolación solar y depende además del área del colector. Así se tiene que para 15 m<sup>2</sup> de colector la temperatura puede predicarse mediante la siguiente ecuación:

$$T = 0.6326 * I + 14.079 \quad \text{Correlación: } 0.983$$

y para 18.70 m<sup>2</sup> de área de colector (el 75% del total del área actual)

$$T = 0.6637 * I + 9.502 \quad \text{Correlación: } 0.993, \text{ donde } T^{\circ}$$

es la temperatura en °C,  $I^{\circ}$  la insolación expresada en Langley.

El tiempo de secado es más corto si la fruta es expuesta a corrientes forzadas de aire que si se deja únicamente a merced de la convección natural del aire ambiente.

El banano anejo puede secarse en 72 horas si la insolación promedio es de 48 Langley/hora y en este período, en 48 horas, bajo estas condiciones será posible bajar el contenido de humedad hasta un 15% en peso húmeda.

## VIII. CONCLUSIONES

Se ha establecido que el flujo de aire fresco que entra en el secador (bajo las condiciones no controlables que se tuvieron en este caso) decrece exponencialmente al decrecer la humedad (en base húmeda) del banano.

La temperatura alcanzada en el secador después del contacto con la fruta está directamente relacionada con la insolación horaria y depende además del área del colector. Así se tiene que para 25 m<sup>2</sup> de colector la temperatura puede predecirse mediante la siguiente ecuación:

$$T = 0.6366 * I + 14.638 \quad \text{Correlación: } 0.968$$

y para 18.75 m<sup>2</sup> de área de colección (el 75% del total del área actual)

$$T = 0.6637 * I + 9.002 \quad \text{Correlación: } 0.993, \text{ donde "T"}$$

es la temperatura en °C e "I" la insolación expresada en Langleys.

El tiempo de secado es más corto si la fruta es expuesta a corrientes forzadas de aire que si se deja únicamente a merced de la convección natural del aire caliente.

El banano entero puede secarse en 92 horas si la insolación promedio es de 48 Langley/hora y si está partido, en 48 horas. Bajo estas condiciones será posible bajar el contenido de humedad hasta un 18% en base húmeda,

### 15. RECOMENDACIONES

que es la humedad recomendable para conservar el banano deshidratado por 6 meses a unos 15 °C (De Long). Debido a que no fue posible cargar los cuatro carros con banano durante una misma corrida, no puede concluirse si el área es adecuada para la capacidad máxima del secador. El secador tiene 23.12 m<sup>2</sup> de área de bandeja y 25 m<sup>2</sup> de colector. Esto obedece a la regla gruesa de diseñar el colector por lo menos con la misma área que las bandejas. Sin embargo en la práctica, se tiene la experiencia que por las variaciones de insolación, es mejor construir un exceso del 50% de colector respecto al área de bandeja /1/.

El secado solar aún en climas fríos como el de Quezaltenango es totalmente factible. Gracias a su sencilla operación y bajo costo tanto de mantenimiento como de operación, es un excelente recurso para el productor de frutas y hortalizas cuyos costos de transporte o pérdidas en el almacenamiento son elevados. Precisamente el banano más adecuado para deshidratar es aquel que está ligeramente sobremaduro y cuya vida en el mercado será ya muy corta.

La fragilidad (se tienen fracturas) se ha visto que ha resistido durante un año a un sol intenso, heladas y lluvias con granizo, sin romperse. El vidrio tiene una /1/ Comunicación personal con Ing. Otto de León.

## IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda incorporar aberturas graduables en la base del secador así como en la salida del extractor (previo al recorrido por el colector). Con esto se logra un mejor control sobre el intercambio de masa y calor en el aire y será posible optimizar el proceso de secado adaptándolo a las condiciones climatológicas del lugar.

Antes de la construcción de este tipo de secador en algún otro sitio, debe hacerse una evaluación de la insolación promedio que se recibe en ese lugar. Si la insolación horaria promedio durante el día está por debajo de los valores aquí reportados, o la humedad relativa del ambiente es alta, deberá pensarse en sacrificar por lo menos una bandeja por cada carro (equivalente a unos 3 m<sup>2</sup>).

Para acelerar el secado se sugiere la colocación de dos ventiladores dentro del secador para crear turbulencia y lograr así que el tiempo de secado sea uniforme en todos los carros.

Aunque se temía que el vidrio no fuera a ser una buena solución para lograr el efecto de invernadero por su fragilidad (se temían fracturas) se ha visto que ha resistido durante un año a un sol intenso, heladas y lluvias con granizo, sin romperse. El vidrio tiene una

excelente transmitancia (0.9 a 0.95) y además no se raya o se corta como el plástico vinilo (Secado solar de granos). Sin embargo la empaquetadura corriente (mastic) no es suficiente para soportar condiciones de clima tan drásticas. Esto provocó que se agrietara y causa infiltraciones de agua cuando la lluvia es muy fuerte. Debido al alto costo de selladores comerciales, se recomienda probar colocar un sello de caucho líquido sobre el mastic.

Cross, W.V. Commercial fruit and vegetable canning. 1938 4th. ed. USA. Mc Graw-Hill Book Co., Inc. 839p.

De Long, D. How to dry food. USA. HP Books. 160 pp. 1979

Debröcker, N.W. The technology of food preservation. USA. 1963 AVI Publishing Co., Inc. 403 pp.

Farrall, R. Food preservation systems. USA. AVI 1976 Publishing Co. 815 pp. 1st. ed.

ICAITI. Soluciones de energía solar. Proyecto de 1984 y 1985 fuentes alternativas de energía. Guatemala. 1-11.

ICAITI. Soluciones de energía solar. Proyecto de 1984 y 1985 fuentes alternativas de energía. Guatemala. 109 pp.

ICAITI. Soluciones de energía solar y viento. Guatemala. 1985 67 pp.

Jay, J. Food and microbiology. 2nd. ed. USA. Van Nostrand Reinhold Co. 479 pp.

Mainal, A.B. (Mainal, A.P.) Spiced salted codfish. USA. 1977 Addison-Wesley Publishing Co. 551 pp.

Perry, R.H.; Chilton, C.H. Chemical engineers handbook. 1973 5th. ed. USA. Mc Graw-Hill Book Co.

## X. BIBLIOGRAFIA

- Argeta, W. Secado de frutas mediante el uso de secadores solares pasivos de pequeña escala. Tesis (Ingeniero químico)-Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Guatemala. 84 pp.
- Bergeret, A. Conservas vegetales: frutas y hortalizas. 1953 España, Salvat Editores S.A. vol. 133 pp.
- Bolin, H.R.; Stafford, A.E.; Huxsoll, C.C. "Solar heated 1977 fruit dehydrator". Solar energy USA; 20: 289-291.
- CRC. Handbook of chemistry and physics. 63rd. ed. USA. 1982 CRC Press.
- Cruess, W.V. Commercial fruit and vegetable products. 1958 4th. ed. USA. Mc Graw-Hill Book Co., Inc. 884pp.
- De Long, D. How to dry foods. USA. HP Books. 160 pp. 1979
- Desrosier, N.W. The technology of food preservation. USA. 1963 AVI Publishing Co., Inc. 405 pp.
- Farrall, A. Food engineering systems. USA. AVI 1976 Publishing Co. 615 pp. 1er. vol.
- ICAITI. Aplicaciones de energía solar. Proyecto de leña y 1983 fuentes alternas de energía. Guatemala. 1-21.
- ICAITI. Secado solar de granos. Proyecto de leña y 1985 fuentes alternas de energía. Guatemala. 159 pp.
- ICAITI. Secadores solares carpa y wengert. Guatemala. 1985 63 pp.
- Jay, J. Modern food microbiology. 2nd. ed. USA. Van 1978 Nostrand Reinhold Co. 479 pp.
- Meinel, A.B.; Meinel, M.P. Applied solar energy. USA. 1977 Addison-Wesley Publishing Co. 651 pp.
- Perry, R.H.; Chilton, C.H. Chemical engineers' handbook. 1973 5th. ed. USA. Mc Graw-Hill Book Co.

- Saravacos, D.; Charm, S.E. "A study of mechanism of fruit 1962 and vegetable dehydration". Food Technology. (USA); 16 (1): 78-81.
- Sokal, R.R.; Rohlf, J.F. Biometry. 2nd. ed. USA. W.H. 1981 Freeman and Co. 859 pp.
- Treybal, R. Operaciones de transferencia de masa. 2a ed. 1980. México, D.F. Mc Graw-Hill Book Co.
- Van Arsdell, W. Food dehydration. 2nd ed. USA. 1973 Reinhold Publishing Co. 1er vol. 185 pp.
- Woodroof, J.G. Commercial fruit processing. USA. AVI 1975 Publishing Co.

Glosario

Absorbancia:

Cociente de la radiación absorbida por un material, entre la radiación total que recibe el mismo; su valor oscila entre 1 y 0.

Absorbedor:

Placa de color negro que se utiliza en los colectores solares para absorber la energía radiante.

Angulo de incidencia de la radiación solar:

Angulo que forma el rayo de luz incidente sobre el plano horizontal.

Aire fresco:

Terminología que designa el aire del ambiente que ingresa al secador.

Aire de purga:

Aire que se libera al exterior del secador después de haber estado al menos una vez en contacto con el producto que se está secando.

Aire de recirculación:

Aire que después de haber estado en contacto con la fruta, vuelve a ser calentado y reingresado al secador.

Aislante térmico:

Material de baja conductividad térmica que evita las pérdidas de

calor tanto por conducción como por convección.

**Azúcares reductores:**

**Colector solar:**

Equipo diseñado para captar la energía del sol, absorbiendo la radiación que emana de éste y transfiriendo la energía a un fluido que circula en su interior.

**Conducción:**

Proceso en que fluye calor de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura por uno o más medios (sólido, líquido, gas) en contacto directo.

**Contenido de humedad:**

Cantidad de humedad por unidad de peso de sólido seco (base seca) o sólido húmedo (base húmeda).

**Convección:**

Movimiento de un fluido provocado por diferencias de densidad a causa de un gradiente de temperatura.

**Cubierta del colector:**

Elemento que permite el paso de la radiación solar hacia el absorbedor, evitando pérdidas de calor hacia el exterior. Además crea un efecto de invernadero.

**Cuerpo negro:**

Cuerpo o superficie que absorbe

**Curva de secado:**

grán parte de la energía que incide sobre él y refleja el resto como radiación térmica.

**Diagrama psicrométrico:**

Gráfica del contenido de humedad del producto en proceso de secado, a lo largo del tiempo que dura dicho proceso.

**Efecto de invernadero:**

Diagrama que muestra las propiedades de mezcla de un gas (aire) y vapor de un líquido (agua).

El efecto que crea un cuerpo transparente en una cámara cerrada, no permitiendo que la energía reflejada por el colector escape al ambiente.

**Emitancia:**

Cantidad de energía que irradia un cuerpo en forma de radiaciones de onda larga.

**Enzima:**

Sustancia orgánica que determina ciertos cambios en el metabolismo.

**Humedad crítica:**

Magnitud de la humedad del producto en la que la velocidad de secado deja de ser constante y comienza a decrecer. Esta depende tanto del material como de las condiciones del secado.

**Humedad relativa:**

La razón de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera a la cantidad que podría saturarla a esa temperatura.

**Insolación:**

Radiación solar registrada por unidad de área y unidad de tiempo.

**Langley (L):**

Unidad de medición de insolación.

1L = 1 cal/cm.

**Piranómetro:**

Instrumento que mide la insolación.

**Presión de vapor:**

Presión ejercida cuando un sólido ó líquido están en equilibrio con su propio vapor. Es función de la sustancia y de la temperatura.

**Radiación solar:**

Radiación que proviene del sol en forma de onda corta, siendo aprovechables las ondas comprendidas entre 0.38 y 2.0 micras (visible e infrarrojo cercano)

**Secado:**

Mecanismo utilizado para separar el líquido de un sólido por evaporación del primero.

**Transmitancia:**

Cantidad de radiación que atraviesa el material que forma la cubierta, en relación a la cantidad que recibe. Depende del ángulo de incidencia del rayo.

Velocidad constante:

Intervalo de humedad en el que el <sup>68</sup> producto se deshidrata a una velocidad constante.

Velocidad crítica:

Valor de la velocidad de secado en que ésta deja de ser constante y se torna decreciente.

Velocidad de secado:

Rapidez con que se evapora una masa de agua por unidad de tiempo y de área.

Velocidad decreciente:

Intervalo de humedad en el que el producto se deshidrata a una tasa cada vez menor.