



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



U. N. A. M.

Secado Solar de Plátano (*Musa sapientum* Jacatán)
como Alternativa a el Secado Convencional
para su Aplicación a Nivel Rural.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN ALIMENTOS
P R E S E N T A N
Rosa Catalina Leyva Colunga
Francisco Javier Téllez Melgoza

Director de Tesis: I. Q. Oscar Germán Ibarra

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México

1991



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

Capítulo		Página
	OBJETIVOS.	I
	RESUMEN.	II
	INTRODUCCION.	III
I.	IMPORTANCIA DEL SECADO DE PLATANO.	
	1.1. Generalidades.	1
	1.2. Producción mundial.	3
	1.3. Producción nacional.	4
II.	SECADO CONVENCIONAL.	
	2.1. Generalidades.	8
	2.2. Clasificación de los equipos de secado.	11
	2.3. Secadores utilizados para frutos.	13
	2.4. Secadores de charolas atmosféricos.	13
III.	LA ENERGIA SOLAR Y EL SECADO SOLAR.	
	3.1. Naturaleza de la radiación solar.	15
	3.2. Medición y estimación de la radiación - solar.	16
	3.3. Captación de la energía solar.	17
	3.4. Secado solar.	19
	3.4.1. Principios básicos.	20
	3.4.2. Clasificación de los secadores so- lares.	21
IV.	EXPERIMENTACION Y RESULTADOS.	
	4.1. Materiales y métodos.	26
	4.2. Cuadro metodológico experimental.	32
	4.3. Resultados y discusión.	35
	4.3.1. Secado previo.	35
	4.3.2. Aplicación de antioxidantes.	35
	4.3.3. Selección de la concentración de - bisulfito de sodio.	36
	4.3.4. Selección del espesor de la muestra.	36
	4.3.5. Secado a diferentes temperaturas.	44

Capítulo	Página
4.3.6. Acondicionamiento de la cámara de secado.	48
4.3.7. Secado de plátano con similitud - térmica.	48
4.3.8. Secador solar.	51
4.3.9. Secado solar de plátano en diferente época del año.	54
V. DIMENSIONAMIENTO DE LOS SECADORES.	
5.1. Condiciones preeliminarias para el dimensionamiento.	60
5.2. Condiciones de operación.	61
5.3. Dimensionamiento de un secador de charolas atmosférico.	61
5.4. Dimensionamiento del secador solar.	68
VI. ANALISIS DE COSTOS.	
6.1. Secador de charolas.	73
6.1.1. Costos fijos.	73
6.1.2. Costos variables.	74
6.2. Secado solar.	76
6.2.1. Costos fijos.	76
6.2.2. Costos variables.	77
6.3. Sinopsis.	77
CONCLUSIONES.	80
BIBLIOGRAFIA.	82
APENDICES.	85

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

Determinar la alternativa más viable para el secado de plátano a nivel rural, mediante la aplicación del secado solar y convencional.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Observar el comportamiento del plátano durante el secado.
- Comparar el poder antioxidante del ácido cítrico y el bisulfito de sodio y determinar la concentración apropiada para el secado de plátano.
- Determinar las condiciones adecuadas para el secado, mediante el estudio del efecto de la temperatura del aire y el espesor del sólido.
- Construir un secador solar directo para su aplicación en el secado de plátano.
- Realizar el secado solar en diferente época del año para determinar su influencia en el tiempo de secado y en el producto.
- Dimensionar un secador de charolas y uno solar para su aplicación a nivel rural y determinar una alternativa mediante un análisis de costos.

II

RESUMEN

Se evaluó el secado solar de plátano como alternativa al secado convencional. Para ello, se eligieron dos tipos de secadores: uno de charolas y un secador solar directo, realizando un secado preliminar para conocer el comportamiento del fruto durante el proceso de secado. De dicha labor surgió la necesidad de utilizar antioxidantes para prevenir el oscurecimiento durante la deshidratación.

Los antioxidantes empleados fueron ácido cítrico y bisulfito de sodio. El plátano fue troceado en rodajas y se aplicó el antioxidante por inmersión, determinando la concentración y el tipo de antioxidante más conveniente, así como la temperatura y el espesor adecuados, utilizando una estufa eléctrica de secado.

Posteriormente se realizaron pruebas en los secadores (solar y de charolas) a fin de evaluar la calidad del producto seco.

Finalmente se efectuó el análisis de costos fijos y variables involucrados en el proceso de secado convencional y solar con el objeto de determinar la rentabilidad de cada uno, y la aplicación de secado solar como alternativa al convencional.

INTRODUCCION

El secado al sol es una tecnología muy difundida, practicada por casi todos los países del mundo y en cualquier latitud. El secado por medio del sol en forma directa es uno de los métodos más antiguos y primitivos de la conservación de alimentos.

Sin embargo, un gran volumen de cosecha de granos, frutas y hortalizas son desperdiciadas por el efecto que sufren al secarse a la intemperie, por infestación microbiana y plagas; aunque es una de las formas más económicas y efectivas de secado, ya que no necesita gran inversión de capital, y aunque requiere de mano de obra considerable, ésta es raramente costosa.

Las técnicas tradicionales de secado natural al sol aprovechan los días de verano claros y cálidos, a menudo sin lluvias; sin embargo el efecto de la intemperie demerita la calidad al colocar el producto directamente sobre el terreno, o bien sobre los techos.

La disponibilidad cada vez más extendida de energía eléctrica y demás combustibles, contribuye, desde hace tiempo a la creación de instalaciones que ofrecen una variada gama de productos secos, dando como resultado que tanto en zonas de desarrollo como en regiones industrializadas, se sustituya el tradicional secado al sol por el convencional, con objeto de mejorar la calidad, reducir el desperdicio, así como eliminar las pérdidas y dificultades que presenta el secado natural.

Hasta hace poco, en la mayor parte de las zonas industrializadas, el bajo costo de la mano de obra y combustibles permitían el desarrollo de procesos de secado convencionales en gran escala; - por lo que el costo de la deshidratación se adicionaba al de las materias elaboradas. Sin embargo, el advenimiento de precios más elevados en los combustibles fósiles y las perspectivas de agotamiento, han estimulado un gran interés por los secadores solares agrícolas.

Dentro de las formas de secado existentes, el secado solar usa una fuente de energía de alta disponibilidad sin costo y es por lo tanto, una opción que permite llevar a cabo ésta operación en forma económica, práctica y adecuada para aprovechar los excedentes en la producción agrícola, donde las posibilidades de desarrollo de tecnología y equipo convencional para el secado son inaccesibles por los altos costos de inversión inicial y costos de producción.

En México, a todas las especies de plátano se les ha denominado como tal; sin embargo, cabe señalar que la especie con mayor dinamismo en el mercado internacional y nacional es la Musa sapientum lacatan, conocido como banano o plátano de mesa (30).

El secado solar se puede aplicar para la deshidratación de plátano, del cual en Estados productores como Veracruz, Chiapas y Tabasco, hay gran cantidad de mermas; pues las posibilidades económicas de los agricultores son limitadas.

CAPITULO I IMPORTANCIA DEL SECADO DE PLATANO.

1.1. GENERALIDADES.

El plátano es una de las frutas tropicales más importantes, constituyendo en algunos países centro y sudamericanos, un producto importante en su alimentación básica; además es un fruto con alto volumen de exportación (30).

Los plátanos pertenecen al género MUSA de la familia musácea y comprende especies que producen fibras, como la Musa textilis, especies ornamentales como la Musa coccinea y comestibles originado de las especies Musa acuminata y Musa balbisiana.

Las variedades más comunes propuestos para los plátanos comestibles son: Gross Michel, Poyo, Enano, Gran enano y Lacatán (5).

El plátano es una rica fuente de carbohidratos y minerales así como entre otros componentes; vitaminas del complejo B, vitamina A y C, en comparación con otras frutas posee una mayor cantidad de calorías. El cuadro 1.1. muestra el análisis químico proximal del plátano en comparación con otras frutas.

Los métodos de conservación aplicables al plátano son los que se mencionan a continuación: congelación, secado, enlatado y fermentación ácida; sin embargo, la conservación a la cual se somete el producto depende en gran medida de la infraestructura con la cual se cuente para su procesamiento.

En lo que respecta al secado, existen varias formas de llevarlo a cabo: por aspersión, en tambores, en túneles, en charolas, etc., dependiendo, en gran medida, de la cantidad de materia prima desti

CUADRO 1.1. ANALISIS QUIMICO PROXIMAL DEL
PLATANO EN COMPARACION CON OTRAS FRUTAS.

FRUTO	H ₂ O (%)	PROTEINAS (%)	GRASAS (%)	CARBOHIDRATOS (%)	CENIZAS (%)	ENERGIA Cal/100g
Plátano	74.8	1.2	0.2	23.0	0.8	99.0
Manzana	84.1	0.3	0.4	14.9	0.3	64.0
Albaricoque	85.4	1.0	0.1	12.9	0.6	56.0
Uva	81.6	0.8	0.4	16.7	0.5	74.0
Pera	82.7	0.7	0.4	15.8	0.4	70.0
Ciruela	85.7	0.7	0.2	12.9	0.5	56.0

FUENTE: Hernandez M. et al; Valor nutritivo de los alimentos; I.N.N. México,
1983.

nada a la producción de plátano seco, el uso final que va a tener y el costo de la operación, local, es un factor determinante. Es por ello que en algunos países de Asia, África, Centro y Sudamérica, se ha practicado el secado al sol en forma rudimentaria, o mediante sencillos aparatos que colectan el calor para elevar la temperatura del aire y llevar a cabo el secado. De ésta manera se seca y se comercializa en forma de harina.

El secado solar de plátano puede resultar una alternativa viable para el aprovechamiento del producto a nivel rural y que a diferencia del secado al sol, que se ha practicado tradicionalmente

se puede obtener un producto de mejor calidad, ya que el fruto a secar no está expuesto al medio ambiente en forma directa.

Dentro de los usos que tiene el plátano seco se puede mencionar la elaboración de alimentos infantiles, postres y helados. Además en forma de harina, puede usarse en panadería o en forma de hojuelas como complemento en cereales (36).

1.2. PRODUCCION MUNDIAL.

La producción con destino al comercio internacional es una actividad económica con características propias en la mayoría de los países exportadores, pues, comprende pocas variedades elegidas por sus altos rendimientos, resistencia al transporte a larga distancia, calidad constante y aspecto impecable.

Hasta principios de la década de los setentas, el banano era la fruta fresca de más importancia en el comercio internacional, sin embargo, ha sido desplazado por otras frutas tropicales; pero a pesar de ello, sigue figurando como una de las principales dentro de los productos agrícolas en el comercio mundial.

Al respecto, de 1983 a 1985 la producción de plátano se incrementa en 5.7 % y el volumen de producción se elevó de 40.2 a 42.5 millones de toneladas (cuadro 1.2).

Los principales países exportadores de ésta fruta son: Brasil, India, Filipinas e Indonesia, quienes obtienen el 17.1, 11.3, 9.7 y 5.2 % respectivamente. México ocupa el 7o. lugar con una aportación del 3.8 % de la producción mundial.

CUADRO 1.2. PRODUCCION MUNDIAL DE PLATANO .
(MILES DE TONELADAS)

PAIS	1983	1984	1985	1983-1985	%
Brasil	6566	7062	7505	7044	17.1
India	4648	4626	4686	4653	11.3
Filipinas	3668	4000	4368	4012	9.7
Indonesia	2320	2000	2085	2135	5.2
Ecuador	1642	1524	1705	1624	3.9
Yailandia	1530	1545	1580	1552	3.8
México	1640	1500	1500	1547	3.8
Burundi	1210	1250	1250	1237	3.0
Colombia	1173	1350	1200	1241	3.0
Vietnam	1100	1200	1300	1200	2.9
Honduras	1186	1250	1300	1245	3.0
Costa Rica	1153	1161	1100	1138	2.8
Otros	12330	12594	12881	12601	30.5
TOTAL	40166	41062	42400	41229	100.0

FUENTE: Dirección General de Asuntos Internacionales, S.A.R.H.,
con base a datos del anuario F.A.O. de producción. 1985.

1.3. PRODUCCION NACIONAL.

La producción nacional de plátano ha mostrado un comportamiento acíclico durante el período de 1980 a 1985 (Cuadro 1.3), presentan do una serie de altibajos que indican una variabilidad en los vo-

lúmenes obtenidos de este cultivo; sin embargo, éste ha tenido un crecimiento anual promedio de 3.2% y una producción nacional de 1.7 millones de toneladas al año.

La superficie cosechada ha mostrado una tendencia ligeramente descendente, reduciéndose a una tasa de crecimiento de -0.5% anual; por lo que el comportamiento acíclico se ha derivado de los rendimientos por hectárea.

Los principales productores de plátano son los Estados de: Chiapas, Veracruz, Colima y Tabasco, los cuales aportaron, en el período de 1980 a 1985 el 21.7, 20.0, 14.2, y 12.1 % de la producción nacional respectivamente (cuadro 1.4).

CUADRO 1.3. PRODUCCION NACIONAL DE PLATANO.

Año	Superficie cosechada (hectáreas)	Rendimiento (Ton/ha)	Producción (Ton/año)
1980	73 343	19.6	1 437 765
1981	74 635	21.5	1 604 777
1982	76 658	20.5	1 572 403
1983	72 507	22.6	1 640 462
1984	73 932	28.1	2 076 652
1985	72 806	21.5	1 564 766

FUENTE: Dirección de Asuntos Internacionales, S.A.R.H., con base a datos de la Dirección General de Estudios, Información y Estadística Sectorial. 1985.

CUADRO 1.4. REPRESENTATIVIDAD DE LOS PRINCIPALES ESTADOS PRODUCTORES DE PLATANO (TON).

ESTADO	1980-1985	(%)
Chiapas	358 009	21.7
Veracruz	330 000	20.0
Colima	234 178	14.2
Tabasco	198 860	12.1
Michoacán	155 530	9.4
Oaxaca	106 710	6.5
Nayarit	96 269	5.8
Otros *	169 914	10.3
TOTAL	1 649 470	100.0

FUENTE: Dirección General de Asuntos Internacionales, S.A.R.H., 1985

* Incluye: Campeche, Guerrero, Jalisco, Morelos, Puebla, y Yucatán.

La producción nacional se enfrenta a varios factores que impiden, en primera instancia, obtener un mayor volumen, y en segundo lugar, lograr buena calidad del producto; pues, el auge comercial a nivel internacional ha sido derivado de factores favorables para aquellos países que han mantenido una infraestructura adecuada para su comercialización.

El rendimiento por hectárea varía desde 7.5 Ton/año en Nayarit hasta 20 Ton/año. Lo cual es bajo si se compara con los principales países exportadores, como Honduras (27.3 Ton/año) o Costa Rica (34.1 Ton/año). Esto se debe a que en algunos casos existe un desconocimiento de las prácticas adecuadas de cultivo, en otros casos, el agricultor conoce las prácticas pero no las adopta por

los bajos precios que privan en el mercado a causa del excesivo - intermediarismo en el proceso de comercialización, en el cual, el precio del plátano aumenta hasta un 41% al pasar del productor al consumidor (30). Así mismo, debido a la falta de tecnología adecuada para su conservación, es muy probable que una cantidad significativa de producto; la cual no se ha estimado estadísticamente, - se desperdicie o se use como alimento para ganado.

Los agricultores consideran también como problemas la escasez de mano de obra y transporte, como su propia falta de organización para obtener créditos.

CAPITULO II SECADO CONVENCIONAL

2.1. GENERALIDADES.

En materia de alimentos, el secado se aplica como técnica de conservación, debido a que los microorganismos que provocan su descomposición no pueden crecer ni multiplicarse en ausencia de agua. Por otro lado, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos, no pueden actuar sin agua.

De lo anterior puede decirse que un alimento tiene una vida de anaquel mayor a un contenido de humedad bajo; sin embargo, la humedad final depende de las características de la materia prima y de su proceso de transformación, así como su destino final. En algunos casos es preferible tener humedades menores al 4% para galletas y algunos productos de confitería, para pastas alimenticias se requiere del 8 al 12%, para frutos secos la humedad puede ser del 2% si éstos son en polvo, del 10 al 24% si el fruto es trocea únicamente (36,39).

Es importante mencionar que las propiedades de los alimentos, en especial sus características bioquímicas y biofísicas definen el tipo de secado o procedimiento que puede ser aplicado sin causar deterioro o cambios inaceptables en el sabor, color, textura y cualidades nutricionales.

La geometría y el tamaño del producto en relación a el calentamiento de la superficie, determinan el tiempo de secado. Generalmente las frutas son troceadas en pequeñas piezas para aumentar el área de exposición al medio de calentamiento y disminuye

la distancia de la superficie al centro de la pieza. Esto permite que, la velocidad de secado sea mayor y el tiempo de secado más corto y un proceso de secado económico. Además permite tener un producto con la humedad final uniforme.

Acerca de las condiciones del medio ambiente y sobre todo del aire de secado; la temperatura, humedad, velocidad y presión atmosférica; tienen gran influencia en la rapidez de secado. El manejo adecuado de éstos parámetros permitirá obtener un producto en buenas condiciones y con la humedad final requerida para su destino.

El secado de alimentos presenta ciertas ventajas y desventajas, las cuales se mencionan a continuación:

a) Ventajas.

- Aumenta la vida de anaquel del alimento.
- Permite mayor disponibilidad del producto, sobre todo cuando se trata temporada.
- Reduce el peso y volumen del producto, por lo que se aprovecha mejor el espacio disponible en su almacenamiento.
- Disminuye los costos por manejo y transporte, incluyendo las necesidades de refrigeración.
- El producto puede enriquecerse adicionando algunos nutrientes, como vitaminas y minerales.
- Es útil en el acondicionamiento de materia prima para un proceso posterior.
- Se puede utilizar la forma más económica y disponible para su -

empaque, como: latas, bolsas plásticas, bolsas o cajas laminadas considerando, que deben ser impermeables a la humedad y oxígeno.

b) Desventajas.

- Encogimiento o contracción no deseable.
- Pérdida de vitaminas por oxidación.
- Oscurecimiento enzimático o por reacciones de Maillard.
- Pérdida de sabor, color y olor característico.
- Endurecimiento de la superficie (costras).
- Altos costos de producción a pequeña escala.

Dentro de los aspectos más relevantes que están involucrados - en la conservación de frutos por medio del secado, se encuentra - que el oscurecimiento es uno de los defectos más serios, teniendo efectos notables en el color, sabor, la capacidad de rehidratación (disminuye) y pérdida de vitamina C (10).

La rapidez de oscurecimiento ocurre en la medida en que aumenta la temperatura y el contenido de sustancias que reaccionan para oscurecerse; sin embargo, es necesario que exista agua para - que se lleven a cabo las reacciones, las cuales tienen una velocidad máxima en el intervalo del 15 a 20 % de humedad. Por lo tanto para que un producto sea estable, se requiere secarlo hasta una - humedad inferior al 15 %, para contar con períodos de almacenamiento relativamente largos a temperatura ambiente (36).

El oscurecimiento que se presenta durante el secado de frutas y hortalizas, puede controlarse o inhibirse mediante el empleo de -

agentes antioxidantes (30).

Entre los antioxidantes que usualmente se aplican a los alimentos sometidos a deshidratación se encuentran: el ácido ascórbico y sus sales, el ácido cítrico, el butil-hidroxi-toluol (BHT), el butil-hidroxi-anisol (BHA), los sulfitos, bisulfitos y metabisulfito de sodio o potasio; éstos últimos se usan comunmente para deshidratar frutos (8).

La adición de SO_2 aumenta la estabilidad en almacenamiento, conserva el color, sabor y ayuda a disminuir la pérdida de vitaminas C y A (10).

En términos generales, los alimentos secos no deben exceder de 200 ppm de SO_2 residual, puesto que se rebasaría el umbral de detección a partir del cual se percibe un sabor desagradable (9,10).

Sin embargo, en algunos casos se ha designado un rango mayor en productos secos, por ejemplo en manzanas hasta 2500 ppm y en chabacanos hasta 1500 ppm (36).

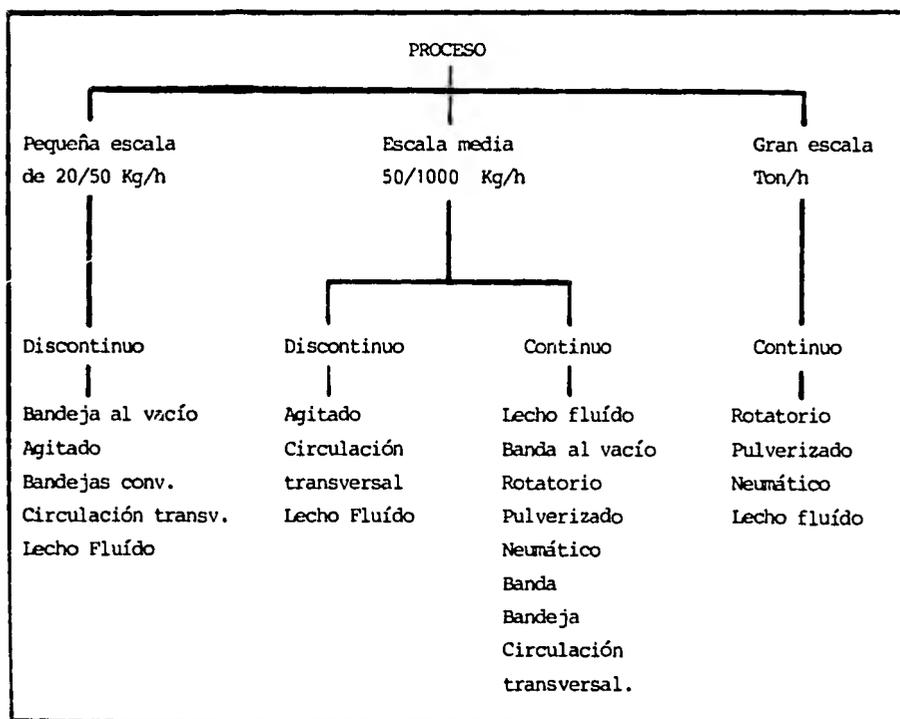
2.2. CLASIFICACION DE LOS EQUIPOS DE SECADO.

En el mercado de secadores para la industria alimenticia, una gran variedad de diseños, cada uno construido para usos específicos; aunque algunos pueden ser lo suficientemente versátiles como para secar más de un tipo de material húmedo.

Los diversos tipos de secadores pueden clasificarse de acuerdo con el modo de operar o con el servicio requerido, así como, en base al tipo o forma de alimentación, también pueden agruparse de acuerdo a su costo operativo y escala de producción (23).

En el cuadro 2.1. se indican los diversos tipos de secadores - de acuerdo a su escala de producción. Puede observarse que la cantidad de secadores disponibles para el secado continuo en gran escala es mucho más limitada que para equipos de tamaño medio.

CUADRO 2.1. CLASIFICACION DE LOS SECADORES POR SU ESCALA DE PRODUCCION .



FUENTE: Nonhebel G.M. y Moss A.A.H.; El secado de sólidos en la industria química. Reverté, México, 1979.

2.3. SECADORES UTILIZADOS PARA FRUTOS.

El secado de frutos reviste gran importancia, principalmente por la disponibilidad que se puede obtener de un fruto de temporada para cualquier época del año.

Los secadores que se utilizan para secar frutos son continuos o discontinuos (intermitentes). La forma en que se deshidratan los frutos, puede ser troceada, en forma líquida o preformados.

Algunos productos como el plátano pueden ser secados en forma de hojuelas mediante secadores de tambor. Las hojuelas se utilizan en la preparación de harinas para panificación o en la elaboración de alimentos infantiles.

Por lo general, cuando se secan frutos troceados, el tipo de secadores usados son: los secadores atmosféricos y los secadores continuos de banda o de túnel (35,36,39).

2.4. SECADORES DE CHAROLAS ATMOSFERICOS.

A éste tipo de secadores se les conoce también como horno de compartimientos o de Grinnel, como secadores de bandeja a presión atmosférica. Consisten en una o más cámaras de compartimientos en donde se ubican las charolas o bandejas con el material a secar. El espesor de carga para las bandejas es normalmente de 4 cm (26) y generalmente éstas se colocan sobre bastidores que pueden moverse como unidades para ser colocados en la cámara de secado.

El secado se realiza con aire caliente que circula sobre las bandejas mediante uno o varios ventiladores. En algunos casos las

bandejas estan constituidas por una malla perforada y el aire de secado pasa a través del material que esta sobre ellas.

El calor es suministrado generalmente con vapor o agua caliente que circula por serpentines dispuestos dentro o fuera del compartimiento de secado. A veces se usa calefacción eléctrica, gas, petróleo o gases de combustión.

Entre los equipos auxiliares se incluyen las bandejas y conjuntos de bastidores que se necesitan para poder cambiar fácilmente de un producto a otro, además de vehículos para su transporte y - equipo de lavado para las bandejas.

Los secadores de charolas pueden clasificarse según la forma - de circulación de aire en el secador (23), es decir:

- a) Circulación por convección natural.
- b) Circulación forzada de lado a lado.
- c) Circulación forzada de atrás hacia adelante sobre las bandejas.
- d) Circulación forzada a través de bandejas perforadas.

En los secadores de circulación forzada, la velocidad de aire de secado es de 1.5 m/s por lo general, y la recirculación del - aire esta comprendida entre un 80 y 95 % (35).

La temperatura máxima de operación en dichos secadores esta sobre los 120 °C. Pero la temperatura, como el tiempo de secado pa-cierto producto, se determina experimentalmente.



CAPITULO III LA ENERGIA SOLAR Y EL SECADO SOLAR.

Desde hace siglos el hombre ha tratado de aprovechar la energía solar. Pero, sólo hasta la década de los años 70 es cuando se ha incrementado la investigación y el desarrollo de distintos sistemas para la captación y el aprovechamiento de la energía solar, - la cual es abundante, universal y no requiere de transporte.

La energía solar puede ser utilizada para la producción de trabajo mecánico; pero otras aplicaciones donde resultaría atractiva es: el calentamiento de agua para consumo doméstico, procesos de secado y destilación de agua, calefacción y enfriamiento de ambientes, generación de cantidades moderadas de electricidad, entre otras.

3.1. NATURALEZA DE LA RADIACION SOLAR.

Todos los días nuestro planeta recibe del sol un caudal de energía del que aprovechamos una fracción varias miles de veces menor que el total. Hasta la ínfima proporción que llega al techo de cualquier casa es muy superior, si pudiese utilizarse, a toda la energía que recibimos a través de los conductores eléctricos.

La energía solar radiante que recibe la Tierra es de 173×10^{15} W y es mucho mayor comparado con el régimen de consumo humano de 7×10^{12} W (34).

Dado que la distancia del Sol a la Tierra no es constante, la energía solar que recibe nuestro planeta fuera de su atmósfera no

es constante, es decir, el valor correspondiente a la constante solar varía un 3.5 % (22).

La radiación extraterrestre comprendida entre 0.29 μ m y 2.3 μ m de longitud de onda, es transmitida con atenuaciones a la superficie de la Tierra. Esto se debe a los fenómenos de absorción por ozono, agua y dióxido de carbono, así como la disipación de otros componentes en la atmósfera, tales como polvo, aire y monóxido de carbono.

La intensidad de la radiación solar depende de la altitud y el clima en una determinada zona. En la parte central de la República mexicana es de 1750 KW-h/m²año (22).

3.2. MEDICION Y ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR.

Existen distintos instrumentos para medir la radiación solar. Todos ellos la convierten a otra forma de energía, dando como resultado una medida o lectura proporcional a la intensidad de la radiación. Entre los instrumentos más comunes se encuentran: El piranómetro, el pirheliómetro, el heliógrafo.

Sin embargo, en ausencia de datos experimentales existen numerosas correlaciones para estimar la radiación mensual promedio en una superficie horizontal, en un lugar dado, las cuales hacen uso de información fácilmente obtenible como el número de horas posibles de asoleamiento, latitud del lugar y precipitación pluvial.

Almanza R. presenta curvas de radiación global mensual y anual para la República mexicana. En este caso puede decirse que la península de Baja California, la costa occidental y la parte corre

pendiente a la península de Yucatán, son las zonas más favorables con la radiación solar. De una extensión territorial de 2,000,000 de Km², casi el 40 % del país recibe más de 500 cal/cm² día(2,22).

3.3. CAPTACION DE LA ENERGIA SOLAR.

Según la necesidad y método de captación, la energía solar, es transformada por medio de: conversión, química; eléctrica; térmica o fototérmica. Esta última encuentra múltiples aplicaciones en la captación de energía solar y transformarla en calor útil hacia algún medio de trabajo (agua, aire, u otro fluido).

La conversión térmica es producida por medio de una superficie absorbadora de energía radiante, la cual es degradada en forma de calor. Este tipo de conversión se logra mediante colectores y concentradores de energía solar.

Algunas de las aplicaciones de los colectores solares son principalmente el calentamiento de agua y aire, su uso reside en la calefacción y enfriamiento de ambientes, también en procesos de secado (13,21).

Existen diversos tipos de colectores solares; sin embargo, su función está limitada a temperaturas inferiores a 100 °C (22); pero, muestran algunas ventajas sobre los concentradores solares, ya que no requieren de riguroso mantenimiento, ni de un seguimiento continuo del Sol, además, pueden constituir techos en algunas edificaciones.

Marcal Queiroz (27); Szokolay S.V. (34), mencionan diversos tipos de colectores solares que pueden ser aplicados para el calentami-

ento de aire. En la figura 3.1. se muestra esquemáticamente las partes que componen un colector solar.

Como puede observarse en la figura 3.3. la energía solar atraviesa una o varias cubiertas para luego quedar en la placa de absorción. El calor es transferido por conducción llegando eventual

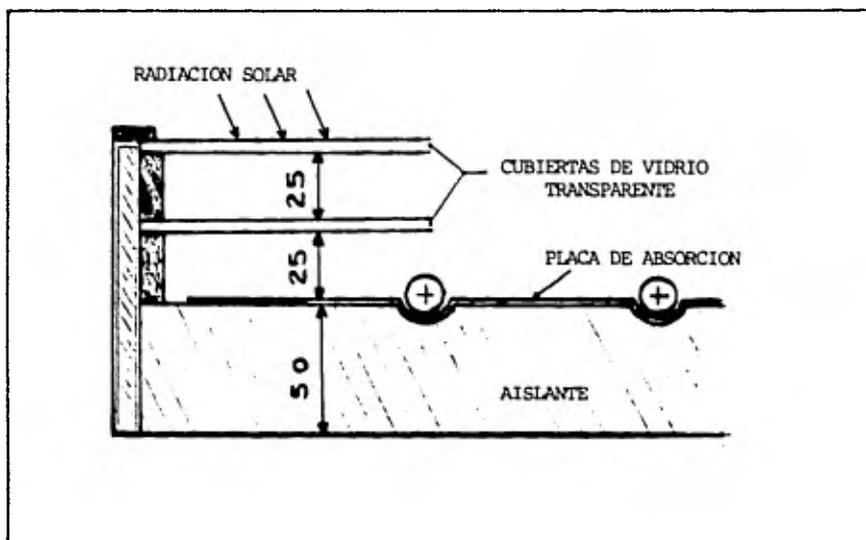


FIG. 3.1. COMPONENTES DE UN COLECTOR SOLAR. (ACOT: mm)
FUENTE: Manrique, J.A. Energía Solar, H&H México, 1984 p.128.

mente por convección hacia el fluido de trabajo.

El aislante en la parte inferior y los lados del colector sirve para disminuir las pérdidas de calor de la placa de absorción. To-

do el conjunto se encuentra dentro de un contenedor que puede ser metálico, plástico o de algún otro material.

Para la construcción de un colector solar, es necesario tomar en cuenta las características recomendables para sus componentes principales (27,31,33,34).

3.4. SECADO SOLAR.

El objetivo del secado solar es deshidratar los excedentes de producción agrícola, con fines de autoconsumo, doméstico o de venta local en mercados de vecindad inmediata, y con ello, evitar algunos de los inconvenientes que presenta el secado al Sol tradicional. También, el producto seco puede ser usado por sectores industriales como materia prima para la elaboración de diversos productos, por ejemplo: alimentos infantiles, postres, harinas, etc.

Las aplicaciones de los secadores solares son tan amplias, por así decirlo, como las de los secadores convencionales y generalmente se usan para pequeñas escalas.

En los secadores solares puede secarse además de alimentos, el tabaco, la madera y especias, siendo éstas de un gran valor comercial.

Larrea R.(19) presenta la preparación y el secado solar de diversos alimentos, haciendo algunas observaciones acerca de la forma de envasado.

A través del tiempo se han desarrollado diversos tipos de secadores, los cuales, en algunos casos funcionan como colectores solares, combinando el efecto de invernadero para calentar el aire-

en el gabinete de secado. Los colectores solares como tales, pueden formar parte del secador, con objeto de llevar a cabo el calentamiento del aire de secado.

Actualmente se tiende a desarrollar sistemas que además de utilizar energía solar, ocupen combustibles fósiles o energía eléctrica para complementar las necesidades de energía, a fin de mantener condiciones óptimas de funcionamiento en un sistema operado parcialmente con energía solar (21).

3.4.1. PRINCIPIOS BASICOS DEL SECADO SOLAR.

Existen dos fases principales del proceso utilizado en los secadores solares agrícolas, las que son: el calentamiento solar del fluido utilizado (aire) y el secado propiamente dicho, en el cual, el aire caliente proporciona la energía necesaria para evaporar la humedad del material que se ha de secar. La primera de éstas dos fases puede realizarse de dos maneras:

- 1) Indirectamente; mediante colectores solares o calentadores de aire, utilizando la convección natural o forzada para precalentar el aire ambiente y reducir su humedad relativa.
- 2) Directamente; calentando en el mismo lugar el aire, que a su vez deshidrata el producto.

Para que se lleve a cabo el secado, el primer paso es la transferencia de calor del aire adyacente, por conducción y convección al material húmedo, mediante superficies calientes en contacto con

dicho material. Esto ocurre a temperaturas superiores a las del producto que se seca, debido al calor emitido por radiación, proveniente de superficies circundantes o del Sol.

En el secado por radiación directa, parte de ésta puede penetrar en el material y ser absorbida por el sólido mismo. Bajo estas condiciones se calienta el interior del material y la superficie facilita la transferencia térmica del sólido.

Por razones económicas generalmente se buscan velocidades máximas de secado; sin embargo, hay que tomar en cuenta la calidad de producto y evitar temperaturas excesivas, pues, algunos materiales al secarse tienden a formar superficies duras y secas, relativamente impermeables a la transferencia del líquido y de vapor. Por lo tanto deben secarse a un ritmo lo suficientemente lento para evitar la formación de cortezas, lo cual se logra controlando la velocidad de secado, limitando el suministro de calor o regulando la humedad del aire secante.

Los materiales secados por radiación directa tienen la propiedad de absorber dicha radiación, en función de lo opaco que presentan las superficies del producto durante el proceso.

3.4.2. CLASIFICACION DE LOS SECADORES SOLARES.

Los secadores solares se clasifican según la manera como se utiliza la radiación solar o bien, su modo de funcionamiento.

Lawand T.A. (21) propone la siguiente clasificación para secadores solares:



1. Secado al Sol o natural.

En éste proceso se hace uso de la acción natural de la radiación solar, como de la temperatura, humedad y movimiento del aire ambiente para lograr el secado. Es la exposición del material, sin ningún receptáculo.

2. Secadores solares directos.

En estos secadores, el material se coloca en un receptáculo con cubierta o paneles laterales transparentes. El calor es absorbido de la radiación solar sobre el producto mismo, así como sobre las superficies internas de la cámara de secado. Este calor evapora la humedad del producto que se ha de secar.

Existen varios modelos o prototipos desarrollados por diferentes investigadores (13,19,20,21,27). Algunos usan desde materiales muy rústicos hasta diseños de construcción en específico.

En la figura 3.2, se muestra esquemáticamente dos prototipos de secadores, uno usa cubierta de vidrio y otro de plástico (19).

3. Secador solar indirecto.

En estos secadores, la radiación solar no cae directamente sobre el material que se ha de secar. El aire se calienta en un colector solar y se conduce luego a la cámara secadora para deshidratar el producto, ver fig.3.3.

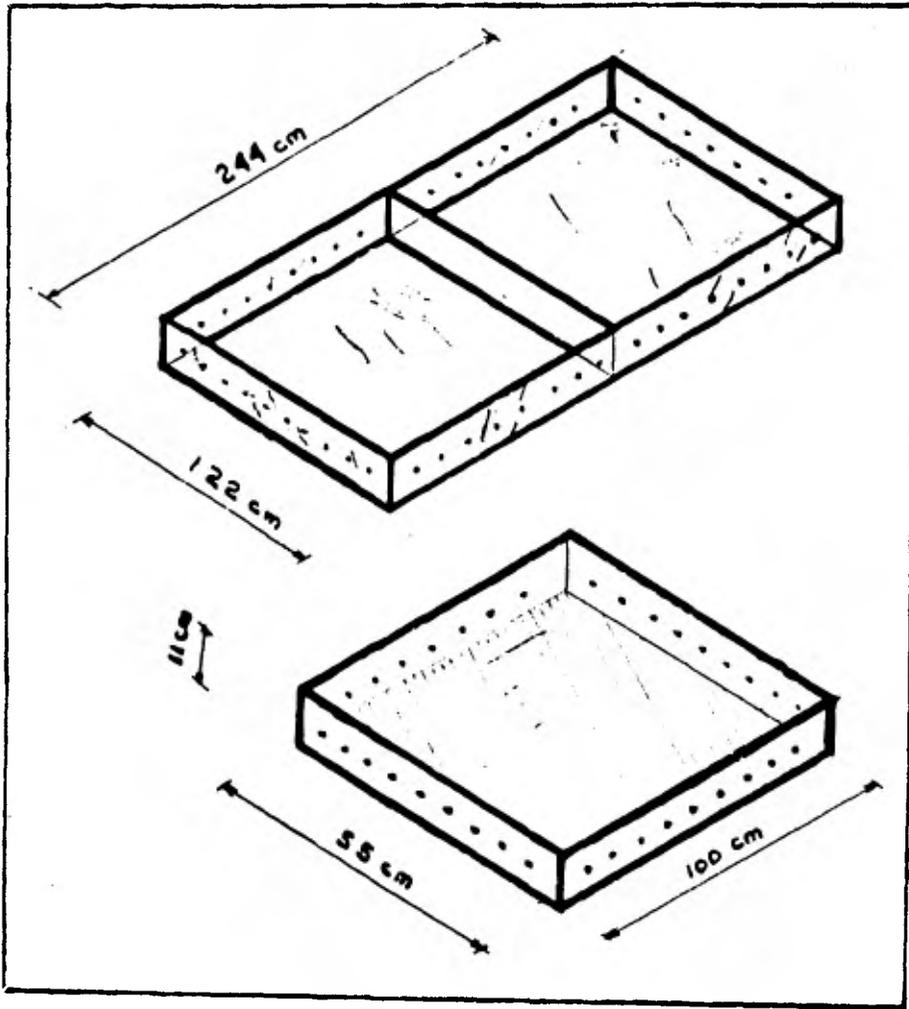


FIG. 3.2. SECADORES SOLARES DIRECTOS.

FUENTE: Larrea R., Secadores de alimentos con el calor del Sol; Inf. Tec. IPN, No. 1-2.

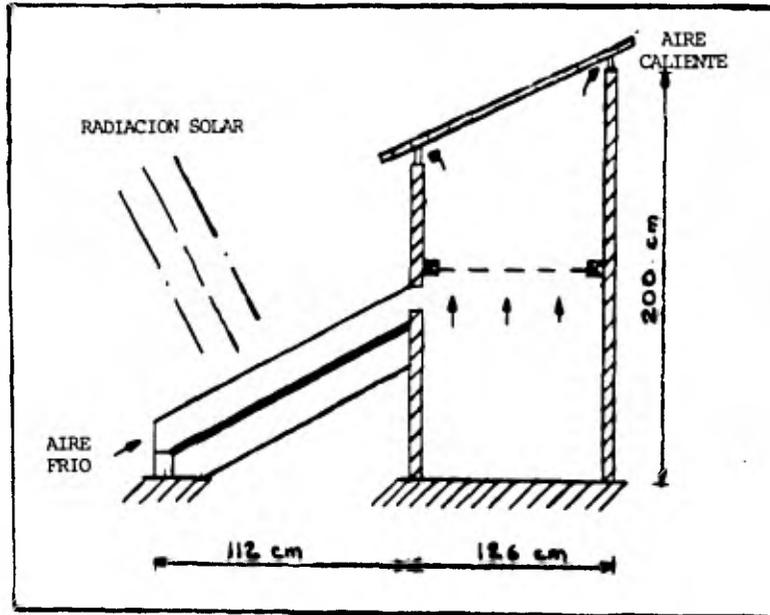


FIG. 3.3 SECADOR SOLAR INDIRECTO.

4. Secador solar mixto.

Es una combinación de un secador solar directo e indirecto. En estos secadores, la acción combinada de la radiación solar que cae directamente sobre el material que se ha de secar y el calentamiento del aire con un colector solar, proporcionan el calor necesario para lograr el secado, ver fig.3.4.

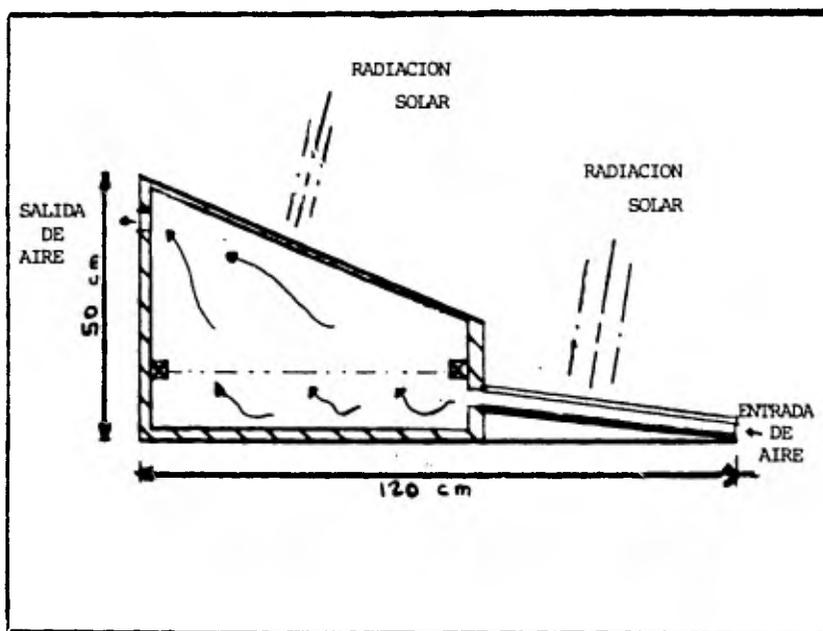


FIG. 3.4. SECADOR SOLAR MIXTO.

5. Secadores híbridos.

Se denominan así aquellos equipos en los que además de utilizar la energía solar, se les provee de otra fuente de energía, por ejemplo, un combustible o electricidad; con el fin de suministrar calor complementario al sistema.

CAPITULO IV EXPERIMENTACION Y RESULTADOS.

4.1. MATERIALES Y METODOS.

Las pruebas efectuadas en el presente estudio se efectuaron en las instalaciones de la carrera de Ingeniero en Alimentos, en Cuautitlán Izcalli y Cuautitlán de Romero Rubio, Estado de México.

El material empleado para la experimentación fué el siguiente:

4.1.1. MATERIA PRIMA.

- Plátano (Musa Sapientum lacatán) el cual se conoce comunmente como banano o plátano de mesa.
- Antioxidantes: ácido cítrico y bisulfito de sodio
- Manteca vegetal como lubricante para las charolas.

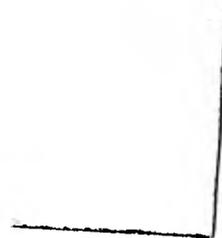
4.1.2. EQUIPO.

1.- Estufa eléctrica de secado (fig. 4.1).

- Modelo Thelco, Blue M.
- Dimensiones de la cámara de secado: 48X38X46 cm.
- Circulación de aire por convección forzada ($26.7 \text{ m}^3/\text{hr}$).
- Control automático de temperatura, temperatura máxima de operación: $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.- Secador de charolas (fig. 4.2).

- Tipo atmosférico; Polingenieros.
- Cámara de secado de 106X75X100 cm, con estanterías.



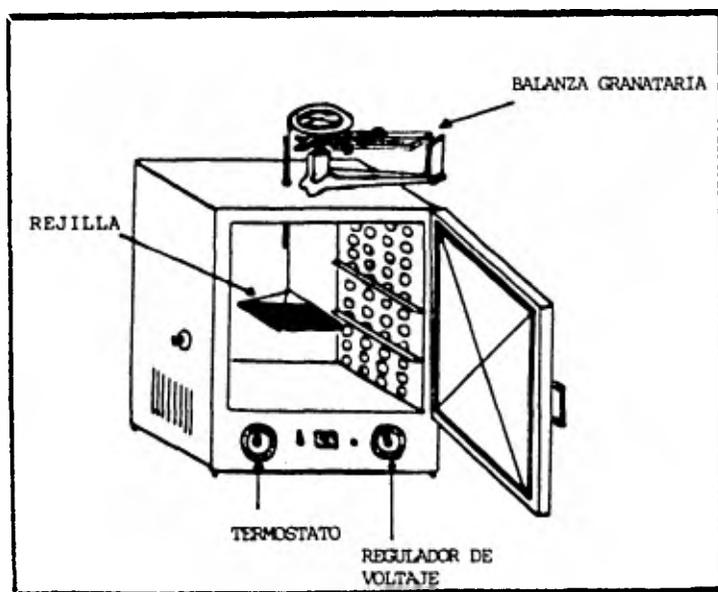


FIG. 4.1. ESTUFA ELECTRICA DE SECADO.

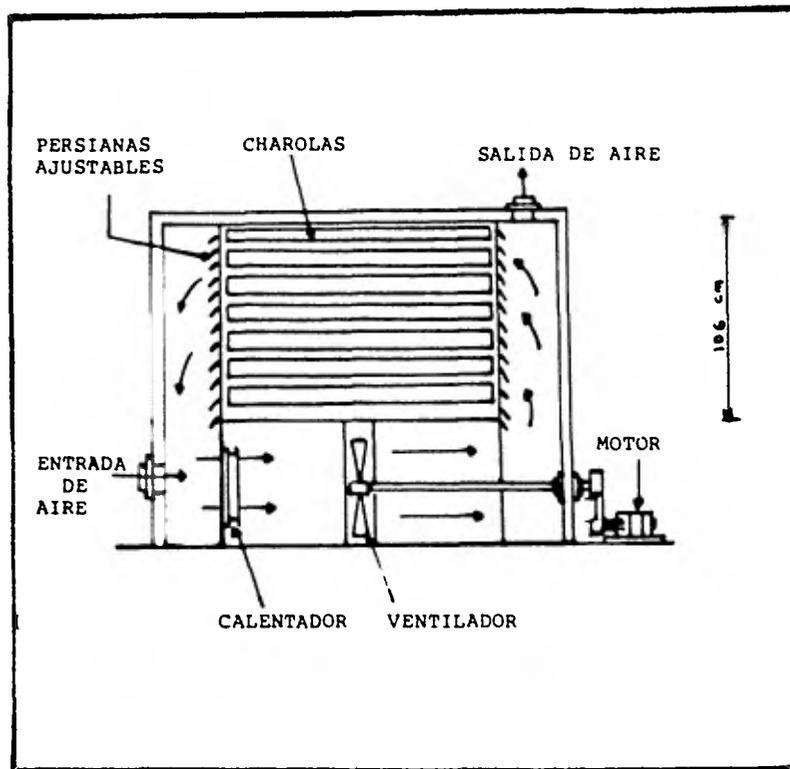


FIG. 4.2. SECADOR DE CHAROLAS ATMOSFERICO.

- Charolas de 50X75 cm de malla perforada.
- Intercambiador de calor de 27.5X25.5X49 cm, de tubos aletados con una área de transferencia de 9.3 m².
- Medio de calentamiento: vapor.
- Ventilador axial con motor externo de 1 Hp y 840 RPM.

3.- Secador solar directo (fig. 4.3).

- Construído con madera de 1.5 cm de espesor, con recubrimiento de impermeabilizante y acabado en negro mate.
- Cubierta de 2 vidrios transparentes de 3 mm de espesor con una separación de 1.5 cm entre ambos.
- Dimensiones: 100X54 cm, 25 cm de altura por la parte posterior y 11 cm enfrente; cuenta con perforaciones de 1 cm de diámetro alrededor de las paredes laterales.
- Charola: rejilla de malla perforada colocada sobre cartones acabado en negro mate.

4.1.3. INSTRUMENTOS.

- 1.- Balanza granataria OHAUS con una sensibilidad de 0.1 g y capacidad de 1.7 kg.
- 2.- Psicrómetro, que consta de 2 termómetros de mercurio de -10 a 100 °C, uno de bulbo seco y otro de bulbo húmedo.
- 3.- Anemómetro digital MITUTOYO, DE 15 cm de diámetro.
- 4.- Balanza analítica METTLER, sensibilidad de 0.1 mg.
- 5.- Cronómetro.

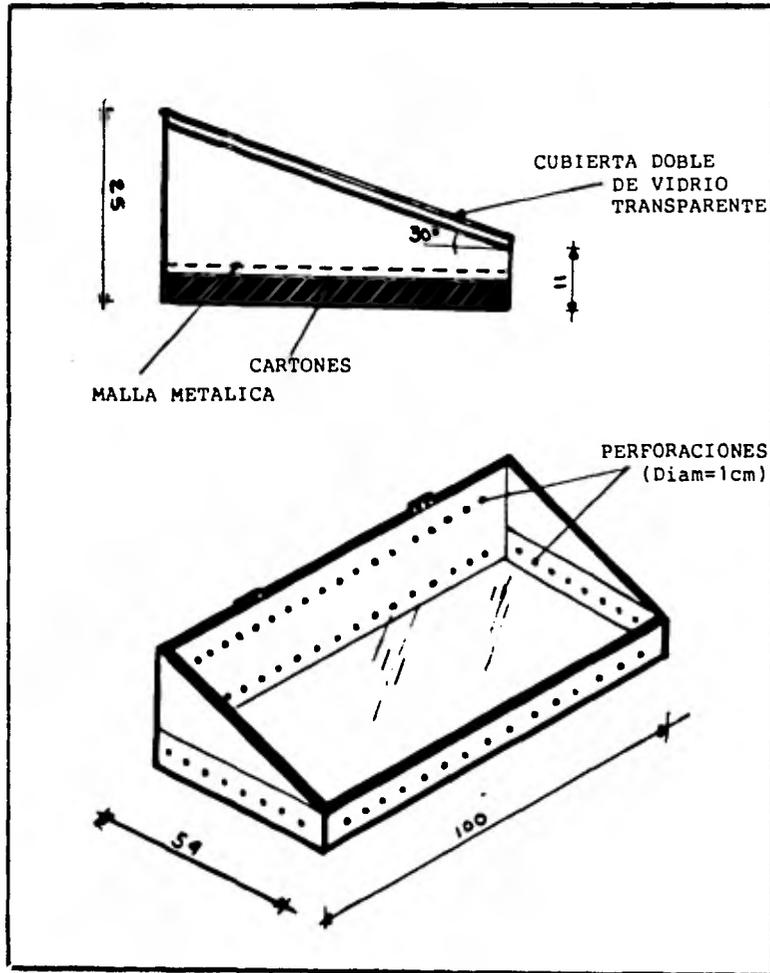


FIG. 4.3. SECADOR SOLAR DIRECTO.

El procedimiento para llevar a cabo el secado de plátano se muestra en el diagrama de bloques de la figura 4.4, dicho procedimiento puede aplicarse al secado convencional o solar, debido a que ambos procesos únicamente difieren en la etapa de secado.

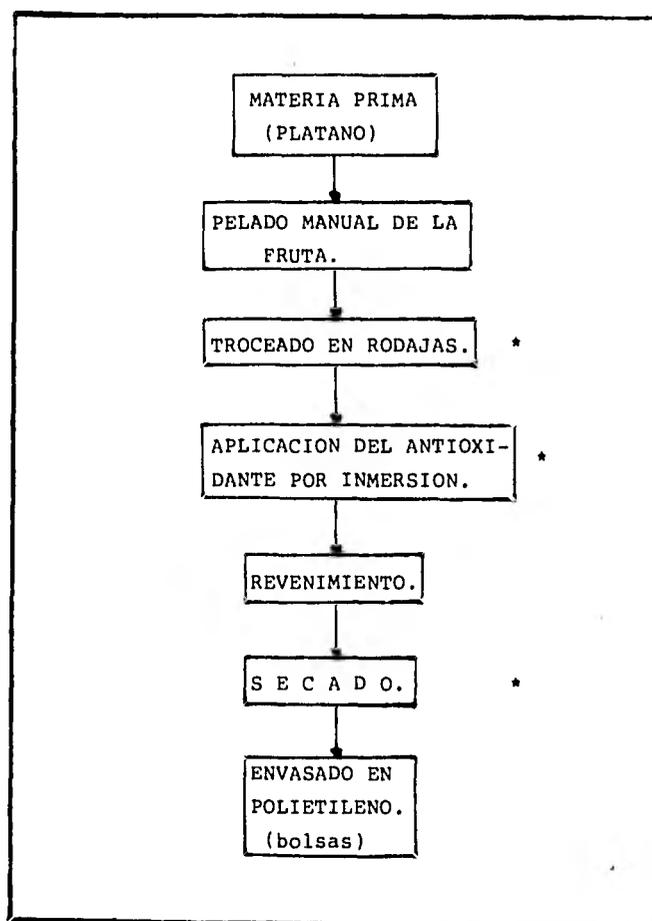


FIG. 4.4. PROCESO DE SECADO DE PLATANO.

*Operaciones críticas del proceso.

Las pruebas de secado se efectuarón de acuerdo al proceso de secado de plátano, manteniendo las siguientes condiciones constantes:

- Dirección del flujo de aire, en forma paralela a la charola.
- Velocidad del aire.
- Cantidad de muestra.
- Area inicial de secado.

La rapidez de secado se evaluó en la forma tradicional, determinando la pérdida de peso de la muestra en función del tiempo, lo cual, se logró manteniendo suspendida la muestra por medio de una balanza granataria (fig. 4.1). Las curvas de velocidad de secado se elaboraron de acuerdo al procedimiento expuesto por Geankoplis (12).

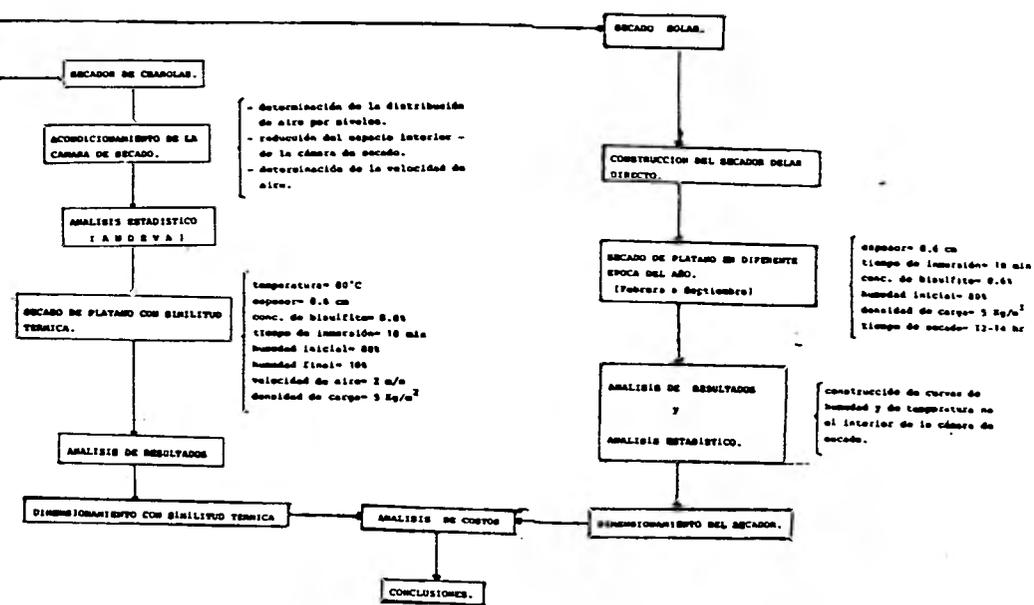
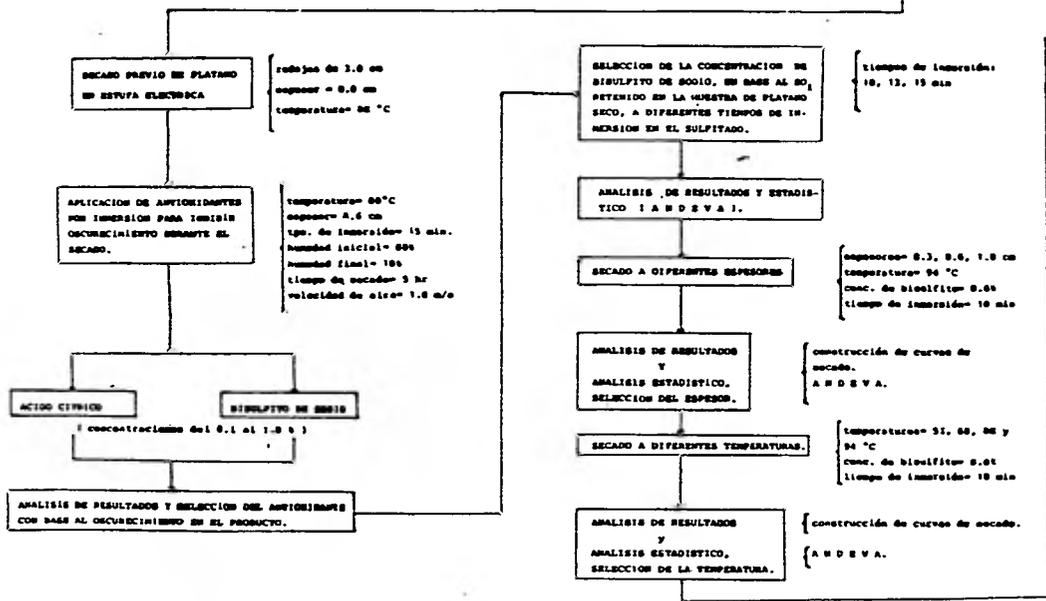
Las técnicas usadas para la determinación de humedad y SO_2 residual fuerón las de estufa (4) y el método de Pearson-Wong (25, - apéndice A) respectivamente.

4.2. CUADRO METODOLOGICO EXPERIMENTAL.

En el cuadro metodológico experimental se presenta de manera esquemática la secuencia seguida durante el desarrollo del presente trabajo, así como las condiciones experimentales de cada etapa para el secado de plátano.

CAMPO METEOROLOGICO-EXPERIMENTAL.

SECADO DE PLATANO.



4.3. RESULTADOS Y DISCUSION.

4.3.1. SECADO PREVIO.

El secado previo del plátano se realizó en tres estados de madurez, de acuerdo al color que presenta la cascáa en la fruta; en contrándose que:

- Se presenta un notable oscurecimiento en cualquier estado de madurez.
- En el plátano que presenta un color verde se forma una costra en la superficie, aspecto harinoso y sabor astringente.
- El plátano verde-amarillo se seca de manera uniforme y su sabor es característico.
- El oscurecimiento en el plátano de color amarillo es más notable que en los anteriores y presenta ampollas.
- En términos generales se presenta una contracción del 70% al disminuir el volumen inicial, o sea, del 60% con respecto al espesor y del 20% al diámetro.

Debido a lo anterior se decidió secar el plátano troceado con un estado de madurez intermedio (color verde-amarillo) y aplicar antioxidantes para inhibir el oscurecimiento.

4.3.2. APLICACION DE ANTIOXIDANTES.

Por lo general para el secado de frutos se recomienda el uso de antioxidantes en concentraciones del 1% en solución (3,36). Para la siguiente experimentación se aplicó del 0.1% al 2%.

Se evaluó visualmente los antioxidantes aplicados por inmersión - ácido cítrico y bisulfito de sodio - a las muestras, observando el oscurecimiento presente al final del secado.

A concentraciones menores al 0.7% el ácido cítrico no inhibe el oscurecimiento durante el secado; a concentraciones del 0.8% a 2% retarda éste fenómeno por un período de 24 hr; sin embargo, persiste sabor ácido en la fruta seca a concentraciones mayores a 0.5 por ciento.

Con respecto al bisulfito de sodio a concentraciones mayores a 0.3%, no se presenta oscurecimiento después de terminado el secado y con mayor estabilidad que el ácido cítrico.

4.3.3. SELECCION DE LA CONCENTRACION DE BISULFITO DE SODIO.

Se efectuó la selección de la concentración de bisulfito de sodio a diferentes tiempos de inmersión, teniendo como variable de respuesta la concentración de SO_2 retenido en la fruta.

De acuerdo a la figura 4.5 y en base a las normas establecidas de SO_2 residual en productos secos (9,10), se eligió un tiempo de inmersión de 10 min y una concentración de 0.6% para inhibir el oscurecimiento.

El análisis de varianza realizado demuestra que una pequeña variación en la concentración de bisulfito de sodio en solución, es altamente significativa, según se aprecia en el cuadro 4.0.

4.3.4. SELECCION DEL ESPESOR DE LA MUESTRA.

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran gráficamente el comportamiento

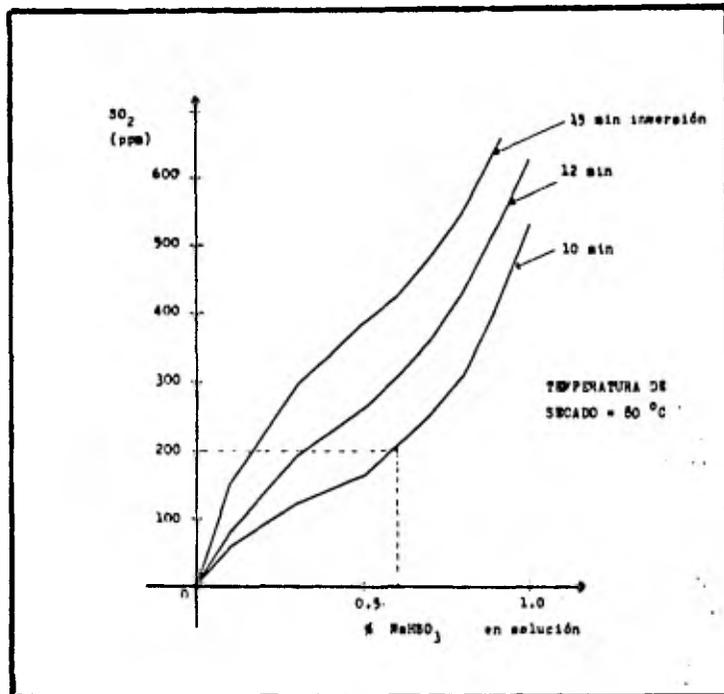


FIG. 4.5. CURVAS DE SO₂ RESIDUAL PARA PLATANO SECO (10%), A DIFERENTES TIEMPOS DE INMERSION EN EL SULFITADO.

CUADRO 4. 0. ANALISIS DE VARIANZA: EFECTO DEL SULFITADO
EN EL CONTENIDO DE SO₂RESIDUAL.

Fuente de variación	suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calc.	F tablas
Tratamientos	211,268.8	2	106,134.4	99,81 *	3.63
Bloques	735,191.2	8	91,898.9		
Residual	17.013.2	16	1,063.3		
Total	964,473.2	26			

nivel de significancia= 0.05

* Significativo.

del plátano durante el secado al variar el espesor. En ellas puede observar que:

- A medida que disminuye el espesor el tiempo de secado es más corto, por lo que la velocidad de secado es mayor.
- Al inicio, durante los primeros minutos de secado, la pérdida de humedad es muy rápida; sin embargo, al transcurrir el tiempo de secado, dicha pérdida es más lenta cuanto mayor es el espesor (fig. 4.6).
- El aspecto que presenta el producto con el menor espesor semeja al de una oblea; en cambio, con el espesor intermedio se tiene el aspecto similar al de la fruta original y para el espesor mayor, se tiene la formación de costras en la superficie.
- En el período de velocidad decreciente (fig. 4.7) el efecto es muy marcado, lo cual se debe a que la difusión de agua a través del sólido se ve seriamente afectada por los cambios en la estructura interna del producto (23), o sea tiende a disminuir durante el transcurso del secado.
- En la cuadro 4.1 se puede apreciar que el espesor resulta ser inversamente proporcional al tiempo de secado y se dificulta alcanzar humedades bajas. En el cuadro 4.2 se muestra estadísticamente que la variación del espesor es significativa.

En base a lo anterior, se eligió un espesor intermedio (0.6 cm) de los estudiados en esta parte experimental.

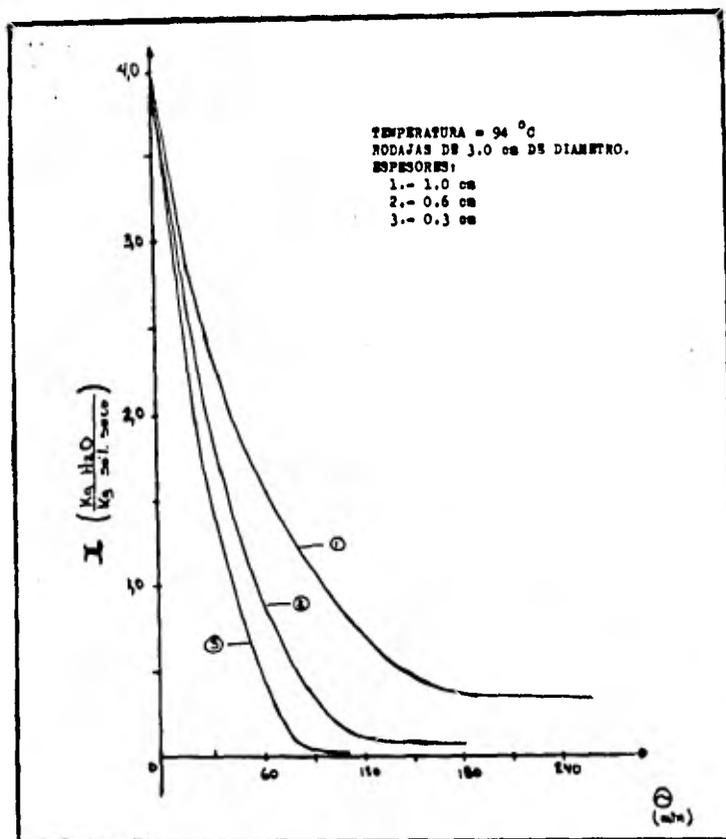


FIG. 4.6. CURVAS DE SECADO A DIFERENTE ESPESOR DE LAS RODAJAS EN EL SECADO DE PLATANO.

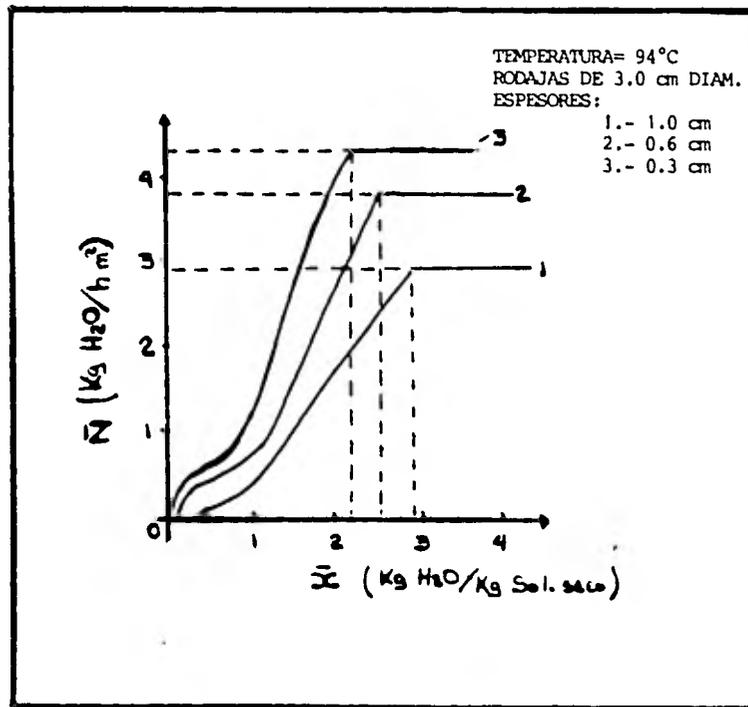


FIG. 4.7. INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LAS RODAJAS EN LA VELOCIDAD DE SECADO.

CUADRO 4.1. EFECTO DEL ESPESOR DE LAS RODAJAS EN EL SECADO DE PLATANO.

ESPESOR (cm)	Xc	Oc	Nc	Xf	Of	X (120')
0.3	2.20	18	4.32	0.01	100	0.01
0.6	2.54	18	3.80	0.08	150	0.10
1.0	2.86	18	2.88	0.32	240	7.40

Xc = humedad crítica en base seca (Kg agua/Kg de sólido seco).

Oc = tiempo de secado en el período de velocidad constante (min)

Nc = velocidad de secado en el período de velocidad constante (Kg de agua/hr m²).

Xf = humedad final de secado en base seca.

Of = tiempo final de secado (min).

X (120') = humedad a los 120 minutos de secado, en base seca.

CUADRO 4.2. ANALISIS DE VARIANZA: EFECTO DEL ESPESOR EN EL SECADO DE PLATANO.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fcalc.	Ftablas
Tratamientos	1.78	2	0.89	44.50 *	4.10
Bloques	6.83	5	1.37		
Residual	0.19	10	0.02		
Total	8.80	17			

nivel de significancia = 0.05

* Significativo.

4.3.5. SECADO A DIFERENTES TEMPERATURAS.

En lo referente al estudio del efecto de la temperatura, se tomo en cuenta el intervalo recomendado por la literatura, de 60 a 82 °C. Sin embargo, debido a las limitaciones de control que presenta el equipo, se trabajó con las siguientes temperaturas:

$$\begin{array}{ll} Tg_1 = 53^\circ\text{C} & Tg_3 = 80^\circ\text{C} \\ Tg_2 = 68^\circ\text{C} & Tg_4 = 94^\circ\text{C} \end{array}$$

Las figuras 4.8 y 4.9 muestran el comportamiento del plátano durante el secado a diferentes temperaturas.

En la figura 4.9 puede observarse que el efecto de la temperatura es más notable en el período de velocidad constante, pues, dicho esta controlado totalmente por las condiciones de secado y no por las características internas del producto (23).

En el cuadro 4.3 se puede apreciar que la velocidad de secado en el período de velocidad constante (N_c) es proporcional a la temperatura; así como la humedad crítica disminuye al incrementar dicha temperatura.

El secado a 94 °C se verifica en un tiempo muy corto; sin embargo, el producto presenta quemaduras y ampollas en la superficie. En cambio, a 80 °C se permite un secado rápido sin daño al producto. Por lo que se eligió este valor para las pruebas subsecuentes a la experimentación.

De acuerdo al análisis estadístico del cuadro 4.4 se tiene que la variación de la temperatura es significativa, ejerciendo un papel determinante en esta operación.

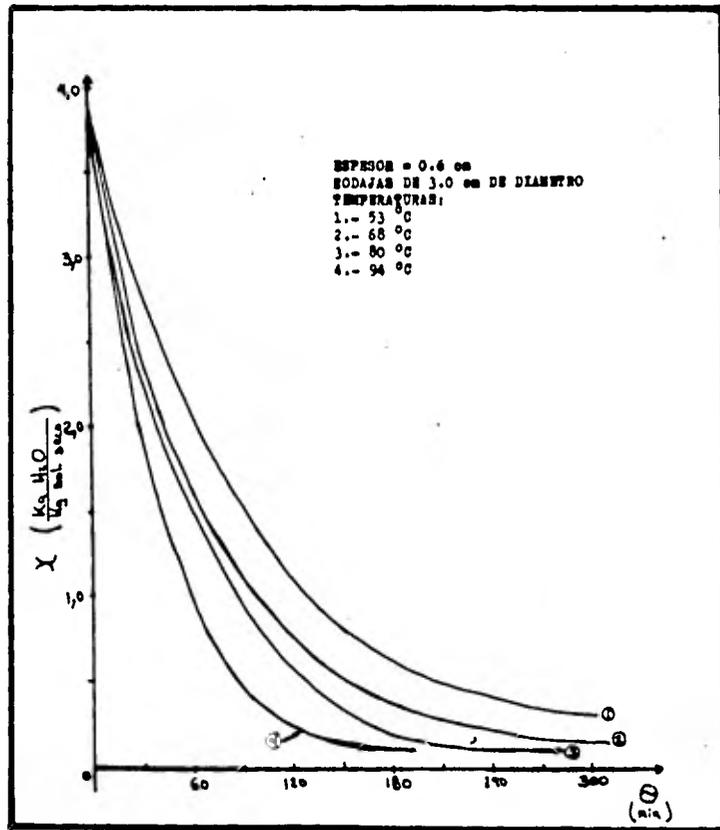


FIG. 4.8. CURVAS DE SECADO A DIFERENTE TEMPERATURA DEL AIRE DE SECADO.

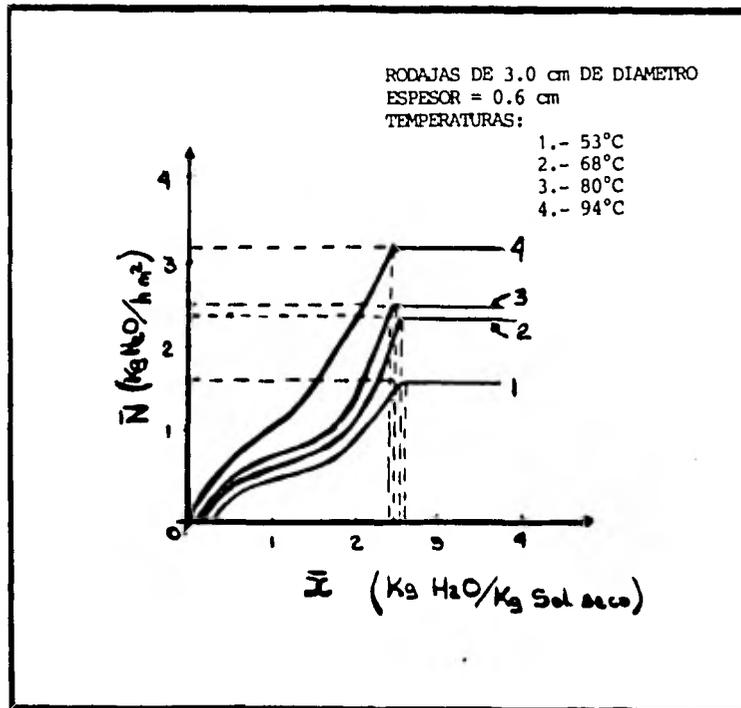


FIG. 4.9. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN LA VELOCIDAD DE SECADO.

CUADRO 4.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL SECADO DE PLATANO TROCEADO.

TEMPERATURA (°C)	Xc	Oc	Nc	Xf	Of	X (120')
53	2.60	34	1.60	0.35	480	1.10
68	2.54	28	2.40	0.12	300	0.70
80	2.50	22	2.50	0.10	210	0.56
94	2.44	18	3.20	0.08	180	0.24

CUADRO 4.4. ANALISIS DE VARIANZA: EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE DE SECADO EN EL SECADO DE PLATANO.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calc.	F tablas
Tratamientos	0.79	7	0.11	2.68 *	2.29
Bloques	17.06	5	3.41		
Residual	1.43	35	0.04		
Total	19.28	47			

nivel de significancia = 0.05

* Significativo.

4.3.6. ACONDICIONAMIENTO DE LA CAMARA DE SECADO.

Para conocer la distribución del flujo de aire en el interior de la cámara de secado en el secador de charolas, se determinó la velocidad de aire por niveles, utilizando un anemómetro y cerrando la salida del tiro del secador.

Las velocidades promedio obtenidas van desde 0.1 a 1.0 m/s; sin embargo, la velocidad recomendada para este tipo de secadores es de 2 a 6 m/s (23,26,35).

Para mejorar la distribución de aire y aumentar su velocidad se redujo la cámara, quedando entonces de 54X100X75 cm (fig 4.10).

Posteriormente se midió la velocidad de aire en las zonas indicadas en la figura 4.10. El promedio de la velocidad de aire en el interior de la cámara fué de 2.15 m/s.

El análisis de varianza del cuadro 4.5 muestra que no hay una variación significativa de la velocidad del aire en la cámara de secado.

4.3.7. SECADO DE PLATANO CON SIMILITUD TERMICA.

Una vez adaptada la cámara, se llevó a cabo el secado de plátano en el secador de charolas para compararlo con el secado solar a una humedad final del 10%. Se trabajó a las condiciones obtenidas en las pruebas anteriores, de acuerdo al cuadro metodológico-experimental.

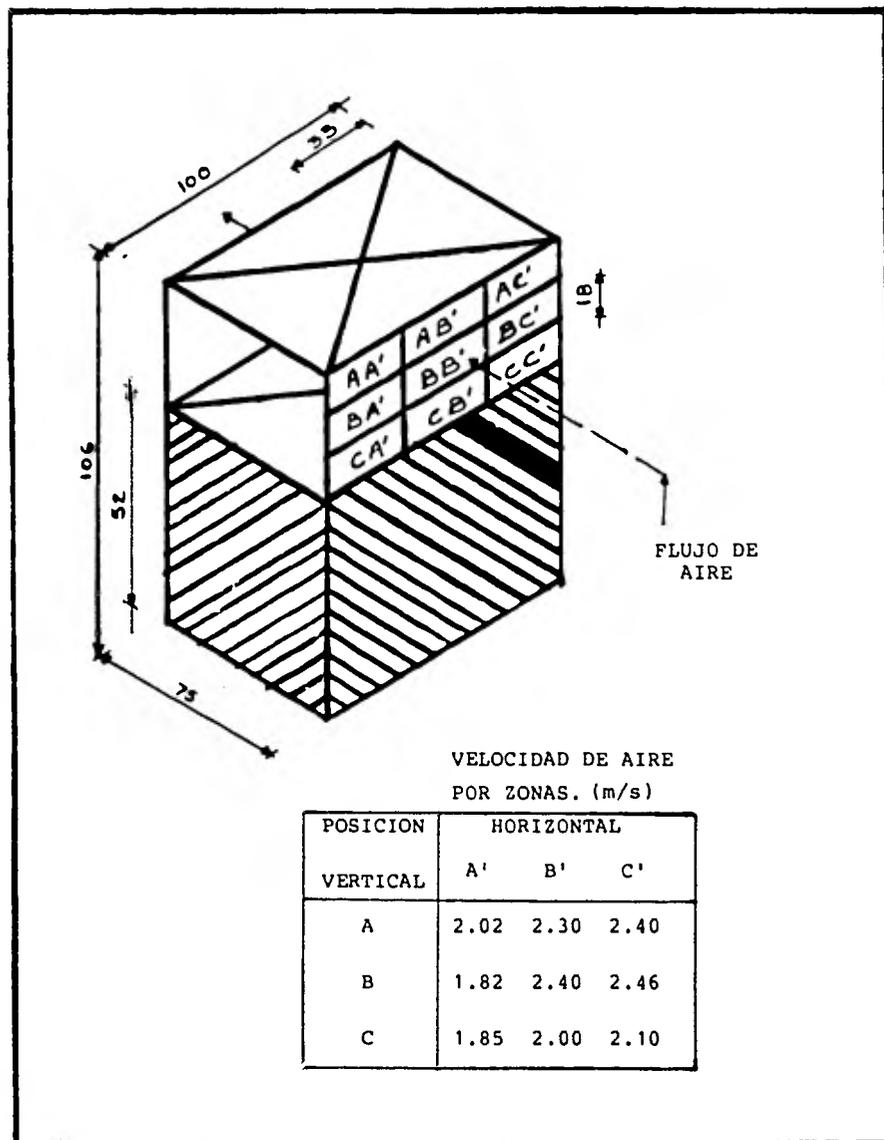


FIG. 4.10. DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD DE AIRE POR ZONAS EN LA CAMARA DE SECADO ACONDICIONADA. (Acot:cm).

CUADRO 4.5. ANALISIS DE VARIANZA: EFECTO DE LA DISTRIBUCION DE AIRE EN LA CAMARA DE SECADO.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calc.	F tablas
Tratamientos	0.30	2	0.15	5.0 n.s.	5.14
Residual	0.18	6	0.03		
Total	0.48	8			

nivel de significancia = 0.05

n.s.= no significativo.

En las figuras 4.11 y 4.12 se muestra la curva de secado y de velocidad de secado del plátano a las condiciones mencionadas para el secado con similitud térmica a la estufa, en el secador de charolas.

4.3.8. SECADOR SOLAR.

Se construyó un secador solar de tipo directo, tomando en cuenta las características del prototipo sugerido por Larrea R.(19), para el cual, se hicieron algunas modificaciones.

De acuerdo a la figura 4.3 el secador consta de un gabinete - de madera de 100X54 cm y de 25 y 11 cm de altura. Las paredes del secador cuentan con perforaciones de 1 cm de diámetro que permite la ventilación del mismo por convección natural.

La base es de madera y el producto se coloca sobre una malla galvanizada previamente engrasada para evitar que se adhiera, dicha malla se encuentra sobre cartones pintados en negro mate e impermeabilizados. La cubierta consta de dos vidrios transparentes de 3 mm de espesor, teniendo una separación de 1.5 cm entre ellos para disminuir las pérdidas de calor por convección, conducción y las pérdidas de energía solar por reflectancia (31,33).

El secador se impermeabilizó y se pinto con negro mate para una mejor absorción de la energía solar (22).

El funcionamiento del secador es semejante al de un colector solar, pues la energía solar que se colecta permite calentar el aire en el interior de la cámara y éste a su vez deshidrata el

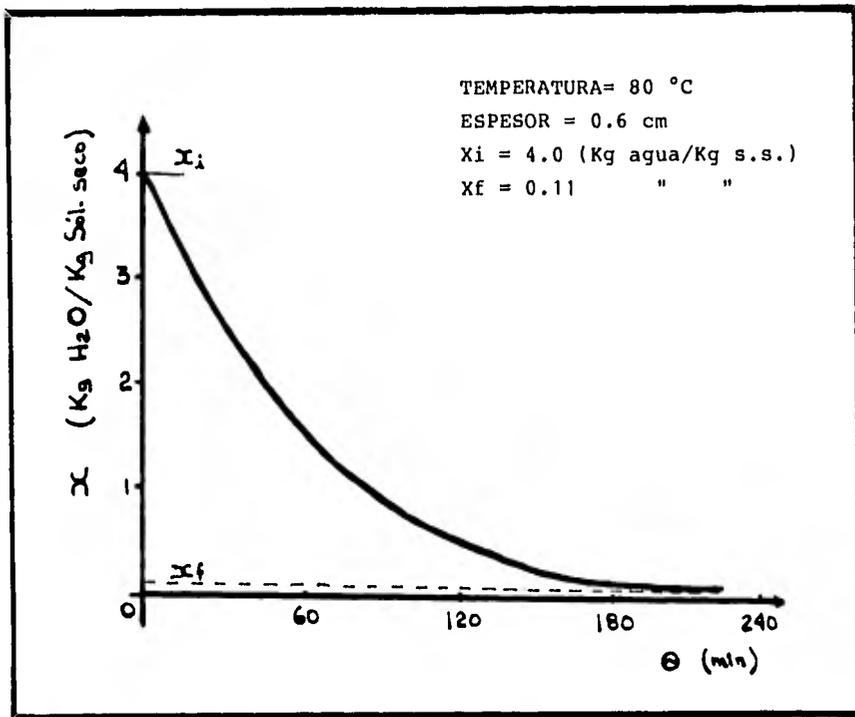


FIG. 4.11. CURVA TIPICA DE SECADO PARA PLATANO TROCEADO EN RODAJAS, EN UN SECADOR DE CHAROLAS ATMOSFERICO.

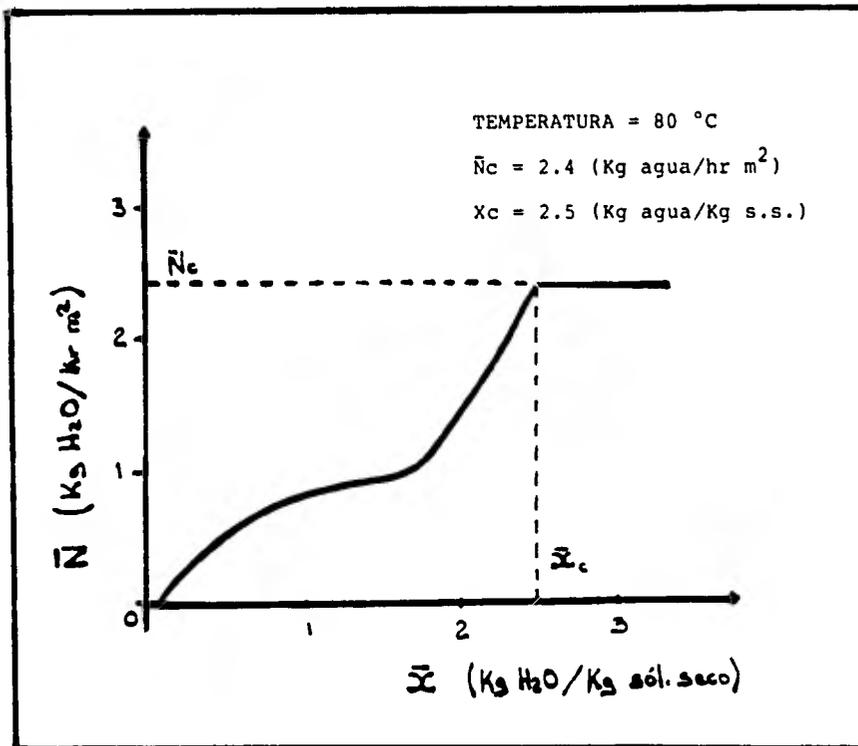


FIG.4.12. CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO PARA PLATANO TROCEADO EN UN SECADOR DE CHAROLAS.

producto que se encuentra dentro.

4.3.9. SECADOR SOLAR DE PLATANO EN DIFERENTE EPOCA DEL AÑO.

Se llevó a cabo el secado solar de plátano en un período comprendido entre los meses de Febrero a Septiembre, bajo las condiciones señaladas en el cuadro metodológico experimental.

El secador se ubicó en Cuautitlán Izcalli Estado de México, se hicieron varias pruebas por mes. Los resultados promedio se muestran en el cuadro 4.6. Las curvas de secado representativas para cada mes se pueden observar en la figura 4.13 y 4.14.

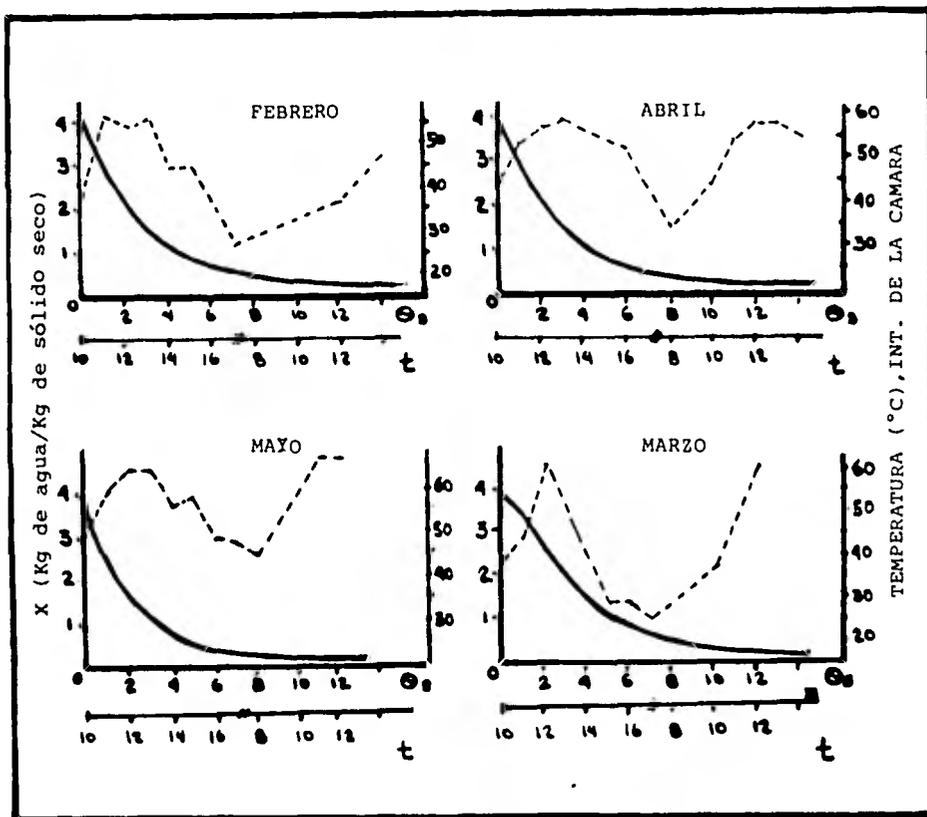
De acuerdo a los resultados del cuadro 4.6. y a las curvas de secado se puede observar que aumenta la incidencia solar en función de la época del año, se alcanza una mayor temperatura en el interior de la cámara, lo que a su vez permite que la humedad final en el producto sea menor para un mismo tiempo de secado (tomado en horas-sol).

En época de lluvias con clima húmedo la humedad final alcanzada en el producto seco, es mayor al 15% al cabo de 13 hr-sol, por lo que en esta época considerando la humedad ambiental, el tiempo de secado deberá prolongarse.

El análisis estadístico correspondiente al cuadro 4.7, muestra que el efecto de la época del año ejerce en el secado de plátano un papel muy importante para el desarrollo de ésta operación, pues su influencia es significativa.

Sin embargo, en las regiones productoras como Veracruz, Chiapas

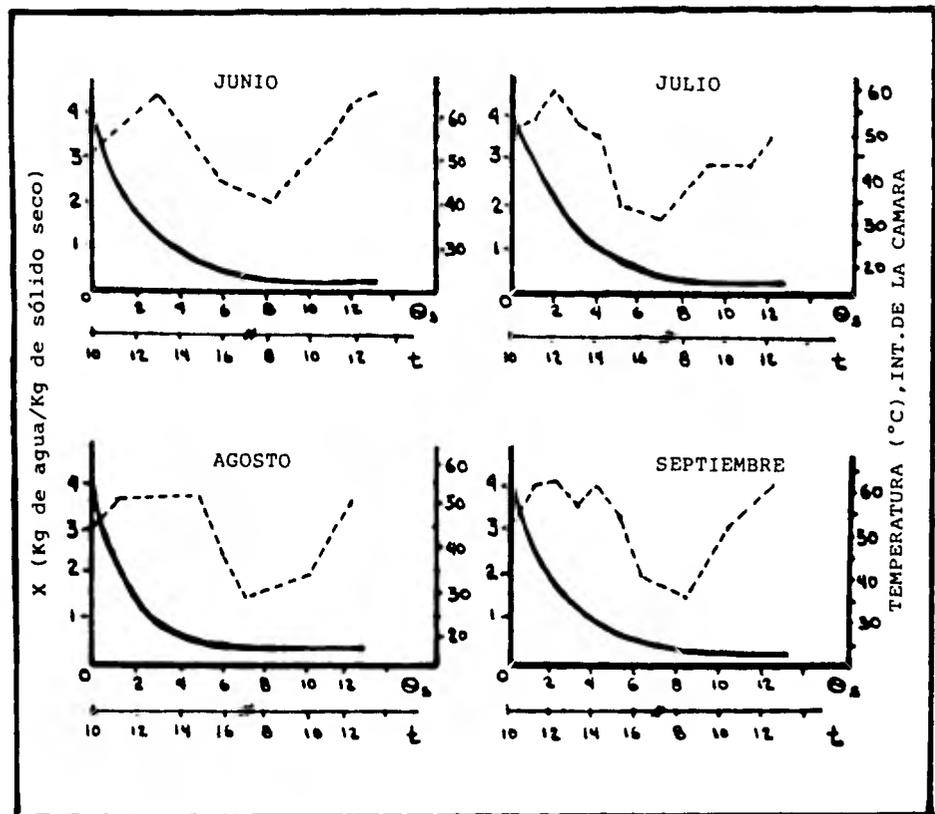




θ_s = tiempo en horas-sol.
 t = tiempo en hora del día.

----- curva de temperatura
———— curva de secado.

FIG. 4.13. CURVAS DE SECADO SOLAR Y TEMPERATURA EN EL INTERIOR DE LA CAMARA DE SECADO, PARA PLATANO EN LOS MESES DE FEBRERO A MAYO (1990).



Θ_s = tiempo en horas-sol ----- curva de temperatura
 t = tiempo en hora del día ————— curva de secado

FIG. 4.14. CURVAS DE SECADO SOLAR Y TEMPERATURA EN EL INTERIOR DE LA CAMARA DE SECADO, PARA PLATANO EN LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE (1990).

CUADRO 4.6. SECADO SOLAR DE PLATANO TROCEADO DE FEBRERO
A SEPTIEMBRE DE 1990.

MES	HT [*] (Cal/cm ² día)	Es (hr)	HUMEDAD FINAL (%)	Tp (°C)	Tm (°C)
FEBRERO	439	14	20.0	40	57
MARZO	479	14	13.6	42	60
ABRIL	482	13	13.0	53	60
MAYO	500	12	10.0	58	67
JUNIO	480	12	13.0	52	65
JULIO	428	12	16.0	49	62
AGOSTO	415	12	28.0	43	53
SEPTIEMBRE	400	12	15.5	52	61

Es = tiempo de secado.

Tp = temperatura promedio en el interior de la cámara de secado.

Tm = temperatura máxima alcanzada en el interior del secador.

*HT = incidencia solar, tomada de Almanza R., López S. (2).

CUADRO 4.7. ANALISIS DE VARIANZA: EFECTO DE LA EPOCA
DEL AÑO EN EL SECADO SOLAR DE PLATANO.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calc.	F tablas
Tratamientos	0.79	7	0.11	2.68 *	2.29
Bloques	17.06	5	3.41		
Residual	1.43	35	0.04		
Total	19.28	47			

nivel de significancia = 0.05

* Significativo.

y Tabasco , la temperatura media de dichas regiones es mayor que la del Estado de México, lo cual favorece la operación de secado, ver cuadro 4.8.

CUADRO 4.8. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL EN EL ESTADO DE MEXICO Y REGIONES PRODUCTORAS.

MESES	LOCALIDAD		
	MEXICO	CHIAPAS	VERACRUZ
Enero	13.8	21.0	21.6
Febrero	14.4	22.4	22.4
Marzo	17.4	25.3	23.7
Abril	17.7	26.1	25.1
Mayo	18.5	27.2	27.2
Junio	18.2	25.0	28.2
Julio	17.4	25.5	27.6
Agosto	17.2	24.6	28.1
Septiembre	16.6	24.7	27.3
Octubre	16.0	23.5	26.1
Noviembre	14.0	22.8	24.6
Diciembre	14.3	20.9	22.4

FTE: Tomado en base a datos climatológicos de José A. Manrique (22).

CAPITULO V DIMENSIONAMIENTO DE LOS SECADORES.

5.1. CONDICIONES PREELIMINARES PARA EL DIMENSIONAMIENTO.

Para proyectar los secadores, se consideró la producción de Cun duacán en el Estado de Tabasco, correspondiente a 60 ha con un rendimiento promedio de 0.4 Ton/ha semana, o sea 500 Kg/hr si se considera una jornada laboral de 8 hr en 6 días. Debido a que de fuen te directa con los productores, se estima el 15% de desperdicio en la producción por falta de técnicas de conservación. Esta cantidad corresponde a 75 Kg/hr de producto fresco.

Experimentalmente se determinó que entre las operaciones de pe lado, troceado y sulfitado, se tiene una merma del 35%; pero en la sulfitación el producto llega a obtener hasta un 2% en peso por la captación de agua, teniendo entonces 50 Kg/hr de plátano para ser secado.

En base a lo anterior se determina que el tipo de secador más conveniente es uno de charolas atmosférico; aunque, para el secado de frutos se recomienda un secador de túnel, el tamaño de la producción no requiere de tal equipo. Además, con fines comparativos el dimensionamiento de los secadores será a pequeña escala.

Para el secador solar se puede emplear uno o varios tipos existentes; sin embargo, de acuerdo al tipo de materiales de construcción, sencillez y mantenimiento bien puede usarse un secador solar de tipo directo.



5.2. CONDICIONES DE OPERACION.

En base a los resultados experimentales obtenidos y a la revisión bibliográfica presentada, se proponen las siguientes condiciones de operación:

- a) Capacidad del secador= 50 Kg/hr.
- b) Humedad inicial del producto una vez sulfitado de 80%
- c) Humedad final del 10% en el plátano seco.
- d) Plátano troceado en rodajas de 3 cm de diámetro y 6 mm de espesor.
- e) La temperatura y humedad del aire serán de 80 °C y 0.15 Kg-de agua/Kg sól. seco, para el secador de charolas.
- f) Velocidad de aire de 2 m/s, la cual esta dentro del intervalo recomendado, que es de 1.5 a 3 m/s para este tipo de secadores (23,26).
- g) El tiempo de secado es de 3.5 hr; pero confines prácticos de producción, puede considerarse 4 hr, para que el proceso se realice por lotes de 200 Kg de producto fresco.
- h) Recirculación de aire de un 90%, pues en un intervalo del 80 al 90% se obtiene una mayor eficiencia del secador (23).

5.3. DIMENSIONAMIENTO DE UN SECADOR DE CHAROLAS ATMOSFERICO.

El secador de charolas dimensionado es uno con circulación de aire de lado a lado, éste presenta una buena distribución de aire además de la sencillez de su diseño, su capacidad generalmente es de 50 K/hr. Las partes que componen a un secador de estos fuerón-

dimensionados en base a los datos proporcionados por la bibliografía (14,23,26,35,39). Las cuales se resumen en el cuadro 5.1.

CUADRO 5.1. DIMENSIONES DEL SECADOR DE CHAROLAS.

COMPONENTES	No.	DIMENSIONES (cm)	CARACTERISTICAS	FIGURA
Charolas	80	100 X 50 X 0.5	malla galvanizada	5.1
Carretillas	4	175 X 55 X 105	acero dulce	5.2
Cámara de secado	1	222 X 122 X 179	lámina galvanizada	5.3
Secador (chasis)	1	309 X 123 X 223	lámina galvanizada	5.4
Calentador	1	100 X 35 X 5.7	tubos aletados	5.5
Ventilador	1	40 X 15	axial	5.4

Las especificaciones del equipo fueron determinadas en base a las condiciones de operación del sistema, y de acuerdo a los balances de materia y energía efectuados (Apéndice B). Estas quedan expresadas en el cuadro 5.2.

El tamaño y características del calentador están dadas de acuerdo a los datos y procedimiento efectuado por Kern, D.Q.(17).

En lo referente a la potencia del ventilador, ésta se obtuvo mediante las caídas de presión en el sistema, según los datos y procedimiento seguido por Hernández, G.E.(14).

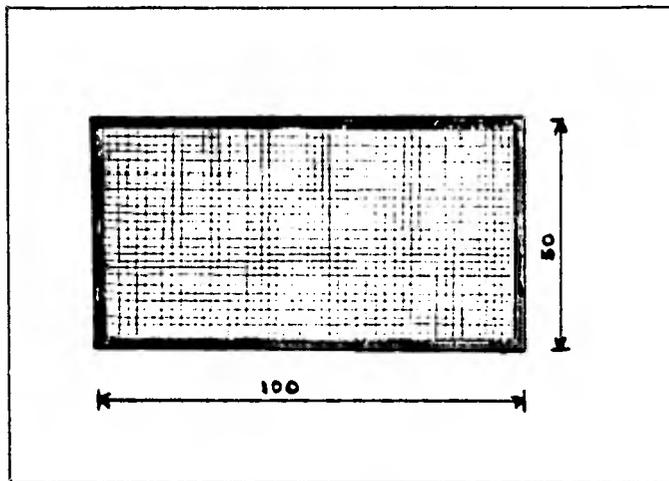


FIG. 5.1. CHAROLA DE MALLA GALVANIZADA. (ACOT: cm).

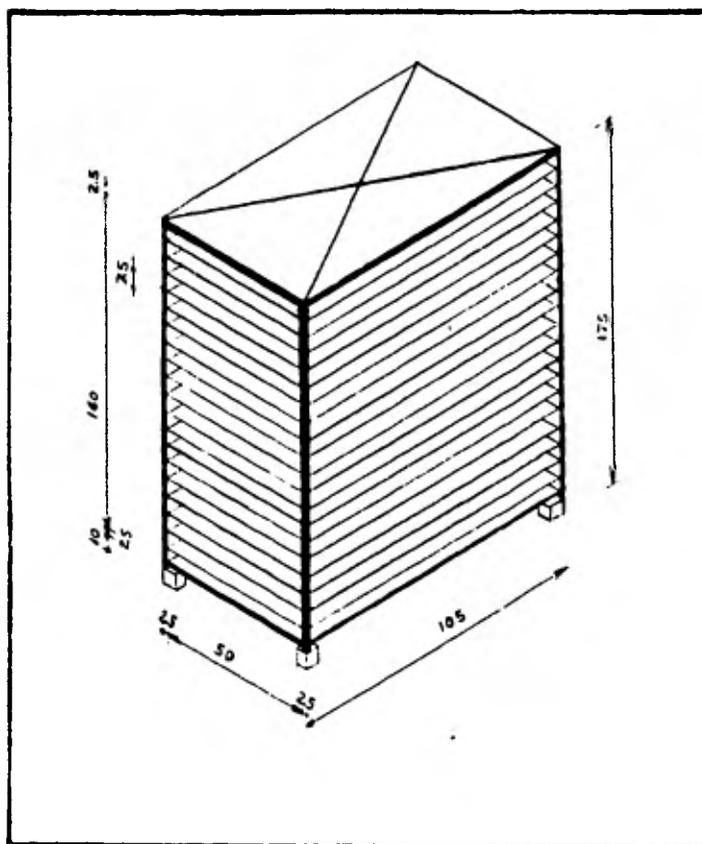


FIG. 5.2. CARRETILLA DE 20 CHAROLAS (ACOT: cm).

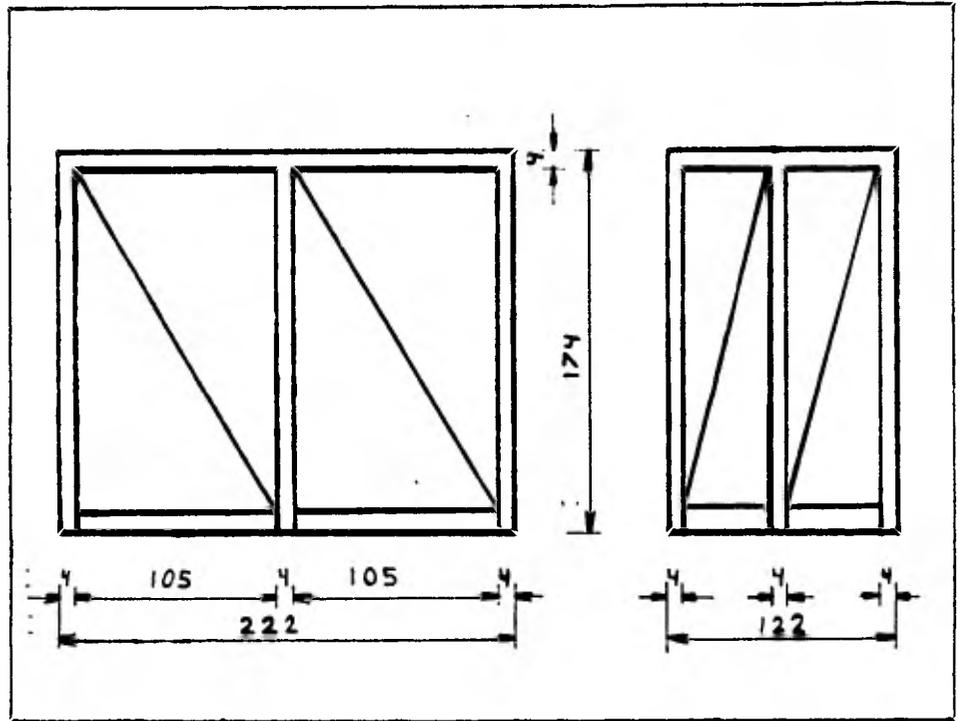


FIG. 5.3. CAMARA DE SECADO (ACOT: cm).

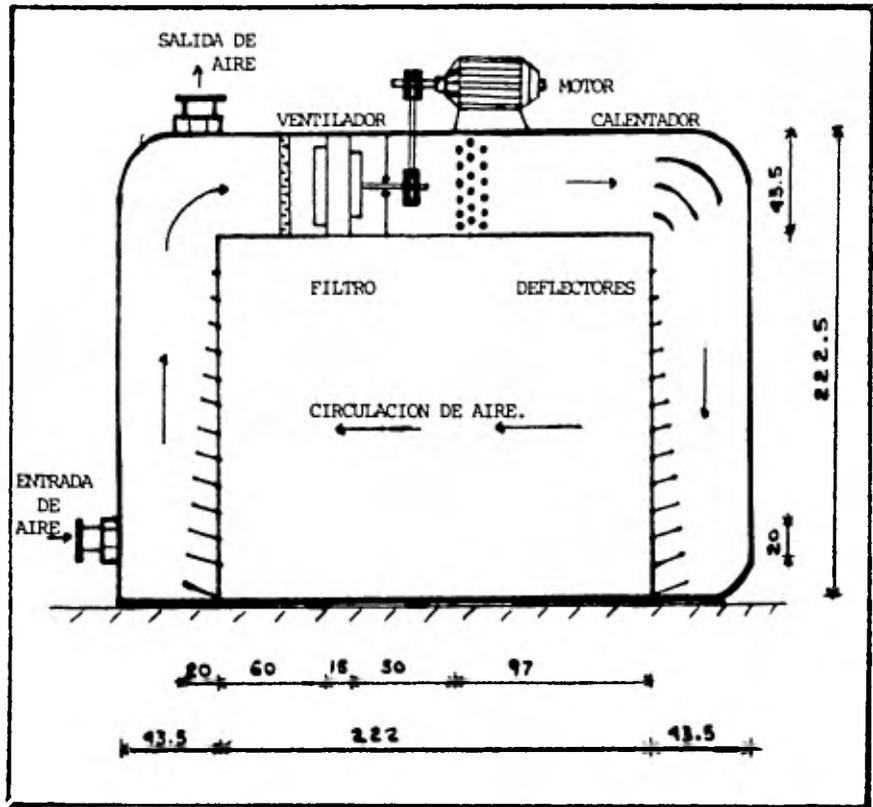


FIG. 5.4. SECADOR DE CHAROLAS (ACOT: cm).

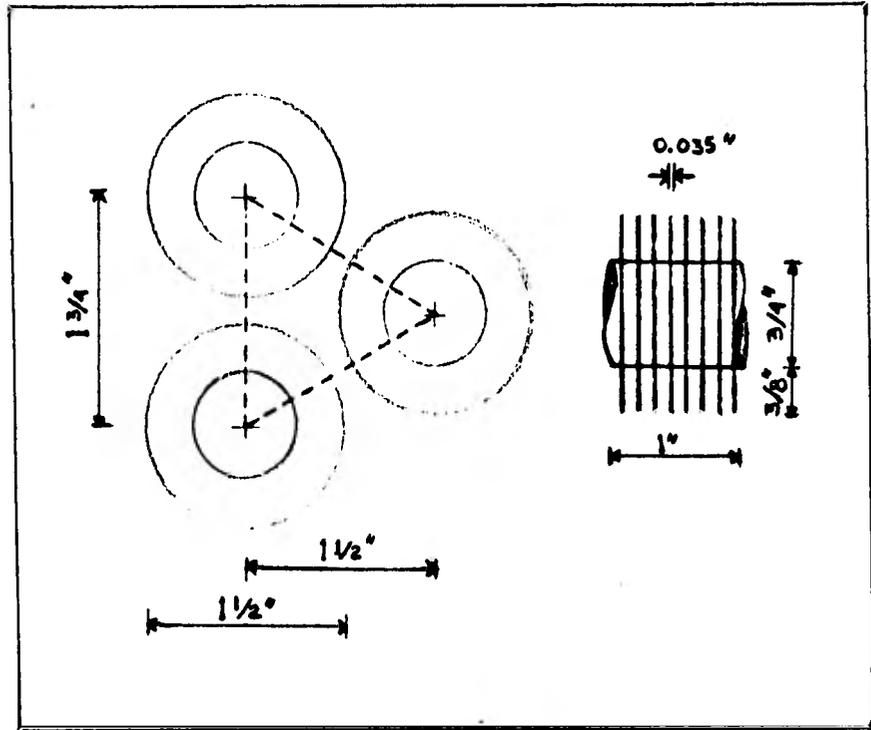


FIG. 5.5. CALENTADOR. TUBOS CON ALETAS TRANSVERSALES CON ARREGLO TRIANGULAR (ACOT: PULGADAS).

CUADRO 5.2. ESPECIFICACIONES DEL SECADOR DE CHAROLAS.

CAPACIDAD	50 Kg/hr
TEMPERATURA DE OPERACION	80 °C
VELOCIDAD DE AIRE	2 m/s
FLUJO DE AIRE	13,380 m ³ /hr
POTENCIA CALORIFICA	16,270 Kcal/hr
CONSUMO DE VAPOR	31 Kg/hr
CAIDA DE PRESION	1.2 cm H ₂ O
POTENCIA DEL VENTILADOR	1 HP
CONSUMO ELECTRICO	4 KW-hr

5.4. DIMENSIONAMIENTO DEL SECADOR SOLAR.

En el capítulo III se mencionó varios tipos de secadores; sin embargo, el secador que se dimensionó fué uno de tipo directo, el cual es de construcción simple y un costo relativamente bajo. Para ello se tomó como referencia el prototipo expuesto por Larrea R. (19) con características semejantes al prototipo que fué empleado para las pruebas experimentales.

El funcionamiento del secador solar directo es semejante al de un colector solar y por cuestiones prácticas puede construirse en unidades de 2 m² (31). De tal forma, para comparar la productividad del secador convencional (400 Kg/ciclo), con respecto al secador solar, se tiene que disponer de 40 unidades de secado; pues, para un ciclo de secado se ocupan 12 hr de exposición al Sol, o -

CUADRO 5.3. CARACTERISTICAS DEL SECADOR SOLAR DIRECTO .

PARTE	CARACTERISTICAS	DIMENSIONES (cm)
Cubierta doble	- Vidrio de 3mm de espesor separado a 1.25 cm. - Inclinación de 30 °	200 X 112
Soporte	- Madera de 5 cm de espesor	100 X 200 X 60
Secador (gabinete)	- Madera de 1.25 cm de espesor, con perforaciones de 1 cm de diámetro cada 10 cm en paredes laterales.	25 X 100 X 50
Charola	- Malla galvanizada con perforaciones menores a 1 cm.	100 X 200

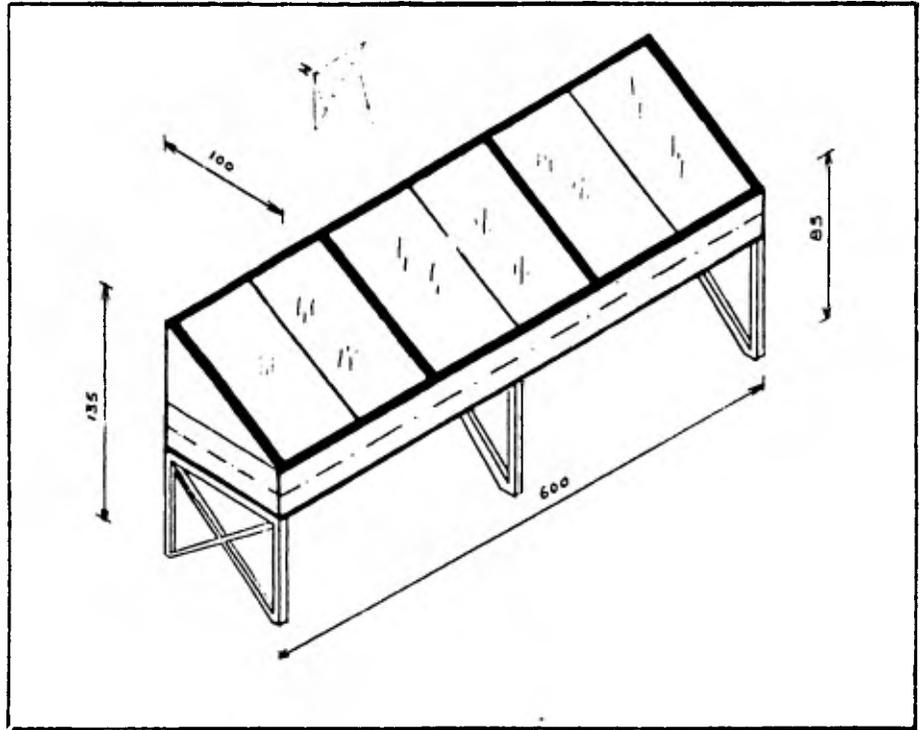


FIG. 5.6. SECADOR SOLAR DIRECTO CON TRES UNIDADES DE SECADO (ACOT: cm).

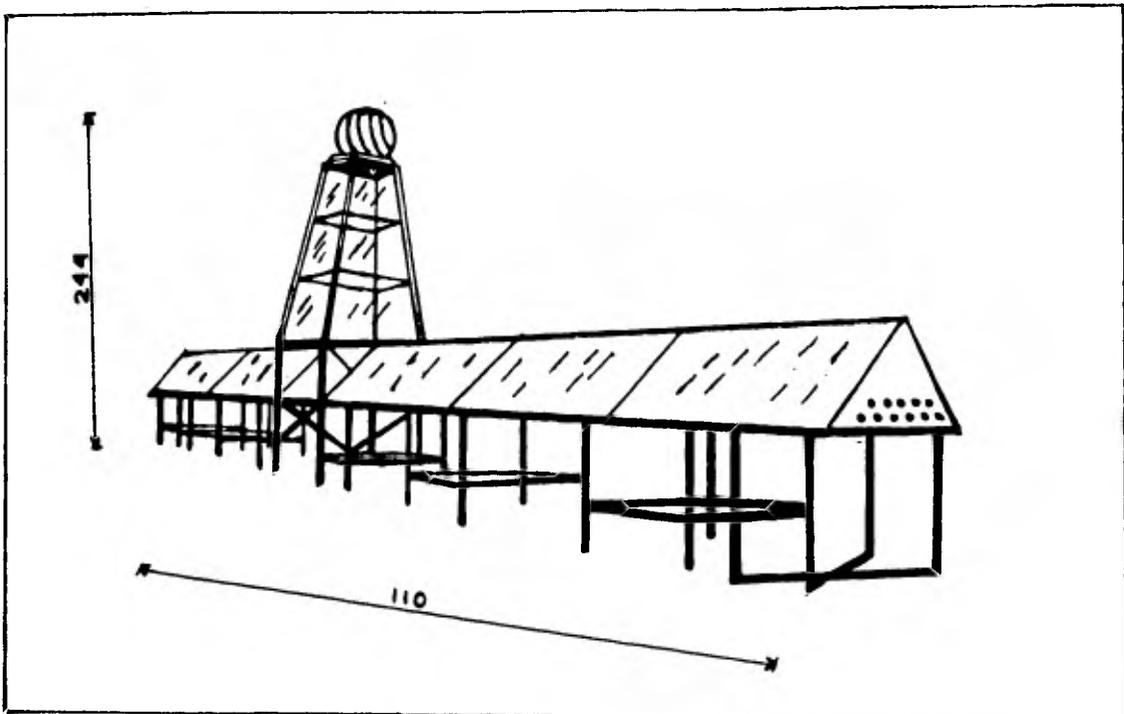


FIG. 5.7. SECADOR SOLAR EOLICO. (ACOT: cm)

FUENTE: LARREA R.S. Y ANDRADE A.A. Presentación de un secador solar para alimentos. Ind. alimentaria, vol. 13(1) p.14.

sea 2 días, con una carga de 5 Kg/m² de producto fresco.

El secador básicamente es un gabinete de madera con un recubrimiento impermeabilizante y acabado en negro mate. El cual deberá tener una cubierta doble de vidrio de 3 mm de espesor, separados a 1.25 cm entre ambos (22). Las características del secador se detallan en el cuadro 5.3. En la figura 5.6 se muestra la disposición del secador en un módulo de tres unidades de secado. Sin embargo, para su construcción a nivel rural se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- La construcción del secador debe ser simple al igual que su mantenimiento.
- Los materiales de construcción pueden variar de acuerdo a la disponibilidad que se tenga en la región productora, pudiendo éstos ser hasta de los más rústicos.
- Las cubiertas de vidrio pueden sustituirse por plástico transparente, resistente a la radiación solar.
- La orientación de los secadores será de Este a Oeste con respecto a la longitud del secador.

Otro tipo de secador que puede ser aplicado como alternativa es el secador eólico, diseñado por Larrea R.S. y Andrade A.A. (20) Este funciona de manera semejante a un secador solar directo, con la diferencia de que cuenta con un ventilador atmosférico sobre una chimenea para eliminar la humedad, hecho a base de módulos armables que permiten transportarlo y alargarlo con facilidad. En la 5.7 se describe esquemáticamente el secador.

CAPITULO VI ANALISIS DE COSTOS.

El siguiente análisis fué realizado en base a datos proporcionados por fabricantes, a estimaciones y correlaciones de equipos - tomados como referencia (23,26,37). Para ello se tomó en cuenta la la tasa inflacionaria de E.U.A., que corresponde a un 2.9% anual- (datos del Banco de México). Las cotizaciones se efectuarón para- el mes de enero de 1991. En lo que corresponde a el secador de - charolas se excluye la caldera, dado que se encuentra fuera de lo planteado en la presente tesis; sin embargo, es importante mencio- nar que el costo de la caldera aumenta el de la operación de seca- do en un equipo convencional. Para la evaluación de cost_os se co- nsideró que se tiene el producto y el espacio disponible por los propios productores, para llevar a cabo el secado de plátano.

6.1. SECADOR DE CHAROLAS.

6.1.1. COSTOS FIJOS.

Para el secador de charolas, los costos fijos se desglozan en el siguiente cuadro:



CUADRO 6.1. COSTOS FIJOS DEL SECADOR DE CHAROLAS.

EQUIPO (partes)	COSTO (\$)	FBM	COSTO REAL (\$)
Secador	6,454,300	2.2	14,199,460
Ventilador	2,512,500	1.5	3,768,750
Calentador	7,300,000	-	7,300,000
Aislante	579,336	-	579,336
Charolas	451,840	-	451,840
Carretillas	1,016,756	-	1,016,756
TOTAL			27,316,668

FBM : es el factor de instalación, de acuerdo al tipo de material usado (37).

6.1.2. COSTOS VARIABLES.

Dentro de los costos variables o de operación, la mano de obra es uno de los más significativos, y ésta puede calcularse en base a los requerimientos de los recursos humanos. De acuerdo al proceso y tipo de secado (23), se estima la mano de obra en el cuadro 6.2. expresándola en horas-hombre.

Del cuadro 6.2 se obtiene un total de 45 hr-hombre, por lo que si se considera un tiempo efectivo de trabajo equivalente a 7.5 hr se necesitan 6 personas.

Entonces, para una producción de 44 Kg/día de producto seco y 270 días al año, o sea 11,880 Kg/año, los costos pueden resumirse en el cuadro 6.3.

CUADRO 6.2. MANO DE OBRA REQUERIDA.

OPERACION	TIEMPO (hr-hombre)
Pelado manual	10.0
Rebanado	10.0
Sulfitado	20.0
Carga y descarga de charolas	3.0
Carga, arranque y descarga de carretillas.	0.5
Subdivisión del material por ciclo	1.0
Supervisión	<u>0.5</u>
TOTAL	45.0

CUADRO 6.3. COSTOS DE OPERACION DEL SECADOR DE CHAROLAS.

CONCEPTO	COSTO UNITARIO (\$)	% COSTO TOTAL *	CANT./DIA O UNIDADES	\$/ANUAL	\$/Kg
Bisulfito de Na	20,000.0	---	0.4	2,160,000.0	181.81
Mantenimiento	---	7.5	---	2,048,750.0	172.45
Depreciación:					
- Secador	14,199,460.0	10.0	1	1,419,946.0	119.42
- Carretillas	254,189.0	10.0	4	101,675.0	8.55
- Charolas	5,648.0	33.3	80	150,463.0	12.66
Mano de obra	12,000.0	---	6	19,440,000.0	1,636.36
Electricidad	52.0	---	4	56,160.0	4.72
Vapor	16.0	---	124	535,680.0	45.09
TOTAL				25,912,674.0	2,181.16

* Nonhebel y Moss (23); p 97 .

6.2. SECADO SOLAR.

6.2.1. COSTOS FIJOS.

El costo fijo del secado solar fué determinado por unidad de secado, la cual corresponde a un área de secado de 2.0 m^2 . El costo detallado de una unidad se muestra en el cuadro 6.4.

CUADRO 6.4. COTIZACION DE UNA UNIDAD DE SECADO SOLAR DIRECTO.

CONCEPTO	COSTO (\$)
- Madera de $\frac{1}{2}$ pulg (base, paredes)	47,000.0
- Soportes de madera	20,000.0
- 2 Cubiertas de vidrio de 3 mm (2.5 m^2)	48,000.0
- Bisagras y tornillos de $\frac{1}{4}$ pulg.	4,800.0
- Malla perforada (2 m^2)	12,000.0
- Acabado en detalle	10,000.0
TOTAL	141,800.0

Entonces, para 40 unidades de secado se tiene un costo equivalente a \$ 5,672,000.0

6.2.2. COSTOS VARIABLES.

Considerando que las operaciones llevadas a cabo para el secado solar son las mismas que en el secado convencional, la mano de obra requerida es la misma. Entonces, los costos de operación del secador pueden resumirse en el cuadro 6.5.

CUADRO 6.5. COSTOS DE OPERACION DEL SECADOR SOLAR.

CONCEPTO	% COSTO TOT.	\$/ANUAL	\$/Kg
Mantenimiento	7.5	425,400	35.80
Depreciación	10.0	567,200	47.74
Bisulfito de Na	----	2,160,000	181.81
Mano de obra	----	19,440,000	1,636.36
TOTAL		22,592,600	1,901.71

6.3. SINOPSIS.

Comparando el secador de charolas con respecto al secador solar el primero presenta ciertas ventajas, como son:

- Menor tiempo de secado.
- Mayor productividad.
- Menor espacio ocupado.
- Operación sin importar las condiciones del medio ambiente.

Sin embargo, se tiene que tomar en cuenta que;

- Se debe tener la infraestructura necesaria para su instalación en las regiones productoras.
- El costo de inversión es alto, incluyendo los servicios para su instalación, y operación.
- Funcionalmente debe operar a toda su capacidad para que el secado sea rentable.
- Está supeditado a la adquisición de combustibles para la generación de vapor.
- El costo por mantenimiento es mayor que en el secado solar.

Del análisis de costos, se puede decir que el secador convencional tiene un costo de operación 15 % mayor que en el solar. Además el costo fijo es mucho mayor, siendo el del secado solar el 21 % del secador de charolas. Así también, el secador eólico representa un 40 % del convencional para la misma capacidad (20).

De esta manera el secador solar presenta las siguientes ventajas:

- Un costo de inversión y operación menor.
- No es necesario una infraestructura compleja para su instalación.
- Es más versátil en cuanto a su capacidad de operación, pues, el secado puede llevarse a cabo en compartimientos individuales.
- La construcción de los secadores puede ser desde materiales especiales hasta rudimentarios.
- Son de fácil construcción y manejo.
- El mantenimiento del equipo es sencillo y barato.

Por otro lado, es importante mencionar que los productos secados en dichos secadores hay un beneficio, no obstante las relativas bajas capacidades de carga. Por lo que la utilidad de ésta - tecnología deberá contemplarse desde el punto de vista alternativo para los agricultores que puedan optar por una actividad transformativa a pequeña escala.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en el presente estudio permiten obtener información a nivel laboratorio sobre el proceso tecnológico de secado de plátano; además refleja la importancia de la aplicación del secado solar a nivel rural.

1. Al comparar el poder antioxidante del ácido cítrico y el bisulfito de sodio para evitar el oscurecimiento durante el secado de plátano, se determinó que el más adecuado para tal fin es el bisulfito de sodio.
2. La aplicación del bisulfito en solución al 0.6% en peso, con un tiempo de inmersión de 10 minutos permite obtener un producto con olor, color y sabor característicos, sin rebasar considerablemente la cantidad de SO_2 permitida en el plátano seco.
3. De los resultados experimentales se obtuvo que las condiciones de secado a las cuales el producto no sufre deterioro en sus características, son: una temperatura del aire de secado de 80 grados, un espesor de 0.6 cm y un tiempo de secado de 3.5 hr, para alcanzar una humedad final de 10 %.
4. Al efectuar las pruebas en el secador solar directo, se encontró que para alcanzar una humedad del 10 % se requiere 12 hr de exposición al Sol con una variación de temperatura entre 40 y 60 °C, según la época del año.
5. La evaluación de costos en ambos secadores, muestra que el secado solar es un 15 % más económico y que el costo inicial es 5 veces menor que el de charolas.

6. Para que la operación sea rentable en un secador de charolas, es necesario que ésta se lleve a cabo a toda su capacidad; mientras que para el secador solar no es necesario trabajar en tales condiciones, ya que cuenta con compartimientos individuales, siendo más versátil su manejo.
7. El secado solar de plátano resulta ser más práctico y adecuado que el convencional para su aplicación a nivel rural, pues no se requiere de una infraestructura complicada para su instalación, además, es posible el uso de materiales y la mano de obra disponibles en las regiones productoras.
8. La aplicación del secado solar aporta ciertos beneficios como: el aprovechamiento de excedentes de producción, venta del producto seco, la posibilidad de elaboración de productos destinados para consumo humano y animal; no obstante de que requiere un espacio considerable para su instalación, debe tomarse en cuenta como una alternativa para agricultores y fruticultores que tengan la capacidad de optar por una actividad transformativa a pequeña escala.

BIBLIOGRAFIA .

1. AGRICULTURAL MARKETING SERVICE. 1973. Bananas, Market inspections instructions. Dep. of Africa, U.S.A. January.
2. ALMANZA,R.; LOPEZ,S. 1978. Total solar radiation in México using sunshine hours and meteorological data. Solar Energy, 21 (5): 441-448.
3. BILGEN, HOLLANDS. 1985. Drying and dehydration foods. P.Press,U.S.A.pp 50-53
4. BORGES,R. 1984. Técnicas de laboratorio para el análisis de alimentos. I. N.N.S.Z., México. pp. 126.
5. CHAMPION,D. 1970 El plátano. Blumé, España. pp. 26-27.
6. CHARLEY,H. 1987. Tecnología de alimentos. LIMUSA, México. pp.648-670.
7. DANIEL,W. 1989. Bioestadística, base para el análisis de las ciencias de la salud. 3a. ed. LIMUSA, México. pp. 667.
8. FENNEMA,O.R. 1985. Introducción a la ciencia de los alimentos. Reverté, México. pp. 570-574.
9. FOOD TECH. 1986. Antioxidans and preservatives. 40 (9): 94.
10. FOOD TECH. 1986. Effects of processing on nutritive values. Scientific S. Summary. Dic.(43): 109-116.
11. FOUST,A.S. et al. 1984. Principios de operaciones unitarias. C.E.C.S.A., México. pp. 419-423.
12. GEANKOPLIS,CH,J. 1985. Procesos de transporte y operaciones unitarias. - C.E.C.S.A., México. pp.432-485.
13. GENOVRT,S. 1978. Características y prototipos de secadores solares de alimentos. Alimentación Latinoamericana. 11(111)F 50-57.

14. HERNANDEZ,G.E. 1990. Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración. - LIMUSA, México. pp. 359-383.
15. HERNANDEZ,M. et al. 1983. Valor nutritivo de los alimentos mexicanos. I. N.N., México.
16. JAY, J.M. 1978. Microbiología moderna de los alimentos. Acribia,Zaragoza Epaña. pp. 243-248.
17. KERN,D.Q. 1984. Procesos de transferencia de calor. C.E.C.S.A., México.- pp. 589-643.
18. KREIDER,J.F. 1975 Solar heating and cooling. Mc Graw Hill, W.C., U.S.A.- pp.342.
19. LARREA, R.S. 1987. Secadores de alimentos con el calor del Sol. Inf.Téc.- I.P.N., México. No. 1-2.
20. LARREA, R.S.; ABRAHAM, A.A. 1991. Presentación de un secador solar para alimentos. Industria Alimentaria, Vol. 13(1): 14-20.
21. LAWAND, T.A. Posibilidades de la utilización de secadores agrícolas en las zonas en desarrollo. Mc Donald C. de la universidad de Mc Gill, Quebec Canada.
22. MANRIQUE, J.A. 1984. Energía solar. H.& H., México.pp. 255.
23. NONHEBEL, G.; MOSSE, A.A.H. 1979. El secado de sólidos en la industria química. Reverté, México. pp. 354.
24. PANTASTICO, E.R.B. 1975. Postharvest physiology, handling and utilization of tropical and subtropical fruits and vegetables. AVI P. Co. U.S.A. pp. 60-62.
25. PEARSON, D. 1975. Analysis of foods. Churchil Livingstone, London.pp. 62.
26. PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. 1975. Chemicals Engineers Handbook. 5a.ed. - Mc Graw Hill, N.Y. U.S.A.pp. 1270-1272.

27. QUEIROZ, M. et al. 1985. Secado solar de granos. Seminario itinerante, - Red solar, O.N.U., para la agricultura y la alimentación. pp. 39-46, 80-89.
28. ROSI & ROA. 1980. Secado y almacenamiento de productos agropecuarios con uso de energía solar. ACIESP, Brasil. 22:295.
29. SANCHEZ, P.A. et al. 1982. Cultivos de plantación. SEP/Trillas, México.
30. S.A.R.H. 1987. Estudio de mercado internacional del plátano (Musa sapientum lacatan). Dirección de asuntos internacionales, México. pp. 97.
31. SAYIGH, A.A.M. 1976. Colectores solares de placa plana. O.N.U., desarrollo y transferencia de tecnología. 5: 73-78.
32. SEVERNS, W.H. et al. 1961. La producción de energía mediante vapor, aire o gas. Reverté, España. pp.493.
33. SMITH, P.R. et al. Parametric studies of the thermal trap flat plate collector. Solar and nuclear heat transfer. AICHE, Symposium series. 164(73):164-170
34. SZOKOLAY, S.V. 1978. Energía solar y edificación. Blumé España. pp. 192.
35. TREYBALL, R.E. 1984. Operaciones de transferencia de masa. 2a. ed. Mc - Graw Hill, México. pp. 723-786.
36. VAN ARSDEL, W.B. et al. 1973. Food dehydration. AVI P. Co. U.S.A. vol 2.
37. ULRICH, G.P. 1986. Procesos de ingeniería química. Interamericana, México pp. 296-377.
38. WALPOLE, R.E. et al. 1987. Probabilidad y estadística para ingenieros. - 3a, ed. Interamericana, México. pp.733.
39. WOODROOFF, S. et al. 1975. Comercial fruit processing. AVI P. U.S.A, Ch.8, pp. 370-426.

APENDICES

- A. DETERMINACION DE BIOXIDO DE AZUFRE.
- B. BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA.

A. DETERMINACION DE BIOXIDO DE AZUFRE (METODO: PEARSON-WONG).

La determinación de SO_2 es un método directo que se basa principalmente en una doble titulación yodométrica. En principio, el SO_2 es convertido en sulfatos por la reacción con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y la diferencia en las titulaciones con yodo, antes y después del tratamiento con peróxido, representa el SO_2 total en un alimento. El SO_2 libre se combina con aldehídos o cetonas, por lo tanto un tratamiento con acetona al alimento macerado, permite captar el SO_2 libre y determinarlo directamente con yodo (25).

MATERIAL Y EQUIPO.

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| - Mortero. | - Pipetas volumétricas, 20 ml. |
| - Matraces Erlenmeyer de 250 ml. | - Pipeta graduada de 5 ml. |
| - Bureta de 50 ml. | - Cronómetro. |
| - Probetas de 50 y 100 ml. | - Matraces aforados, 100 ml. |

REACTIVOS.

- | | |
|---------------------------------------|-------------------|
| - Solución de yodo 0.02 N. | - Acetona. |
| - Solución de almidón al 2.0%. | - Agua destilada. |
| - Peróxido de hidrógeno al 3% en vol. | |

PROCEDIMIENTO.

- 1) Macerar en un mortero de 2 a 3 g de muestra, adicionando 100 ml de agua previamente hervida.
- 2) Tomar una alícuota de 20 ml y diluirla aforando a 100 ml con agua destilada. Titular con una solución de yodo 0.02 N, adicionado - 2 ml de almidón al 2% como indicador, hasta un virre azul oscuro.
- 3) Adicionar 10 ml de peróxido de hidrógeno al 3% v/v y dejar en- área oscura durante 15 min y volver a titular con yodo.
- 4) Adicionar 20 ml de acetona y dejar reposar 10 min en la oscuri- dad, después volver a titular con yodo.
- 5) A otra muestra se adiciona acetona en exceso, se deja reposar en la oscuridad 30 min y se titula con yodo.

CALCULOS.

El SO₂ total se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\text{ppm SO}_{2T} = (A-B) \times 0.3203 \times N \times 1000 / 0.1 \times \text{PM}$$

El SO₂ libre está dado por:

$$\text{ppm SO}_{2L} = (C-D) \times 0.3203 \times N \times 1000 / (0.1 \times \text{PM})$$

El SO₂ se calcula por diferencia como residual mediante:

$$\text{SO}_{2R} = \text{SO}_{2T} - \text{SO}_{2L}$$



En las expresiones anteriores:

A= mililitros de I_2 0.02 N usados en la titulación, después del tratamiento con peróxido de hidrógeno.

B= mililitros de I_2 0.02 N usados en la primera titulación.

C= mililitros de I_2 0.02 N usados en la titulación, después de adicionar la acetona.

D= mililitros de I_2 0.02 N usados en la titulación de la muestra con exceso de acetona.

N= normalidad de la solución de yodo.

PM= peso de la muestra.

B. BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA.

1) BALANCE DE HUMEDAD.

El balance se plantea para la cámara de secado considerando una operación adiabática, llevándose a cabo en el período de velocidad constante de secado, pues en esta etapa, la velocidad de secado es ta controlada totalmente por las condiciones de secado (23).

En la figura A-1 se muestra el diagrama de flujo para el secador de charolas. De acuerdo a la figura se tiene la siguiente ecuación:

$$Gs_3 Y'_3 + \frac{Ss X_i}{\theta_c} = \frac{Ss X_c}{\theta_c} + Gs_3 Y'_4 \quad (1.1)$$

donde:

Gs = flujo de aire (Kg de agua/min)

Y' = humedad del aire (Kg de agua/Kg de aire seco)

θ_c = tiempo de secado en el período de velocidad constante (min)

X_i = humedad inicial del producto (Kg de agua/Kg sólido seco)

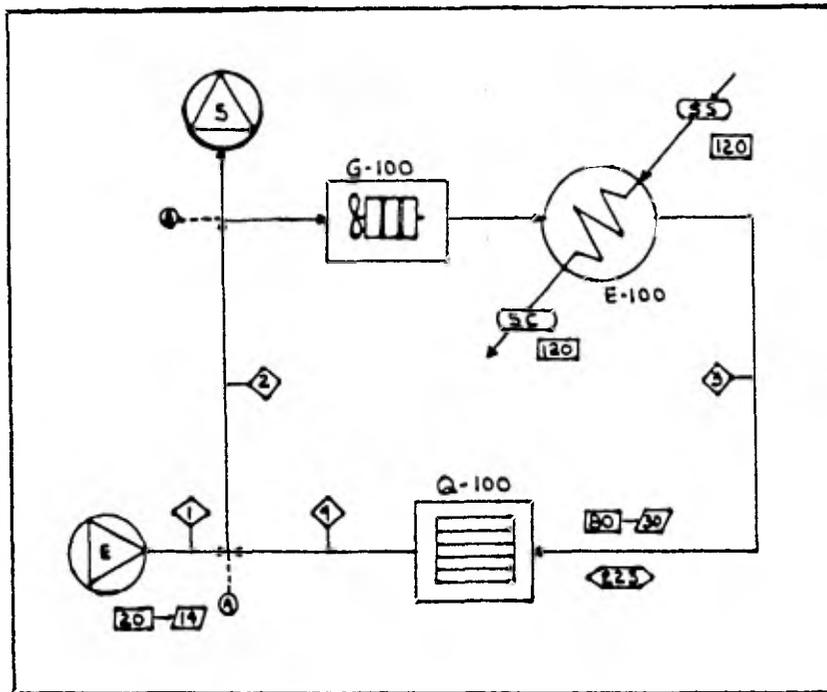
X_c = humedad crítica (Kg de agua/Kg sól. seco)

despejando Y'_4 de la ecuación anterior:

$$Y'_4 = Ss (X_i - X_c) / \theta_c Gs + Y'_3 \quad (1.2)$$

además:

$$Gs_3 = Gv_3 / Vh_3 \quad (1.3)$$



CLAVE

G-100 ; Ventilador
 E-100 ; calentador
 Q-100 ; Cámara de secado
 SS ; Vapor saturado
 Sc ; Condensado
 E ; Entrada de aire
 S ; Salida de aire

□ - Temperatura (°C)₃
 ⬇ - Flujo de aire (m³/min)
 ▱ - Temperatura de bulbo
 húmedo (°C).
 ◇ - Línea.
 ○ - Punto en el balance.
 ○ - Servicio.

FIG. A-1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL SECADOR DE CHAROLAS.

en donde: $G_v = 223 \text{ m}^3/\text{min}$

$V_h =$ volumen húmedo

$$V_h = (1/29 + Y'_3/18)0.082(Tg_3 + 273)/0.769 \quad (1.4)$$

para una temperatura $Tg_3 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ y $Y'_3 = 0.015 \text{ Kg de agua/Kga.s.}$

determinadas experimentalmente, se tiene:

$$V_{h_3} = 1.3293 \text{ m}^3/\text{Kg a.s.}$$

entonces:

$$G_{s_3} = 223/1.3293 = 167.7 \text{ Kg a.s./min}$$

Ahora bien, de datos experimentales:

$$X_i = 4.0 \text{ Kg agua/ Kg de sólido seco}$$

$$X_c = 2.5 \text{ Kg agua/ Kg de s.s.}$$

$$\theta_c = 30 \text{ min}$$

de la ecuación 1.2 al sustituir los datos se tiene:

$$Y'_4 = 0.0269 \text{ Kg agua/ Kg a.s.}$$

En el punto A de la figura A-1 el balance de humedad es:

$$G_{s_2}Y'_2 = G_{s_1}Y'_1 + G_{s_3}Y'_4 \quad (1.5)$$

Para un 90% de recirculación de aire, se tienen las siguientes relaciones:

$$G_{s_1} = G_{s_2} (0.1)$$

$$G_{s_2} = G_{s_3} (1.1)$$

Por lo que: $G_{s_2} = 184.5$ y $G_{s_1} = 18.4 \text{ Kg de a.s./min}$

Despejando Y'_2 de 1.5 y sustituyendo los valores correspondientes se tiene que:

$$Y'_2 = 0.0255 \text{ Kg agua/Kg a.s.}$$

2) BALANCES DE ENERGIA.

Nuevamente considerando secado adiabático en el período de velocidad constante, se expresa el siguiente balance de energía para el secador:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{CALOR CEDIDO POR EL AIRE} \\ \text{DURANTE LA OPERACION.} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{CALOR ABSORBIDO PARA} \\ \text{EVAPORAR EL AGUA.} \end{array} \right\}$$
$$G_s C_s AT = N_c \epsilon A \quad (1.6)$$

Donde:

ϵ = calor latente de vaporización a la temperatura de bulbo húmedo (Kcal/Kg).

AT = diferencia de temperatura de aire (°C).

Cs = calor húmedo del aire (0.24 Kcal/Kg °C).

A = área expuesta del material (m²).

Nc = velocidad constante de secado (2.4 Kg agua/hr m²).

Despejando AT de 1.6 se tiene:

$$AT = \frac{N_c \epsilon A}{G_s C_s} = \frac{2.4 (580.5) (52)}{167.7 \times 60 (0.24)}$$

$$AT = 30.0 \text{ °C}$$

Por lo que la temperatura del aire a la salida del secador será:

$$Tg_4 = Tg_3 - AT = 80 - 30 = 50 \text{ °C}$$

Un balance de energía en el punto A de la figura A-1 nos da:

$$G_{s_2} Hg_2 = G_{s_1} Hg_1 + G_{s_3} Hg_4 \quad (1.7)$$

Considerando: $G_{s_3} = G_{s_4}$

Para el cálculo de entalpías (Hg) se emplea la siguiente ecuación (35):

$$Hg = (0.24 + 0.45 Y') Tg + 598 (Y') \quad (1.8)$$

Para Hg_4 :

$$Hg_4 = (0.24 + 0.45 (0.0269)) 50 + 598 (0.0269) = 28.7 \text{ Kcal/Kg a.s.}$$

de la misma forma para Y'_1 y Y'_3 :

$$Hg_1 = 11.477 \text{ Kcal/Kg aire seco}$$

$$Hg_3 = 28.710 \text{ Kcal/Kg aire seco}$$

De la ecuación 1.7:

$$Hg_2 = \frac{G_{s_1} Hg_1 + G_{s_3} Hg_4}{G_{s_2}} = \frac{18.4 (11.477) + 167.7 (28.7)}{184.5}$$

$$Hg_2 = 27.23 \text{ Kcal/ Kg aire seco}$$

Aplicando 1.8 y despejando Tg_2 :

$$Tg_2 = 48.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para el balance en el calentador:

$$G_{s_3} Hg_2 + Qt = G_{s_3} Hg_3 \quad (1.9)$$

Despejando Qt y sustituyendo valores en 1.9 se tiene:

$$Qt = G_{s_3} (Hg_3 - Hg_2) = 167.7 (28.7 - 27.23)$$

$$Qt = \underline{246.5 \text{ Kcal/min.}}$$

Donde Q_t es igual a la potencia calorífica necesaria para el calentamiento del aire durante la operación de secado en la etapa de velocidad constante. De acuerdo a ello puede calcularse el consumo de vapor, considerando que éste puede trabajarse a presiones bajas como vapor saturado (37). En base a ello puede suponerse una temperatura de 120 °C.

De acuerdo a lo anterior:

$$Q_t = M_v \epsilon_v \quad (1.10)$$

Donde:

M_v = masa de vapor (Kg/hr)

ϵ_v = calor latente de vapor a 120 °C (525.94 Kcal/Kg)

Por cuestiones de diseño se puede permitir hasta un 10% en pérdidas de calor (26,37), o sea :

$$Q_{t'} = Q_t \times 1.10 \quad (1.11)$$

Entonces el consumo de vapor esta dado por:

$$M_v = Q_{t'} / \epsilon_v = 246.5(60)(1.10) / 525.94$$

$$M_v = \underline{31 \text{ Kg de vapor/hr}}$$

INDICE DE FIGURAS.

Figura		Página
3.1.	Componentes de un colector solar.	18
3.2.	Secadores solares directos.	23
3.3.	Secador solar indirecto.	24
3.4.	Secador solar mixto.	25
4.1.	Estufa eléctrica de secado.	27
4.2.	Secador de charolas atmosférico	28
4.3.	Secador solar directo.	30
4.4.	Proceso de secado de plátano.	31
4.5.	Curvas de SO ₂ residual para plátano seco.	32
4.6.	Curvas de secado a diferente espesor.	40
4.7.	Influencia del espesor de las rodajas en la - velocidad de secado.	41
4.8.	Curvas de secado a diferente temperatura del - aire de secado.	45
4.9.	Influencia de la temperatura del aire en la - velocidad de secado.	46
4.10.	Distribución de la velocidad de aire por zonas en la cámara de secado acondicionada.	49
4.11.	Curva típica de secado para plátano troceado - en un secador de charolas atmosférico.	52
4.12.	Curva de velocidad de secado para plátano tro- ceado en un secador de charolas.	53
4.13.	Curva de secado solar y temperatura en el inte rior de la cámara de secado para plátano en los meses de Febrero a Mayo (1990).	55
4.14.	Curva de secado solar y temperatura en el inte rior de la cámara de secado para plátano en los meses de Junio a Septiembre (1990).	56
5.1.	Charola de malla galvanizada.	63
5.2.	Carretilla de 20 charolas.	64
5.3.	Cámara de secado.	65

Figura		Página
5.4.	Secador de charolas.	66
5.5.	Calentador.	67
5.6.	Secador solar directo con tres unidades de - secado.	70
5.7.	Secador solar eólico.	71

INDICE DE CUADROS.

Cuadro		Página
1.1.	Análisis químico proximal del plátano en - comparación con otras frutas.	2
1.2.	Producción mundial de plátano.	4
1.3.	Producción nacional de plátano.	5
1.4.	Representatividad de los principales Esta- dos productores de plátano.	6
2.1.	Clasificación de los secadores por su esca- la de producción.	12
4.0.	Análisis de varianza: efecto del sulfitado en el contenido de SO ₂ residual.	38
4.1.	Efecto del espesor de las rodajas en el se- cado de plátano.	42
4.2.	Análisis de varianza: efecto del espesor en en el secado de plátano.	43
4.3.	Efecto de la temperatura del aire en el se- cado de plátano.	47
4.4.	Análisis de varianza: efecto de la tempera- tura del aire en el secado de plátano.	47
4.5.	Análisis de varianza: efecto de la distribu- ción de aire en la cámara de secado.	50
4.6.	Secado solar de plátano troceado de Febrero a Septiembre de 1990.	57
4.7.	Análisis de varianza: efecto de la época del año en el secado solar de plátano.	58
4.8.	Temperatura media mensual en el Estado de - México y regiones productoras de plátano.	59
5.1.	Dimensiones del secador de charolas.	62
5.2.	Especificaciones del secador de charolas.	68
5.3.	Características del secador solar directo.	69
6.1.	Costos fijos del secador de charolas.	74
6.2.	Mano de obra requerida.	75
6.3.	Costos de operación del secador de charolas.	75
6.4.	Cotización de una unidad de secado solar.	76
6.5.	Costos de operación del secador solar.	77