



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

MODELACIÓN MATEMÁTICA, SIMULACIÓN, ANÁLISIS PARAMÉTRICO Y FINANCIERO DE UNA CÁMARA DE SECADO SOLAR PARA CACAO

Gustavo Vásquez-Tantas

Piura, octubre de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Vásquez, G. (2017). *Modelación matemática, simulación, análisis paramétrico y financiero de una cámara de secado solar para cacao* (Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánico-Eléctrica). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

U N I V E R S I D A D D E P I U R A
FACULTAD DE INGENIERÍA



“Modelación matemática, simulación, análisis paramétrico y financiero de una cámara de secado solar para cacao”

**Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico- Eléctrico**

Gustavo Jeancarlos Vásquez Tantas

Asesor: Dr. Ing. Daniel Marcelo Aldana

Piura, Octubre 2017

A Dios por la fuerza interior impulsora para ponerme de pie, soñar, y nunca estar satisfecho.

A mis padres, hermanos y sobrinos con amor y gratitud.

Prólogo

El presente proyecto de investigación surge como iniciativa para mejorar el proceso de secado tradicional de cacao en la región Piura. El proceso de secado se puede mejorar cambiando el tipo de secado, como por ejemplo utilizando un secador solar indirecto. Para estudiar la influencia y las mejoras del secador solar indirecto sobre el cacao, se estudió los conceptos fundamentales del secado, las propiedades termodinámicas del cacao, los cambios biológicos y físicos que se producen en el cacao durante el proceso de secado. Una vez estudiada la teoría del secado y el comportamiento del cacao en el proceso de secado, se da parte a la modelación matemática y la simulación numérica de la cámara de secado solar indirecto dimensionado y construido por el laboratorio de Sistemas Automáticos de control de la Universidad de Piura, ingresando datos experimentales de la salida del colector solar y datos físicos del cacao.

Como parte del proyecto se utilizó el software MATLAB, con el que se ha podido llevar a cabo la solución numérica de la cámara de secado, el análisis paramétrico, el análisis financiero y la optimización de la cámara de secado. Esto es importante porque ha permitido analizar las diferentes condiciones que se podrían presentar en el secador indirecto.

El presente estudio forma parte del proyecto Círculo de Investigación, convenio 013-2014- FONDECYT, para mejorar la producción y la calidad del cacao, el cual es financiado por el FONDECYT- CONCYTEC y desarrollado con el soporte científico de especialistas de la Universidad de Piura, la Universidad de Jaén (UNJ) y el Instituto Tecnológico de la Producción (ITP).

A lo largo de este trabajo, se ha tratado de mantener en el rigor científico, ofreciendo al mismo tiempo al lector, una visión intuitiva de como los investigadores han conseguido alcanzar grandes avances en correlacionar las características físicas y bioquímicas del cacao con parámetros constructivos del secador solar.

Debo dar las gracias a muchas personas por la ayuda prestada durante la realización de este trabajo. Al Dr. Ing. William Ipanaqué por su exigencia, confianza, enseñanzas, apoyo y motivación para el desarrollo de mi investigación, lo cual tiene un valor incalculable. Al Dr. Ing. Daniel Marcelo Aldana por sus ánimos para ponerme manos a la obra, paciencia, opiniones y sugerencias detalladas que realzan enormemente la presentación. También manifiesto un agradecimiento a FONDECYT- CONCYTEC por el financiamiento del proyecto “Alianza público privada para el desarrollo de tecnologías que incrementan el valor agregado en las cadenas agroindustriales con énfasis en innovación social y desarrollo

sustentable”, contrato 013- 2014- FONDECYT y a la Universidad de Piura por apoyar generosamente mi investigación y por su formación personal y académica.

Aunque espero que el lector disfrutará leyendo esta tesis, soy consciente de que pueden dar una impresión exagerada del papel que he desempeñado en el desarrollo del secado solar de cacao. Por este motivo, permítanme aprovechar esta oportunidad para expresar mi agradecimiento a los científicos de todo el mundo que han participado de forma crucial y con enorme dedicación en el desarrollo del secado solar. Pido disculpas a todos aquellos cuya obra no está incluida en esta relación; esto no es más que un reflejo de la perspectiva temática que he elegido y de las limitaciones de espacio de una presentación general.

Finalmente, mi más sincero agradecimiento a todos mis amigos y compañeros de investigación que me ayudaron de muchas formas durante el periodo de realización de este trabajo.

Resumen

El secado es uno de los métodos más antiguos y utilizados por los agricultores para evitar la degradación de los productos agroindustriales y permitir que se almacenen por largos periodos de tiempo. Comprende tres etapas; la etapa de inducción, etapa de velocidad constante y la etapa de velocidad decreciente y dos fenómenos fundamentales, los cuales describen la forma en que se llevará a cabo la deshidratación del producto, y son la transferencia de calor y de masa. Las etapas mencionadas anteriormente, dependen del contenido de humedad del producto y de las propiedades físico químicas del producto.

En la empresa ASPROBO (Asociación de productores de banano orgánico) ubicada en la provincia de Buenos Aires, Morropón, Piura, se realiza el secado tradicional de cacao que presenta muchos inconvenientes como: es lento, secado heterogéneo, contaminación del cacao, condiciones no controladas de temperatura, radiación solar directa y falta de protección ante fenómenos naturales como la lluvia. Para solucionar dichos inconvenientes es factible implementar un secador solar indirecto y de esta forma mejorar el secado tradicional.

Como primera fase de la investigación, se realizó una revisión del estado del arte de la teoría del secado de productos y de los diferentes tipos de secadores solares que se han implementado en todo el mundo. También se investigó los diferentes tipos de secadores solares para cacao en donde se pudo comprobar que los secadores indirectos son viables para solucionar los inconvenientes del secado tradicional.

Luego de estudiar el estado del arte de los parámetros que intervienen en el proceso de secado se realizó la modelación matemática en derivadas parciales del secador solar indirecto, basada en la transferencia de calor y masa. Luego, se realizó un estudio paramétrico de la cámara de secado para estudiar la influencia de algunos parámetros de entrada sobre el tiempo de secado, la velocidad de secado y la temperatura del cacao. En las simulaciones realizadas se demostró que el secado de cacao dura aproximadamente cuatro días.

Además, se realizó un análisis financiero de secadores solares indirectos para explicar los beneficios en la calidad del cacao y en la reducción de mermas del cacao durante el proceso de secado. Los resultados que se obtuvieron fueron muy satisfactorios y se concluyó que un secador solar indirecto mejora el secado solar tradicional de cacao.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Teoría del secado	3
1.1 Introducción	3
1.2 Fundamentos de secado	7
1.2.1 Humedad en los sólidos	7
1.2.2 Sólidos higroscópicos y no higroscópicos	9
1.2.3 Actividad del agua	9
1.2.4 Humedad de equilibrio	11
1.2.5 Isotermas de sorción	13
1.2.6 Humedad ligada, no ligada y libre	17
1.2.7 Cinética de secado	18
1.2.8 Clasificación de secadores.....	21
1.3 Secadores solares	23
Capítulo 2: El proceso de secado del cacao.....	37
2.1 Introducción	37
2.2 El origen del cacao.....	38
2.3 Panorámica mundial del cacao.....	38
2.3.1 Organizaciones	38
2.3.2 Oferta de cacao	38
2.3.3 Demanda de cacao	39
2.4 Producción de cacao en el Perú	40
2.5 Variedades de cacao en el mercado	42
2.5.1 Cacao criollo o dulce	42
2.5.2 Cacao amargo o forastero	44
2.5.3 Cacao variedad trinitaria.....	45
2.6 Clasificación comercial e industrial del cacao.....	45
2.6.1 Cacao ordinario.....	45
2.6.2 Cacao fino o de aroma	46

2.7	Características del cacao en el secado	46
2.7.1	Tiempo de secado.....	47
2.7.2	Coloración interna y externa del cacao	48
2.7.3	Forma del grano de cacao.....	49
2.7.4	Efectos sobre el pH y la acidez valorable del cacao.....	49
2.7.5	Efectos sobre el contenido de ácidos grasos libres	51
2.7.6	Efectos en la concentración de polifenoles en los granos de cacao	52
2.8	Características de un adecuado secado de cacao	54
2.9	Secadores para cacao	55
2.9.1	Secado natural de cacao	55
2.9.2	Secado convencional de cacao	57
2.9.2.1	Secado de cacao por bomba de calor	57
2.9.2.2	Secador rotativo para cacao	58
2.9.2.3	Secador tipo batch.....	59
2.9.3	Secadores solares para cacao.....	60
2.10	Secado en Asprobo	64
2.10.1	Determinación del contenido de la humedad	66
2.10.1.1	Método de rutina (norma técnica).....	66
2.10.1.2	Método rápido.....	66
Capítulo 3: Modelo matemático de la cámara de secado para cacao		69
3.1	Introducción.....	69
3.2	Descripción del sistema	71
3.3	Objetivos del modelo matemático	72
3.4	Procesos de transferencia de calor y de masa en un secador solar indirecto.....	72
3.5	Hipótesis para el modelo matemático de la cámara de secado.....	74
3.6	Modelo matemático de no equilibrio de la cámara de secado	76
3.6.1	Nomenclatura	76
3.6.2	Formulación del modelo matemático.....	78
3.6.2.1	Balance de energía para el aire desecante	78
3.6.2.2	Balance de energía en el cacao	80
3.6.2.3	Balance de masa del aire intergranular	81
3.6.2.4	Balance de masa en el grano de cacao	81
3.6.3	Condiciones iniciales y de frontera	81
3.6.4	Discretización del modelo matemático por diferencias finitas	82
3.7	Parámetros para el aire desecante húmedo	85
3.7.1	Calor específico del aire seco.....	85
3.7.2	Calor específico del vapor de agua.....	85

3.7.3	Humedad relativa.....	86
3.8	Parámetros del cacao.....	86
3.8.1	Calor específico del cacao	86
3.8.2	Densidad del cacao	86
3.8.3	Diámetro equivalente del cacao.....	86
3.8.4	Superficie específica del cacao.....	87
3.8.5	Calor latente de vaporización del cacao	87
3.9	Estructura del algoritmo para la simulación	87
3.9.1	Etapa de pre proceso.....	88
3.9.2	Etapa de proceso	89
3.9.3	Etapa de post proceso	90
3.10	Datos del programa de simulación.....	90
3.11	Simulación de la cámara de secado.....	92
3.11.1	Análisis del contenido de humedad en el cacao	92
3.11.2	Análisis de la temperatura del aire desecante	94
3.11.3	Análisis de la temperatura del cacao	95
3.11.4	Análisis de la humedad específica del aire desecante	95
Capítulo 4:	Análisis paramétrico de la cámara de secado solar para cacao	97
4.1	Introducción.....	97
4.2	Prueba 1: Variando el área de las bandejas.....	97
4.3	Prueba 2: Variando la altura de la cámara de secado.....	99
4.4	Prueba 3: Variando el flujo másico.....	100
4.5	Prueba 4: Variando el diámetro promedio del cacao	102
4.6	Prueba 5: Variando la temperatura del secado.....	103
Capítulo 5:	Análisis económico de secadores solares	107
5.1	Introducción.....	107
5.2	Parámetros en el análisis financiero de secadores solares	107
5.2.1	Costo de capital de secadores solares	109
5.2.2	Costo unitario de secado y costo unitario de energía útil	110
5.2.3	Valoración de los beneficios.....	110
5.2.3.1	Mejora en la calidad del producto	110
5.2.3.2	Reducción del desperdicio en el producto durante el secado.....	111
5.2.4	Precio de equilibrio del colector.....	111
5.3	Análisis financiero de un secador solar indirecto	111
Conclusiones.....		115
Bibliografía.....		117
Anexos		123

Introducción

El Perú es el tercer mayor productor de cacao en América Latina con aproximadamente 145.000 hectáreas, a partir del 2014. En la zona norte del Perú se producen cultivos de competencia internacional, entre ellos está el cacao. Sin embargo, los tratamientos post cosecha se realizan de forma tradicional, lo cual genera demanda de mano de obra, pérdida en la calidad y desperdicio por descarte del producto. Un ejemplo de lo antes expuesto es el proceso de secado del cacao, el cual es fundamental para detener la actividad enzimática y para que se pueda almacenar por largos periodos de tiempo. Dicho proceso en la mayoría de los casos se realiza de forma tradicional (exposición directa al sol), lo cual es ineficiente porque es lento, el cacao está expuesto a partículas extrañas, insectos y se seca de forma heterogénea.

Para solucionar estos inconvenientes del secado tradicional surgen los secadores solares. Se han realizado muchos estudios sobre secadores solares que muestran mejoras importantes en la calidad de los productos. Por esta razón se seleccionó un secador solar indirecto y se estudiaron los fenómenos físicos que se producen, modelando los balances de masa y energía del aire desecante y del cacao. Para esto, la tesis se ha dividido en cinco capítulos, los cuales se resumen a continuación.

En el primer capítulo, se realiza un estudio sobre la teoría del secado, donde se explican todos los conceptos relacionados al secado de productos. También se realiza un estudio del estado del arte acerca de los diferentes tipos de secadores convencionales y solares.

En el segundo capítulo se realiza un estudio acerca del proceso de secado del cacao, donde se explica la influencia del secado en las características bioquímicas y físicas del cacao. También se realiza un estudio del estado del arte de los diferentes tipos de secadores para cacao que se han implementado en el mundo. Finalmente, se explica la metodología del secado de cacao en Asprobo.

El tercer capítulo abarca la modelación matemática de no equilibrio y simulación de la cámara de secado para cacao. Primeramente, se explica los fenómenos de transferencia de calor y de masa que se producen en la cámara de secado. Luego se explica el algoritmo de programación en MATLAB para la solución de las ecuaciones en derivadas parciales. Finalmente, se realiza la simulación del modelo matemático que es importante para sacar conclusiones valiosas acerca del comportamiento de variables como temperatura, humedad específica del aire desecante y temperatura y humedad del cacao.

En el cuarto capítulo se realiza un análisis paramétrico del modelo matemático. Para esto se hacen variar los parámetros de entrada al modelo como diámetro promedio del cacao, temperatura de secado, flujo másico de aire, el área de las bandejas y la altura de la cámara de secado.

Finalmente, en el quinto capítulo se realiza un análisis financiero de un secador solar indirecto para cacao. Como primera etapa, se realiza un análisis de la influencia de los parámetros de entrada sobre el costo unitario del secado de cacao. Luego se determina el precio de equilibrio del colector, que es un parámetro importante porque determina el valor máximo del colector hasta donde es viable económicamente y finalmente se realiza un cálculo de los beneficios monetarios en la mejora de la calidad y disminución del desperdicio del producto.

Capítulo 1

Teoría del secado

1.1 Introducción

La conservación de los productos agroindustriales es fundamental para almacenarlos durante largos periodos de tiempo sin un deterioro considerable en su calidad. Debido a esto, a lo largo del tiempo se han implementado muchas tecnologías de procesos como enlatados, procesos de congelación y secado a gran escala en la industria. Entre estas tecnologías, el secado es probablemente una de las técnicas más antiguas empleadas para la conservación de productos agroindustriales (Mujumdar y Law, 2010), porque ofrece un medio muy eficaz y práctico de conservación de los productos para reducir las pérdidas pos cosecha.

El principal objetivo del proceso de secado es reducir el contenido de humedad del producto hasta un valor que garantice la calidad de un producto. Esto trae como consecuencia una reducción sustancial en el peso y volumen del producto, minimizando su embalaje, almacenamiento y costos de transporte. El secado implica la aplicación de calor para vaporizar la humedad de los productos y fenómenos de transporte de masa para transportar la humedad del producto. Por lo tanto, el secado es un proceso simultaneo de transferencia de calor y de masa, para lo cual se necesita suministrar energía (térmica, físico química o mecánica).

La transferencia de calor se produce del agente desecante al producto. El calor se transmite por la existencia de un gradiente de temperatura entre las temperaturas del producto y el agente desecante (aire caliente). Dicho proceso se encarga de vaporizar la humedad del producto.

La transferencia de masa es la que se encarga de transportar la humedad del interior del producto hacia la superficie y de la superficie al aire de los alrededores. La masa se transmite cuando existe un gradiente de concentración entre el agente desecante y el producto.

En la figura 1 se puede apreciar los procesos combinados de transferencia de calor y de masa que se producen en el producto durante el proceso de secado.

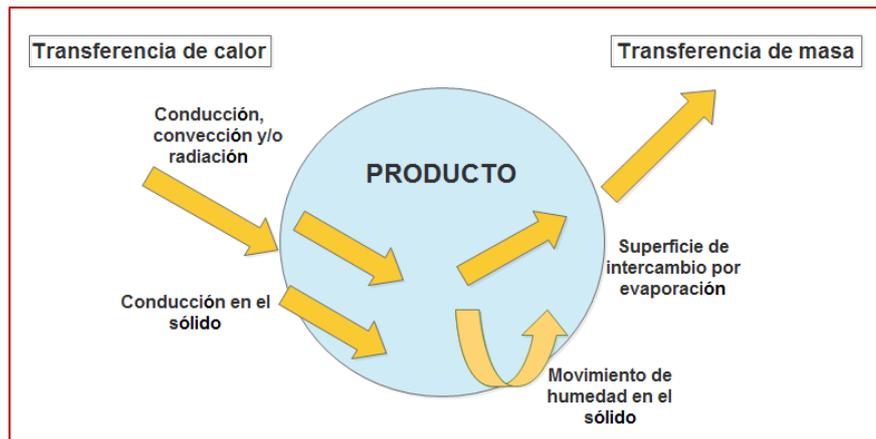


Figura 1. Transferencia de calor y masa en el producto durante el proceso de secado

Fuente: Elaboración propia

Además de estos dos procesos simultáneos, se producen otros procesos que están relacionados con las propiedades físicas del producto (la forma, la textura, la apariencia y la resistencia del producto). Estos procesos dependen de una variable muy importante que es la actividad del agua (a_w) en el producto, que se detallará más adelante.

La humedad en los productos se reduce hasta un valor adecuado para detener las reacciones químicas de deterioro y así evitar la reproducción de microorganismos como bacterias, levaduras y mohos que causan hongos sobre el producto (Mujumdar y Law, 2010). Al mismo tiempo, se reducen las tasas de reacción para evitar el crecimiento de microorganismos. Estas tasas de reacción están muy ligadas al contenido de ácidos volátiles. En el secado se eliminan dichos ácidos volátiles debido a que un exceso de estos afecta a la calidad de los productos (Faborode et al., 1995). Esto quiere decir que el secado afecta las reacciones químicas en los productos, y por ende tiene un impacto en las propiedades mecánicas, sensoriales y nutricionales de los productos.

En la figura 2, se muestra una gráfica de la velocidad de reacción en función de la actividad del agua, donde se puede apreciar que la actividad del agua es más importante para la estabilidad de un producto, que la humedad presente en el producto. Para la mayoría de los productos, el punto crítico por debajo del cual se evita el crecimiento de microorganismos está entre 0.6-0.7 de actividad de agua, estos valores corresponden a valores de humedad en base seca en el producto aproximadamente entre 6% y 11% (Bonazzi et al., 2008).

En sus inicios, el proceso de secado se llevó a cabo mediante energía solar, hoy en día hay muchos tipos sofisticados de secadores que se usan para deshidratar productos. Durante las últimas décadas se han desarrollado diferentes tipos de secadores con el fin de entender los cambios bioquímicos que se producen en el secado, así como también poder optimizar el proceso reduciendo el tiempo de secado, los costos en consumo energético y mejorando la calidad del producto. Existen más de 500 tipos de secadores y alrededor de 100 tipos están disponibles comercialmente (Mujumdar y Law, 2010).

En el diseño de un secador se tiene en cuenta básicamente las características físicas del producto, diferentes modos de entrada de calor, temperaturas de funcionamiento, especificaciones de calidad del producto seco, etc. (Bonazzi et al., 2008).

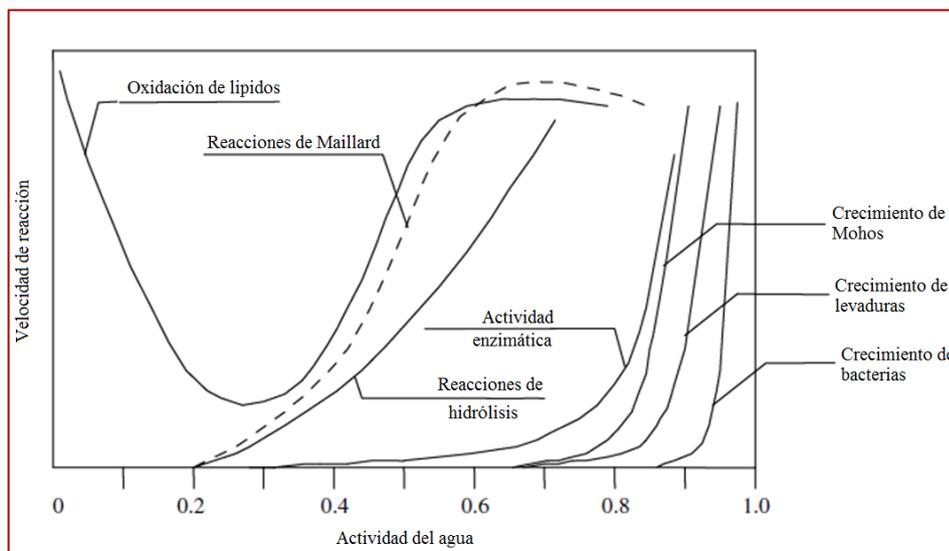


Figura 2. Curvas de estabilidad en los productos
Fuente: Bonazzi et al., 2008

La mayoría de los secadores utilizan aire caliente como agente desecante, la convección como modo de transferencia de calor, y en condiciones de presión constante. Para capacidades pequeñas y tiempos de secado grandes, los secadores solares tipo batch son los más recomendables. Para los secadores solares, el aire es precalentado antes de ingresar al producto, luego ingresa a una cámara de secado, donde se produce la transferencia de calor y de masa con el producto.

Resumiendo, los objetivos del proceso de secado son las siguientes:

- Mejorar la productividad. Esto se consigue, reduciendo el tiempo de secado.
- Aumentar el tiempo de conservación y la vida útil del producto facilitando su transporte, manejo y almacenamiento.
- Proporcionar estabilidad de componentes químicos a temperatura ambiente durante largos periodos de tiempo.
- Garantizar el cumplimiento de las especificaciones de calidad de los productos.
- Permitir el mejor aprovechamiento del producto.

En la tabla 1 se detalla los tipos de secadores convencionales que se encuentra en la industria alimentaria. Chakraverty et al., 2003 y Mujumdar, 2007 encontraron información más detallada acerca de estos diferentes tipos de secadores convencionales, así como nuevos diseños de mejora.

Los secadores convencionales tienen varios inconvenientes, como por ejemplo: la calidad del producto no es uniforme debido al sobre secado, tiempos de secado largos debido a la baja eficiencia de contacto entre el medio de secado y el producto y endurecimiento de la superficie del producto que es causada por el exceso de secado (Lopez et al., 2010).

Debido a esto, se generan cambios inadecuados en el color, características físicas, químicas y sensoriales de los productos (Falade et al., 2010). Esto trae como consecuencia bajo rendimiento de secado y altos costos de operación. En los últimos años, se han investigado muchas tecnologías para mejorar estos inconvenientes (Raman et al., 2012). Estas tecnologías se pueden clasificar en diversas categorías. Estos nuevos desarrollos deben ser rentables para asegurar su aceptación en el mercado. En conclusión, se necesitan nuevas tecnologías para:

- Obtener mayor eficiencia energética.
- Reducir el impacto ambiental, con el uso de energías renovables (secado solar).
- Reducir los costos en material y combustible fósil.
- Menor costo en mantenimiento.

Tabla 1.- Dispositivos de secado y productos en la industria alimentaria

Dispositivos de secado y productos en la industria alimentaria	
Dispositivos	Productos
Secador de tambor	Líquidos densos, pulpas, pastas
Secador rotativo	Partículas sólidas:
Secador de lecho profundo	Cereales: malta, maíz, arroz, trigo
Secador de spray	Líquidos: leche, suero, café, té, levadura
Secador de transportador neumático, cinturón o banda	Pastas, vegetales, frutas, tabaco, semillas, alimentos extruidos para mascotas
Secador de lecho fluidizado	Polvos y partículas pequeñas: Polvo de leche, suero, levaduras, alimentos extruidos, granos de café, granos de soya, gránulos de chocolate.
Liofilización	Productos sensibles al calor: extractos de café, frutas, vegetales, hongos, plantas aromáticas.
Gabinetes ventilados	Salchichas, jamones

Fuente: Bonazzi et al., 2008

Actualmente, la utilización de las energías renovables (energía solar y eólica) se considera adecuada para la optimización del proceso de secado debido a la escasez de energía y para reducir al mínimo el uso de combustible fósil (Ekechukwu y Norton, 1999).

El secado solar es viable sobre todo en países donde el costo de energía de combustibles fósiles es muy alto. En el futuro, los procesos de secado industrial se podrían diseñar con paneles solares térmicos, paneles fotovoltaicos combinados con energía eólica. Sin embargo, la energía solar y eólica presentan un inconveniente que es su dependencia de las condiciones medioambientales (radiación solar, velocidad del viento, temperatura del ambiente, humedad del aire, etc.), por esta razón es necesario implementar materiales de almacenamiento térmico (Raman et al., 2012).

Para aplicar el secado solar, se necesita que se den las condiciones ambientales adecuadas para su correcto funcionamiento. Estas condiciones ambientales son: radiación térmica, temperatura y humedad en la región donde va a funcionar el secador (Ekechukwu y Norton, 1999). Debido a esto en muchas regiones hay pérdidas pos cosecha en los productos.

El secado solar es un procedimiento bastante económico para diversos productos en mediana y pequeñas cantidades. De esta manera contribuye significativamente a la economía de las pequeñas comunidades agrícolas.

El secado solar, correspondiente con este trabajo de investigación se considera potencialmente interesante y cuya aplicación a escala puede mejorar los sistemas actuales de secado del cacao en la región Piura, así como abrir las posibilidades para su utilización con otros tipos de productos agrícolas.

1.2 Fundamentos de secado

El secado es, principalmente, un fenómeno de eliminación de líquido de un sólido mediante evaporación. En las siguientes secciones se proporciona un panorama general de los principios del proceso de secado. Cabe resaltar que estos principios de secado son independientes del tipo de energía utilizada (Ekechukwu y Norton, 1999).

1.2.1 Humedad en los sólidos

El contenido de humedad en un sólido es el parámetro de mayor influencia en el secado, que afecta a todas las fases del secado. El contenido de humedad presente en un sólido puede ser expresado en base húmeda o en base seca, e indicada como decimales o en porcentaje (Ekechukwu y Norton, 1999).

El contenido de humedad en base húmeda, se define como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material húmedo, viene dado por la ecuación 1.1. De igual manera, el contenido de humedad en base seca, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material seco, se indica en la ecuación 1.2.

$$M_{wb} = \frac{m_w}{m_o} = \frac{m_o - m_d}{m_o} \quad (1.1)$$

$$M_{db} = \frac{m_w}{m_d} = \frac{m_o - m_d}{m_d} \quad (1.2)$$

Donde M_{wb} es la humedad en base húmeda (kg de agua/ kg de producto húmedo), M_{db} es la humedad en base seca (kg de agua/ kg de producto seco), m_o es el peso inicial del producto sin secar (kg), m_w es el contenido de agua en el producto húmedo (kg) y m_d es el peso de la materia seca en el producto (kg).

Existe una relación entre M_{wb} y M_{db} y se expresa en las ecuaciones (1.3) y (1.4), respectivamente.

$$M_{wb} \% = \frac{100M_{db} \%}{100 + M_{db} \%} \quad (1.3)$$

$$M_{db} \% = \frac{100M_{wb} \%}{100 - M_{wb} \%} \quad (1.4)$$

En la figura 3 se muestra la relación entre los contenidos de humedad en base húmeda y seca. La humedad en base seca se utiliza con mayor frecuencia para realizar modelos y cálculos matemáticos. El contenido de humedad en base húmeda se utiliza normalmente para medir la humedad experimental en productos agrícolas.

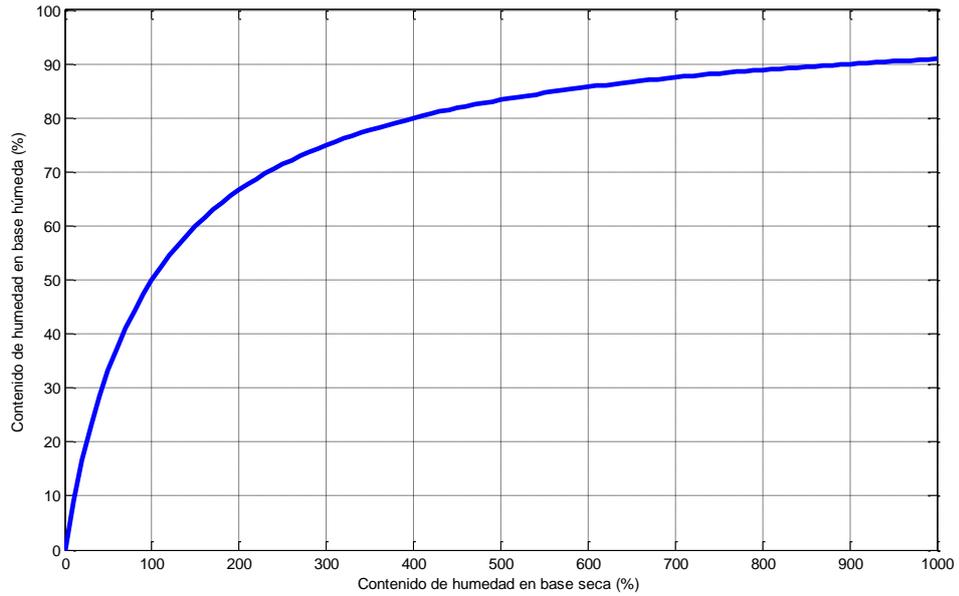


Figura 3. Relación entre el contenido de humedad en base seca y húmeda
Fuente: Elaboración propia

En ingeniería, y más específicamente, en pruebas de secado, donde el producto se va pesando de forma regular disponiendo de un registro de pérdida de peso cada cierto tiempo t , el contenido de humedad en base húmeda y seca se expresa en las ecuaciones (1.5) y (1.6), respectivamente.

$$M_{twb} = 1 - \left[\frac{(1 - M_{owb})m_o}{m_t} \right] \quad (1.5)$$

$$M_{tdb} = \left[\frac{(M_{odb} + 1)m_t}{m_o} \right] - 1 \quad (1.6)$$

Donde M_{owb} es el contenido de humedad inicial en base húmeda, M_{odb} es el contenido de humedad inicial en base seca, y m_t es el peso del material húmedo en cada instante de tiempo (kg).

1.2.2 Sólidos higroscópicos y no higroscópicos

Los sólidos higroscópicos son materiales que tienen la capacidad de absorber o adsorber agua con el agente desecante hasta llegar a un contenido de humedad de equilibrio. En la figura 4, se muestra un esquema de los procesos de adsorción o absorción de humedad en un sólido higroscópico. Cuando se dan los dos procesos de forma conjunto se le denomina proceso de sorción (Patera et al., 2013).

Los sólidos no higroscópicos que no contienen inherentemente agua, no se equilibran con los cambios de humedad del agente desecante, porque no tienen humedad para liberar, ni la naturaleza para absorber la humedad. Por ejemplo, los productos agroindustriales como el cacao o materiales orgánicos celulósicos como el papel se ajustarán a los cambios de humedad del agente desecante, mediante absorción o desorción de humedad, mientras que los productos inorgánicos como el metal no lo harán. Los materiales no higroscópicos tales como el metal pueden ser afectados por la humedad del ambiente en otros aspectos como corrosión.

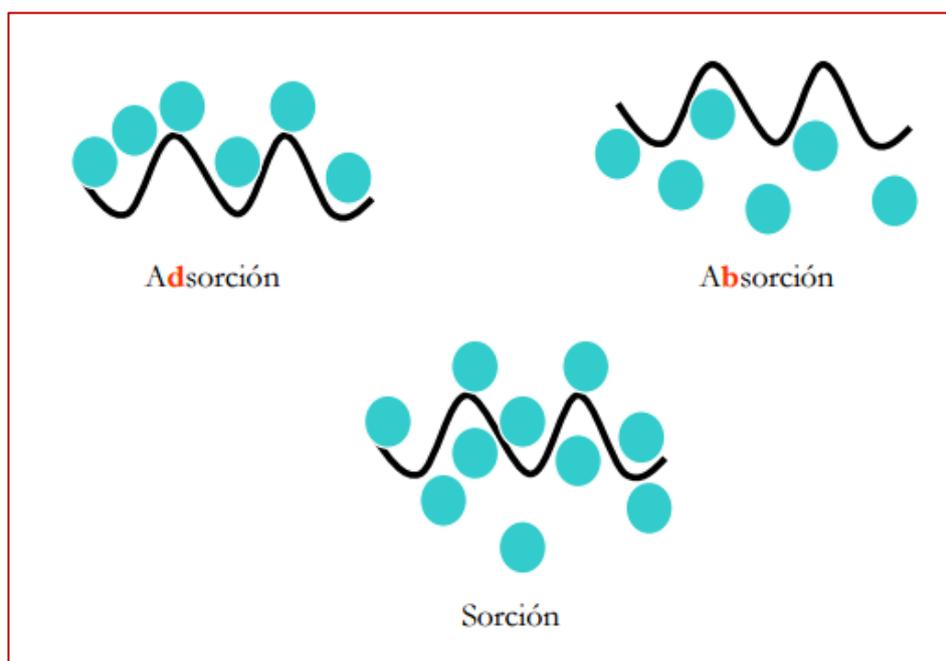


Figura 4. Relación entre el contenido de humedad en base seca y húmeda
Fuente: Elaboración propia

1.2.3 Actividad del agua

La importancia funcional del agua en los productos va mucho más allá de su mera presencia cuantitativa en su composición. Por un lado, el agua es fundamental para la buena textura y la apariencia de las frutas y verduras.

En tales productos, la pérdida de agua se traduce, por lo general, en una menor calidad. Mientras que, por otro lado, el agua es responsable del crecimiento de microorganismos, reacciones químicas y deterioro de algunos productos.

El efecto del agua sobre la estabilidad de los productos no puede estar relacionado únicamente con la humedad en base seca o húmeda del producto, porque para cada producto existe un límite de actividad del agua por debajo del cual, los microorganismos dejan de crecer. Se ha demostrado que productos con el mismo contenido de humedad en base seca se alteran de manera distinta. Para explicar la influencia del agua en la estabilidad de un producto se estudiará la actividad del agua (a_w).

La a_w también está relacionada con la textura de los productos. Los productos con una a_w elevada tienen una textura más jugosa, tierna y masticable. Cuando la a_w de estos productos disminuye, aparecen características de textura indeseables como dureza, sequedad y endurecimiento. En cambio, los productos con una a_w baja son crujientes y quebradizos; si su a_w aumenta, la textura cambia, produciéndose el reblandecimiento del producto. La a_w también afecta a otras propiedades como la agrupación y aglutinación de productos en polvo y granulados.

La a_w más baja para el crecimiento de la mayoría de las bacterias que producen deterioro en alimentos está alrededor de 0.9. La a_w para el crecimiento de hongos y levaduras está próxima a 0.61. El crecimiento de hongos micotoxigénicos se produce con valores de a_w cercanos a 0.78 (Bonazzi et al., 2008).

La actividad del agua se define como la relación entre la presión de vapor del aire alrededor del producto y la presión de vapor de agua pura, a una misma temperatura. En la ecuación 1.7 se muestra la expresión que define la actividad del agua.

$$a_w = \frac{p(T)}{p_o(T)} \quad (1.7)$$

Donde p , es la presión parcial de vapor de agua del producto a la temperatura T y p_o es la presión de vapor de equilibrio del agua a la temperatura T .

La humedad relativa del aire (RH) se define por el mismo tipo de relación, por lo general esta expresada en porcentaje, como se muestra en la ecuación 1.8.

$$RH = \frac{p'(T)}{p_o(T)} \times 100 \quad (1.8)$$

Donde p' , es la presión parcial de vapor de agua del agente desecante (aire precalentado).

Cuando el producto está en equilibrio con el agente desecante (aire precalentado) entonces las presiones de vapor de agua del producto y del agente desecante son iguales ($p = p'$).

Esto quiere decir que la actividad del agua del producto es igual a la humedad relativa del agente desecante en equilibrio con el producto. Por esta razón, la a_w es algunas veces expresada como la humedad relativa de equilibrio, ERH (ver ecuación 1.9):

$$a_w = \frac{ERH}{100} \quad (1.9)$$

Para la determinación de la actividad del agua de un producto, muchos métodos experimentales se basan en la ecuación 1.9. En la figura 5 se muestra el medidor de actividad de agua para un producto. Una pequeña muestra del producto se coloca en un pequeño espacio de aire totalmente cerrado, y luego se mide la humedad relativa del pequeño espacio por métodos higrométricos como por ejemplo por la técnica “chilled mirror” (Belessiotis y Delyannis, 2011).



Figura 4. Medidor de actividad de agua en un producto

Fuente: Belessiotis y Delyannis, 2011

1.2.4 Humedad de equilibrio

Es el contenido de humedad en un producto cuando se alcanzan las condiciones de equilibrio entre el agente desecante y el producto húmedo. La condición de equilibrio se da cuando la presión parcial de agua que está presente en el producto es igual a la presión de vapor del agua en el aire. Esto significa que la desorción de humedad del producto está en equilibrio dinámico con la absorción de humedad del agente desecante y viceversa (Belessiotis y Delyannis, 2011).

Esto quiere decir que, la tasa de desorción de humedad que el producto transfiere al agente desecante es igual a la tasa de absorción de la humedad del agente desecante y viceversa. Por lo tanto, un producto alcanza el equilibrio de humedad cuando no gana ni pierde humedad con el agente desecante (aire).

El contenido de humedad de equilibrio se expresa en porcentaje. Por ejemplo, si un producto tiene 8% de humedad de equilibrio a $16^{\circ}C$ y 40% de humedad relativa de aire, significa que 8 gr de agua en cada 100 gr de producto ha alcanzado el equilibrio con ese entorno de agente desecante.

En conclusión, el contenido de humedad de equilibrio depende de las propiedades inherentes del producto (madurez, variedad, antigüedad del producto), la temperatura y la humedad relativa del agente desecante. Esta dependencia con la temperatura y humedad relativa del agente desecante se expresa en la ecuación 1.10.

$$M_e = f(RH, T) \quad (1.10)$$

Donde RH es la humedad relativa del agente desecante (aire precalentado), T es la temperatura del agente desecante ($^{\circ}C$) y M_e es la humedad de equilibrio del producto (%db o %wb). Si se mantiene constante la temperatura del agente desecante la ecuación 1.10 se reducirá a la ecuación 1.11.

$$M_e = f(RH) \quad (1.11)$$

La ecuación 1.11, es posible graficarla para una temperatura T . La grafica $f(RH)$ se denomina isoterma de equilibrio (o también llamada isoterma de sorción). La figura 5 muestra la curva de la isoterma de sorción.

De la figura 5, se puede concluir lo siguiente:

- Si la humedad del agente desecante es constante y si se aumenta la temperatura del agente desecante, la humedad de equilibrio desciende.
- Si la temperatura del agente desecante es constante y si se aumenta la humedad relativa del agente desecante, la humedad de equilibrio aumenta.

Finalmente, el contenido de humedad de equilibrio en un producto es fundamental, porque garantiza las condiciones adecuadas para su correcto almacenamiento y así evitar que los productos pierdan calidad.

El contenido de humedad de equilibrio en un producto afecta en las propiedades físicas como porosidad, densidad, color, forma, textura, etc. (Zogzas et al., 1994). En el caso del cacao el contenido de humedad de equilibrio es 7 %wb. Con este valor se garantiza las características físicas óptimas de calidad del cacao (Jinap y Thien, 1994).

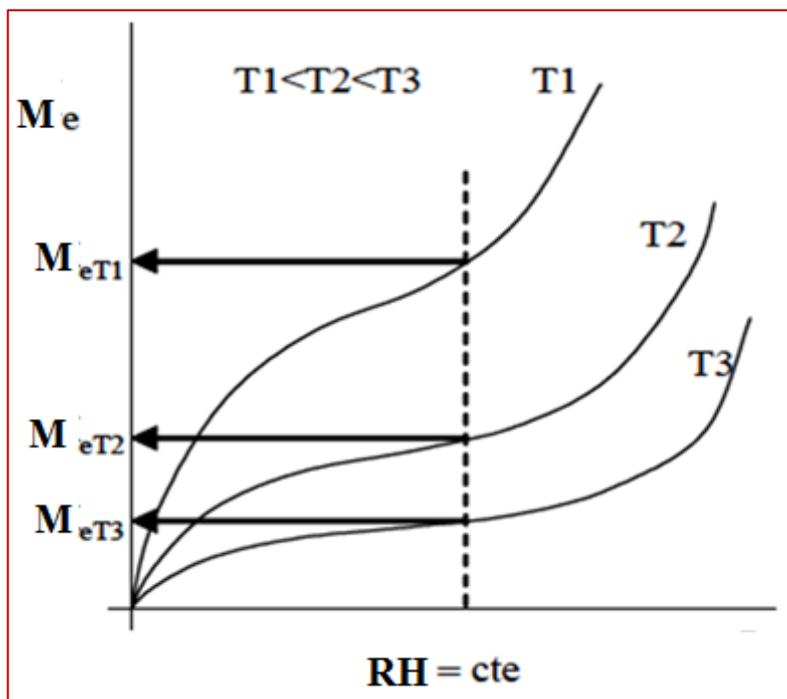


Figura 5. Isotermas de sorción para diferentes temperaturas.
Fuente: Elaboración propia

1.2.5 Isotermas de sorción

Los cambios que se producen en las características biológicas, físicas y químicas en los productos en su procesamiento, almacenamiento y distribución se pueden analizar fácilmente con las isotermas de sorción (Roca et al., 2006).

Las isotermas de sorción son una herramienta fundamental para la predicción del comportamiento de la actividad del agua en un producto, porque describe el comportamiento entre la humedad de equilibrio del producto y la humedad relativa del agente desecante. Además, permiten conocer el contenido de humedad mínimo que puede lograrse en un proceso de secado donde el producto se somete a una corriente de aire con una temperatura y humedad determinada.

En (Ertekin y Gedik, 2004) se determinaron las isotermas de sorción de un gran número de productos. En la figura 6 se muestra una isoterma de sorción típica para un determinado producto.

Como se puede apreciar en la figura 6, las isotermas de sorción pueden representarse a partir de un estado inicial húmedo del producto (curva de desorción) o del producto seco (curva de absorción). Los puntos de una isoterma de sorción indican el contenido de humedad en base seca en el producto que se encuentra en equilibrio con la humedad relativa del agente desecante a una determinada temperatura.

Las curvas de absorción y desorción presentan una histéresis en reabsorber agua cuando el producto está seco. La explicación física de la histéresis en las isotermas de equilibrio ha sido objeto de muchos estudios. Generalmente, la histéresis se da por la condensación de una parte del agua en los capilares del producto (Yan et al., 2008).

Observando las isotermas de sorción, para un mismo contenido de humedad de equilibrio en base seca, los productos pueden tener dos valores diferentes de actividad de agua.

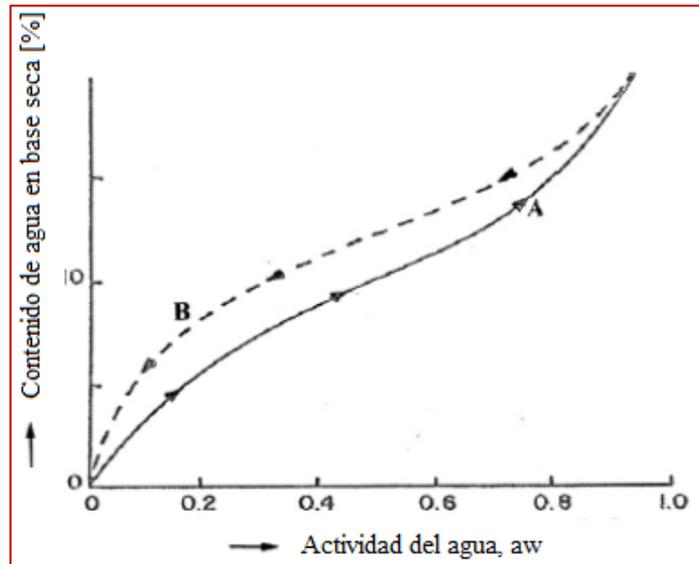


Figura 6. Isoterma de sorción. (A) Curva de absorción
(B) Curva de desorción

Fuente: Belessiotis y Delyannis, 2011

Las isotermas de sorción se clasifican en cinco diferentes tipos (ver figura 7) (Brunauer et al., 1940). Los sólidos con estructura porosa muy fina presentan isotermas de tipo I. Las isotermas de sorción de los polímeros hidrófilos, tales como fibras naturales y alimentos, son de tipo II. Las isotermas de los cauchos, plásticos, fibras sintéticas y alimentos ricos en componentes solubles son de tipo III. Las isotermas de algunos materiales inorgánicos (óxidos de aluminio) son de tipo IV. Para algunos materiales, las isotermas de sorción no pueden ser clasificados, ya que pertenecen a más de un tipo.

Se han realizado muchos estudios para determinar modelos matemáticos (teóricos, semiempíricos, empíricos) para las isotermas de sorción (Bejar et al., 2012) (ver tabla 2). Algunos modelos están basados en teorías físicas de absorción. Otros son expresiones semiempíricas desarrolladas por técnicas de ajuste de curvas.

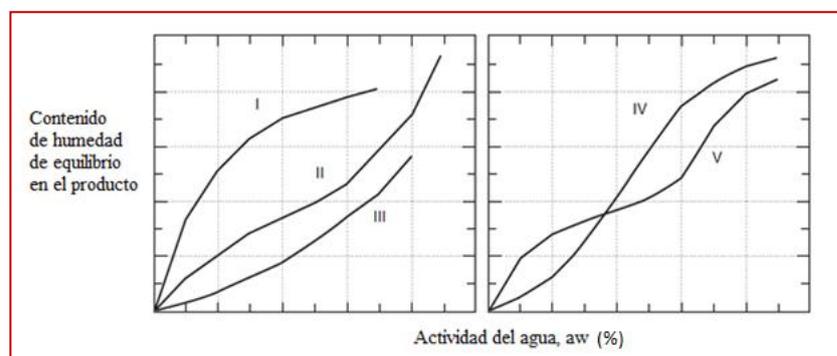


Figura 7. Los cinco tipos de isotermas de sorción en el secado
Fuente: Brunauer et al., 1940

En (Yanniotis y Blahovec, 2009) se desarrolló un modelo basado en la adsorción superficial y una solución de agua. En (Moreira et al., 2009) se desarrolló un modelo de isoterma de sorción basado en la composición de los principales componentes de los productos (glucosa, fructosa, sacarosa, sales, proteínas, fibra y almidón) y la influencia con la temperatura. La ecuación de Langmuir se aplica para la isoterma de tipo I. La ecuación BET es ampliamente usada para muchos tipos de materiales, pero sobre todo a los polímeros hidrófilos para $a_w < 0.5$ (Ver tabla 2).

La ecuación de Halsey se aplica para los materiales del tipo I, II y III. La ecuación de Henderson es menos versátil que la ecuación de Halsey. La ecuación Chung and Pfof se aplica para cereales y otros cultivos de campo, mientras que la ecuación de Iglesias and Chirife se aplica para isotermas del tipo III (para alimentos ricos en componentes solubles). La ecuación de Chen and Clayton se aplica para modelar isotermas de tipo II y III (Granos de soya y maíz). La ecuación de Guggenheim Anderson Boer se considera el modelo más versátil, puede trabajar para en el rango de actividad de agua de $0.1 < a_w < 0.9$ y aplicarse a diversos productos (inorgánicos, alimentos, etc). La ecuación GAB es, probablemente, la más adecuada para el análisis y diseño del proceso de secado debido a su fiabilidad, su forma matemática simple y su amplia aplicación (productos y actividad de agua) (Bejar et al., 2012).

Tabla 2.- Ecuaciones de isotermas de sorción

Nombre de la ecuación	Ecuación
Langmuir	$a_w \left(\frac{1}{M_e} - \frac{1}{M_{mon}} \right) = \frac{1}{CM}$
Brunauer-Emmet-Tetter (BET)	$\frac{a_w}{(1 - a_w)M_e} = \frac{1}{M_b B} + \frac{B - 1}{M_b B} a_w$
Halsey	$a_w = \exp \left[-\frac{b_1}{RT} \left(\frac{M_e}{b_2} \right)^{b_3} \right]$
Henderson	$1 - a_w = \exp[-b_1 T M_e^{b_2}]$
Chung and Pfof	$\ln a_w = -\frac{b_1}{RT} \exp(-b_2 M_e)$
Chen and Clayton	$\ln a_w = -b_1 T^{b_2} \exp(-b_3 T^{b_2} M_e)$
Iglesias and Chirife	$\ln a_w = -\exp[(b_1 T + b_2) M_e^{b_3}]$
Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)	$M_e = \frac{M_g C K a_w}{[(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)]}$
<p>M_e, Contenido de humedad de equilibrio del producto, M_{mon} es el contenido de la humedad en la monocapa; C, constante de Langmuir; M_b es el contenido de humedad en la monocapa BET; B, es la constante de BET que está relacionada con el calor neto de sorción; T, es la temperatura en °K; R, constante universal de los gases; b_1, b_2, b_3 son parámetros constantes; M_g es el contenido de humedad en la monocapa GAB; a_w, es la actividad de agua.</p>	

Fuente: Bejar et al., 2012

En la figura 8 se muestran las isotermas para papas y pasas. Como se puede apreciar en ambas gráficas, la humedad de equilibrio disminuye cuando aumenta la temperatura. La isoterma de las papas presenta un comportamiento de tipo II, en el caso de las pasas presentan un comportamiento de tipo III.

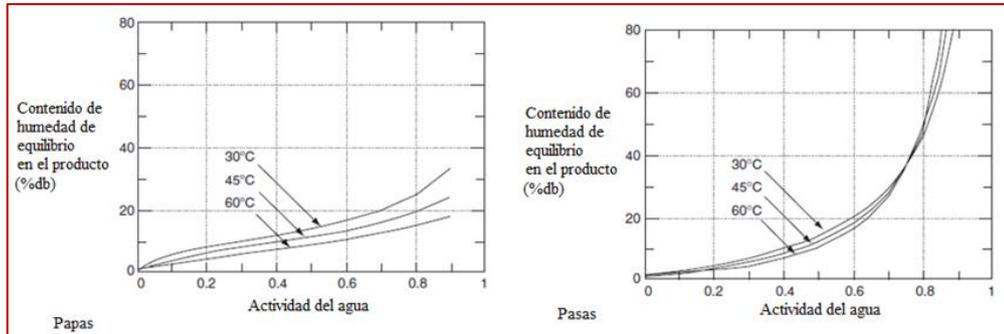


Figura 8. Isotermas de sorción para papas y pasas
Fuente: Kiranoudis et al., 1992

Se determinó un modelo de isoterma de sorción mediante ajuste de curvas para los granos de cacao en Venezuela (Sandoval y Barreiro, 2002). En la figura 9 se muestra la isoterma de sorción para los granos de cacao venezolano, para temperaturas de 25 °C, 30°C y 35°C. Los datos obtenidos se ajustaron a una curva BET para $a_w < 0.5$ y para $a_w \geq 0.5$ se ajustó un modelo de Harkins-Jura.

Muchos trabajos de investigación que han estudiado las isotermas de sorción del cacao determinaron que la estabilidad microbiana del cacao se da para valores de a_w por debajo de 0.7.

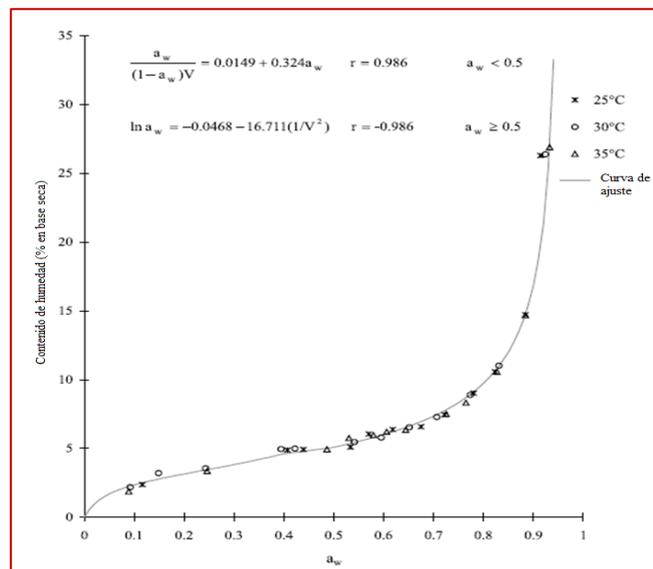


Figura 9. Isotermas de sorción de cacao venezolano.
Fuente: Sandoval y Barreiro, 2002

La ecuación de la humedad de equilibrio, que se va a tomar en cuenta en la modelación matemática de la cámara de secado del presente trabajo se muestra en la ecuación 1.12.

Kanmogne et al., 2012 determinaron la siguiente ecuación de la humedad de equilibrio para el cacao fermentado:

$$a_w = 100 \times \left[1 + \left(\frac{0.1379 - 2.89 \times 10^{-4}T}{M_e} \right)^{2.187} \right]^{-1} \quad (1.12)$$

Donde $T(^{\circ}K)$ es la temperatura del aire desecante. En la figura 10 se muestra las isotermas de sorción para la ecuación 1.12.

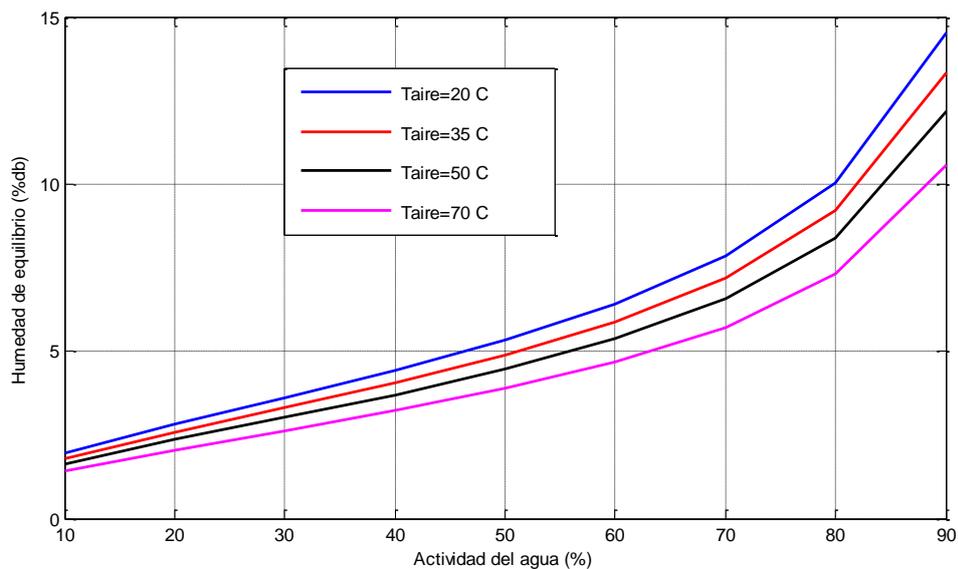


Figura 10. Isotermas de sorción del cacao, que se asumirá para la simulación. Fuente: Kanmogne et al., 2012

1.2.6 Humedad ligada, no ligada y libre

En la figura 11 se puede apreciar una isoterma de sorción, donde se aprecia la humedad no ligada, ligada, libre y de equilibrio.

- **Humedad libre:** Es la cantidad de humedad que se puede retirar del producto por secado y depende de la temperatura y humedad relativa del agente desecante.
- **Humedad no ligada:** Es la diferencia $M_o - MeL$ y representa a la humedad que esta adsorbida (no absorbida) en el producto. Esta humedad está retenida, pero sin interactuar con el producto. Esta es la humedad que llena los capilares grandes y los espacios intercelulares.
- **Humedad ligada:** Es la humedad en el producto correspondiente al equilibrio con el agente desecante saturado.

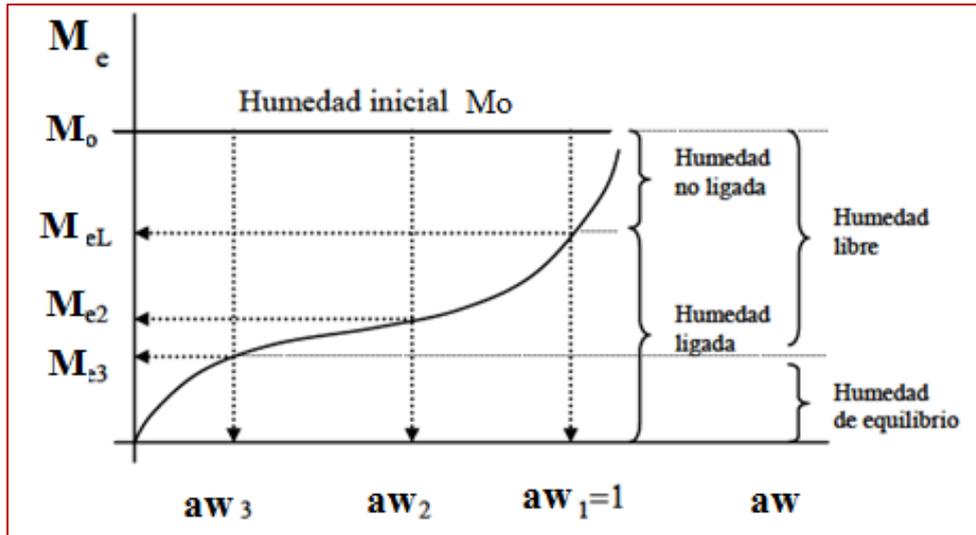


Figura 11. Intervalos de los diferentes tipos de humedades en un producto.
Fuente: Elaboración propia

1.2.7 Cinética de secado

Un parámetro importante en el proceso de secado es la velocidad de secado. La velocidad de secado depende de la temperatura y el contenido de humedad del producto, así como de la temperatura, humedad relativa y velocidad del agente desecante.

1.2.7.1 Difusividad de la humedad

La difusividad de la humedad dentro de un producto se da cuando existe un gradiente de concentración que depende de las características del producto (Strunillo y Kudra, 1986), porque el producto podría ser poroso o no poroso. Así, la estructura del sólido determina el mecanismo por el cual la humedad interna puede fluir.

La difusión de la humedad en productos durante el secado es un proceso complejo que abarca los siguientes procesos: Difusión molecular, Capilaridad del flujo, Flujo Knudsen, Flujo hidrodinámico, Superficie de difusión, y Flujo causado por secuencia de vaporización y condensación. Si se combina todos estos fenómenos en una sola ecuación, la difusividad de humedad se puede definir según la ley de Fick (Crank, 1975) (ecuación 1.13):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \nabla^2 M \quad (1.13)$$

Donde D (m^2/seg) es la difusividad efectiva, M ($kg/kg db$) es el contenido de humedad en el producto, y t es el tiempo. La ecuación 1.13 describe el cambio de humedad por unidad de tiempo dentro del producto. Se puede utilizar para fines de diseño en los casos que el mecanismo de control de secado es la difusión de la humedad.

Pakowski y Mujumdar, 1987 describieron el uso de la ecuación 1.13 para el cálculo de la velocidad de secado, mientras que Strumillo y Kudra, 1986 describieron su uso en el cálculo del tiempo de secado. Las soluciones de la ecuación de Fick (ecuación 1.13) para una variedad de condiciones iniciales y de contorno se describen exhaustivamente por Crank, 1975.

1.2.7.2 Periodos de secado

La figura 12 muestra las curvas de la cinética de secado. Dichas curvas representan el comportamiento típico de un producto cuando pierde humedad.

La figura 12a muestra la pérdida de humedad del producto con respecto al tiempo.

La figura 12b muestra la variación de la velocidad de la pérdida de la humedad (dM/dt) con el contenido de humedad (M). Por último la figura 12c muestra la velocidad de la pérdida de humedad con respecto al tiempo.

Estas curvas muestran que el secado es un proceso continuo donde intervienen tres fases de difusión de humedad ($AB - BC - CD$).

La figura 12c tiene una ventaja porque se puede observar la duración de cada fase de secado. A continuación, se explica lo que ocurre en cada fase de secado (ver figura 14).

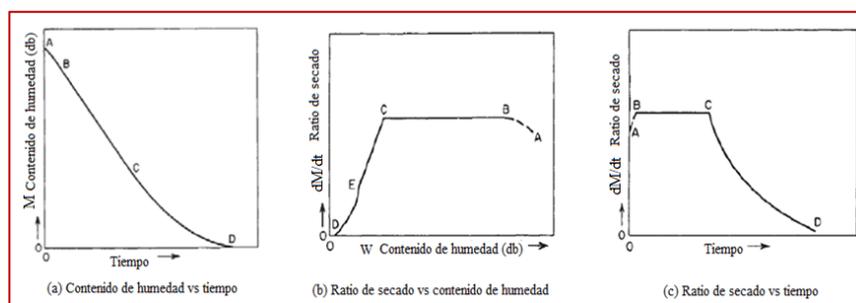


Figura 12. Curvas del periodo de secado de un producto

Fuente: Perry, 2007

- Zona A-B (Periodo de inducción o de velocidad de secado creciente): El producto empieza a calentarse o enfriarse, y crece la velocidad de evaporación. Esto se aprecia porque la masa del producto disminuye rápidamente. Eventualmente, el calor penetra hasta el centro del producto y la velocidad se hace máxima. Se produce una adaptación del material a las condiciones de secado.
- Zona B-C (Periodo de velocidad de secado constante): La velocidad de secado es constante y máxima produciéndose exclusivamente la evaporación de la humedad superficial del producto (humedad no ligada). La velocidad de secado es máxima porque los mecanismos de transporte de agua desde el interior del sólido a la superficie son

lo suficientemente rápidos para compensar la evaporación. La superficie del material se mantiene constantemente mojada y se comporta como una masa de líquido. La eliminación de la humedad depende, principalmente, de las condiciones del agente desecante y es independiente de la naturaleza del producto.

- Zona C-D-E (Periodo de velocidad de secado decreciente): Cuando la humedad desciende por debajo de un nivel determinado, denominado humedad crítica M_C ya no llega suficiente agua a la superficie para mantener la máxima evaporación. Se elimina la humedad interna del producto (humedad ligada). Esta fase depende básicamente de la difusión de la humedad del interior del producto hacia la superficie, así como de la evaporación superficial. El sólido aumenta de temperatura y la velocidad de secado desciende tendiendo a hacerse cero conforme nos acercamos a la humedad de equilibrio. La zona D representa un fenómeno que a veces tiene lugar y que consiste en que el secado de la superficie provoca una detención de la pérdida de agua hasta que sube la temperatura lo suficiente como para compensar esta nueva resistencia a la transferencia de materia.

1.2.7.3 Ecuación de secado

La ecuación 1.13 describe completamente la cinética de secado. Sin embargo, en la literatura (principalmente para productos agroindustriales) la ecuación de la cinética de secado se define como (Lewis, 1921) (ecuación 1.14):

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_e) \quad (1.14)$$

Donde M , es el contenido de humedad en base seca del producto, $K(\text{seg}^{-1}, \text{hr}^{-1})$, es la constante de secado que unifica todos los fenómenos de transporte mencionados en el apartado 1.2.7.1; M_e es la humedad de equilibrio del producto.

La ecuación 1.14 descrita por Lewis, 1921 describió que la tasa de cambio de la humedad en un producto higroscópico poroso es proporcional a la diferencia instantánea entre el contenido de humedad del producto y la humedad de equilibrio con el agente desecante.

Además, se asume que la capa del producto es delgada y la velocidad del aire es alta por lo que las condiciones del agente desecante (temperatura y humedad relativa) se mantienen constantes en todo el producto.

La constante K de secado es la cantidad más determinante. Porque dicha constante de secado encarna todas las propiedades de transporte en una función exponencial simple, que es la solución de la ecuación 1.14 en condiciones de aire constantes. Por otra parte, las ecuaciones clásicas diferenciales parciales (ecuación 1.13), que describen analíticamente los cuatro fenómenos de transporte que prevalecen durante el secado requieren una gran cantidad de tiempo para su solución numérica y por lo tanto no son atractivos para los cálculos iterativos.

En la tabla 3 se presentan algunas fórmulas que describen los efectos de la temperatura, actividad del agua, diámetro del producto sobre la constante de secado. Las ecuaciones $T3a$, $T3b$ y $T3c$ son ecuaciones de tipo Arrhenius, que solamente tienen en cuenta el efecto de la temperatura. Las ecuaciones $T3c$, $T3d$, $T3e$ y $T3f$ toman en cuenta el efecto de la actividad del agua y la temperatura. La ecuación $T3g$ solamente toma en cuenta el efecto la velocidad del agente desecante, y la ecuación $T3h$ se toma en cuenta todos los efectos.

1.2.8 Clasificación de secadores

Todos los sistemas de secado tienen muchas clasificaciones dependiendo de ciertos parámetros (método de secado, mecanismo de transferencia de calor, medio de secado, medio de calentamiento, fuente de calor y según temperatura de operación) (Nikolopoulos et al., 2015). Dependiendo de la temperatura de funcionamiento los sistemas de secado se pueden clasificar en secadores de alta temperatura y de baja temperatura (Ekechukwu y Norton, 1999).

Los secadores de alta temperatura son necesarios cuando se requiere un secado muy rápido, de manera que el producto a secar permanece un corto periodo de tiempo en contacto con el agente desecante, porque un alto tiempo de exposición del agente desecante con el producto provocará un exceso de secado. Los productos solo se secan hasta el contenido de humedad requerido y luego se enfrían. Estos secadores se pueden clasificar en secadores de flujo continuo o discontinuo (Brooker et al., 1974).

En los secadores de baja temperatura, el agente desecante está en equilibrio con el contenido de humedad del producto. Por esta razón, estos secadores no toleran la entrada de calor intermitente o variable. En este tipo de secadores el producto puede ser almacenado y al mismo tiempo secado. Es el más adecuado para aplicación de energía solar (Ekechukwu y Norton, 1999).

En la figura 13 se muestra un secador de alta temperatura de tipo rotativo y en la figura 14 se muestra un secador de baja temperatura de tipo solar.

Tabla 3.- Efecto de varios factores en la constante de secado

Ecuación No.	Productos	Ecuación
T3a	Granos, cebada y muchos productos agrícolas tropicales	$K(T) = b_0 \exp[-b_1/T]$
T3b	Cebada, trigo	$K(T) = b_0 \exp[-b_1/(b_2 + b_3T)]$
T3c	Melón	$K(a_w, T) = b_0 \exp[-(b_1 + b_2 a_w)/T]$
T3d	Maíz	$K(a_w, T) = b_0 \exp(-b_1 a_w) \exp[-b_2/(b_3 + b_4 T)]$
T3e	Arroz	$K(a_w, T) = b_0 + b_1 T - b_2 a_w$
T3f	Trigo	$K(a_w, T) = b_0 + b_1 T^2 - b_2 a_w$
T3g	Zanahoria	$K(u) = \exp(-b_1 + b_2 \ln u)$
T3h	Papas, cebollas, pimiento	$K(a_w, T, d, u) = b_0 a_w^{b_1} T^{b_2} d^{b_3} u^{b_4}$

Donde K , constante de secado; T , temperatura del agente desecante, a_w , actividad del agua; d , diámetro del producto; b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 son parámetros.

Fuente: Westerman et al., 1973

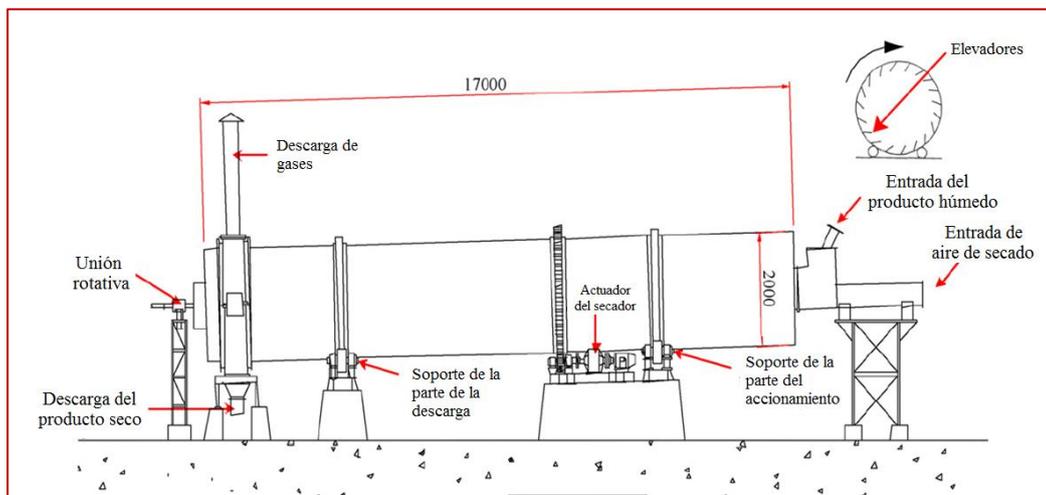


Figura 13. Secador de alta temperatura rotativo

Fuente: Luz et al., 2010

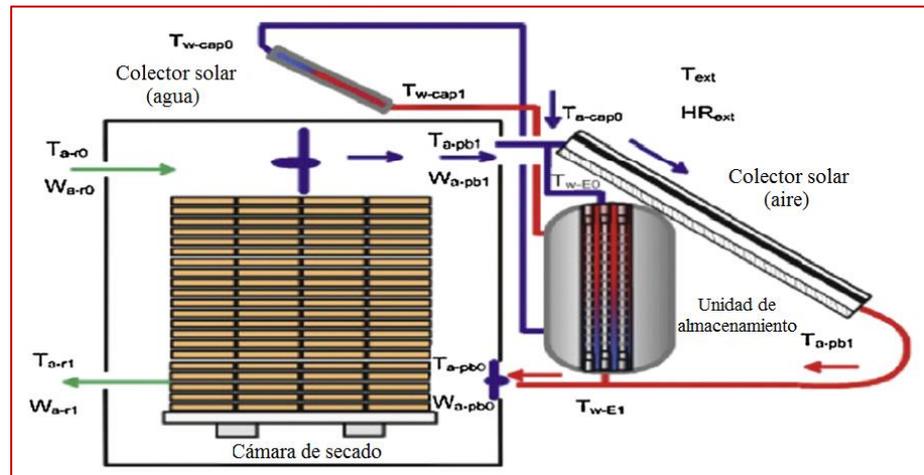


Figura 14. Secador de baja temperatura de tipo solar
Fuente: Raman et al., 2012

Los secadores se clasifican comúnmente desde el punto de vista de la fuente de calor en secadores de combustibles fósiles (secadores convencionales) y secadores de energía solar. Generalmente, todos los secadores de alta temperatura utilizan como fuente de calor combustible fósil, mientras que los de baja temperatura pueden utilizar combustibles fósiles o energía solar (Ekechukwu y Norton, 1999). En la figura 15 se muestra la clasificación de los sistemas de secado.

1.3 Secadores solares

1.3.1 Introducción

El secado solar utiliza como fuente de energía única o parcial la radiación solar. Desde la antigüedad, la humanidad ha utilizado la energía solar para secar y conservar productos, en un principio este proceso se hacía exponiendo directamente el producto al sol. El uso de la energía solar disminuye el costo de energía y las emisiones de CO₂. Además, la energía solar es renovable y puede servir como fuente de energía sostenible. Muy pronto, conforme avance la ciencia, la energía solar se convertirá en una parte muy importante de la energía en el futuro frente a la cada vez más escasa energía del combustible fósil. La desventaja principal del secado solar es que depende de muchos factores externos no controlables, como la radiación solar, la temperatura del ambiente, la velocidad del viento y la humedad relativa del aire. Es por esto que se debe explorar geográficamente los lugares de alta densidad de energía solar para luego hacer un adecuado diseño (Xie et al., 2011). Además de esto depende de las características propias del producto como contenido inicial de humedad, propiedades físicas y de la superficie expuesta al agente desecante (Jain y Tiwari, 2003).

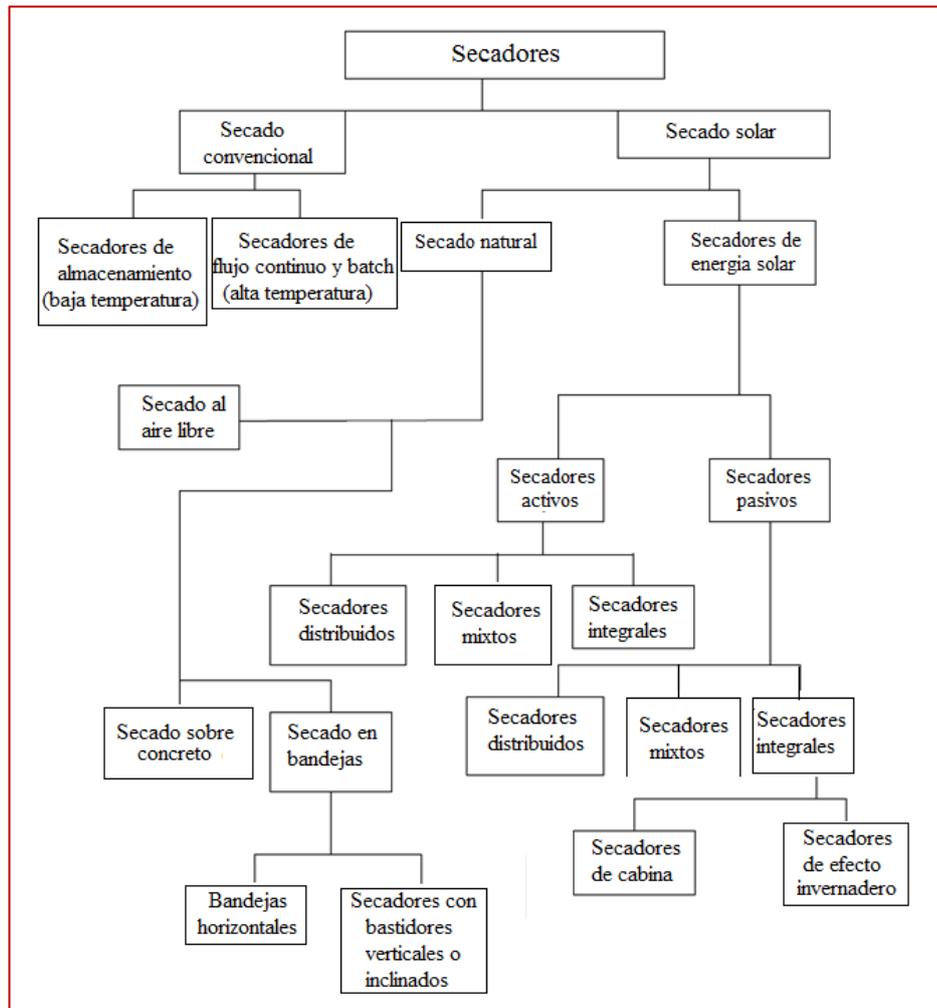


Figura 15. Clasificación de los secadores

Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

La exposición directa al sol es un método muy simple de secado, donde no se puede controlar las variables meteorológicas que influyen en el proceso de secado y por lo tanto, no se produce un secado homogéneo de los productos. Esto hace que el secado directo al sol sea intermitente (no hay radiación en las noches), esto puede ser solucionado mediante un sistema de almacenamiento de energía (almacenar carga térmica en las mañanas y usar esta energía almacenada en las noches) (Bal et al., 2010).

Otro inconveniente del secado directo al sol es la exposición del producto a muchos factores que bajan su calidad (radiación directa al sol, exposición al polvo y microorganismos). Por ejemplo en días de alta temperatura, la exposición directa al sol podría causar el endurecimiento y deterioro del producto. Algunas de estas desventajas pueden ser solucionadas con secadores solares de tipo indirectos, donde el aire se calienta pasando a través de un colector solar para luego ingresar a una cámara de secado (Jain y Tiwari, 2003).

Los secadores solares tienen menos costos de operación con respecto a los secadores convencionales, siendo una alternativa económicamente viable para aplicaciones de secado (Ferreira et al., 2008).

El uso de la energía solar en un proceso de secado de productos agrícolas puede resultar en una reducción en el consumo de energía entre 27% y 80%, dependiendo del tipo de secador y las condiciones meteorológicas (Ekechukwu y Norton, 1999).

La optimización del coste relacionado a la utilización de secadores solares requiere un análisis de la radiación solar local, la temperatura y la humedad relativa del aire. El periodo de secado óptimo es de 8 horas para el secado con temperaturas de operación entre 30 °C y 70 °C (Radajewski et al., 1990).

Por lo tanto, el secado solar implica un proceso de estudio e investigación adecuado de las características del producto y a la zona geográfica en cuestión. De esta manera se podrá obtener menores tiempos de secado y una mejor calidad del producto.

En este apartado, se describe la tecnología del secado solar. Luego el principio de funcionamiento de un secador solar, su clasificación, descripción de secadores solares y por último los criterios de selección de secadores solares.

1.3.2 Clasificación de los secadores solares

Los secadores solares se pueden clasificar de muchas maneras. Como se puede apreciar en la figura 15, los sistemas de secado solar se pueden clasificar primeramente de acuerdo a los métodos de transferencia de calor y la manera en que se utiliza el calor. En términos generales se pueden clasificar en dos grupos:

- Sistemas de secado solar activos (La mayoría de secadores de este tipo se llaman secadores híbridos).
- Sistemas de secado solar pasivos (Normalmente denominados sistemas de secado solar por circulación de aire caliente).

Los secadores solares activos o pasivos se subdividen según la disposición de diseño de los componentes del sistema y el modo de la utilización del calor en:

- Secadores solares de tipo integral o directo.
- Secadores solares de tipo distributivo o indirecto.
- Secadores solares de modo mixto o híbrido.

Las principales características de los diseños típicos de las distintas clases de secadores de energía solar se ilustran en la figura 16, que muestra tres grupos principales de secadores solares en base a las fuentes de energía utilizadas (Leon et al., 2002). La selección de un secador solar para un producto depende de la cantidad, calidad, características del producto, y de las fuentes de energía utilizadas. Debido a esto, hasta la fecha se han desarrollado varios tipos de secadores solares.

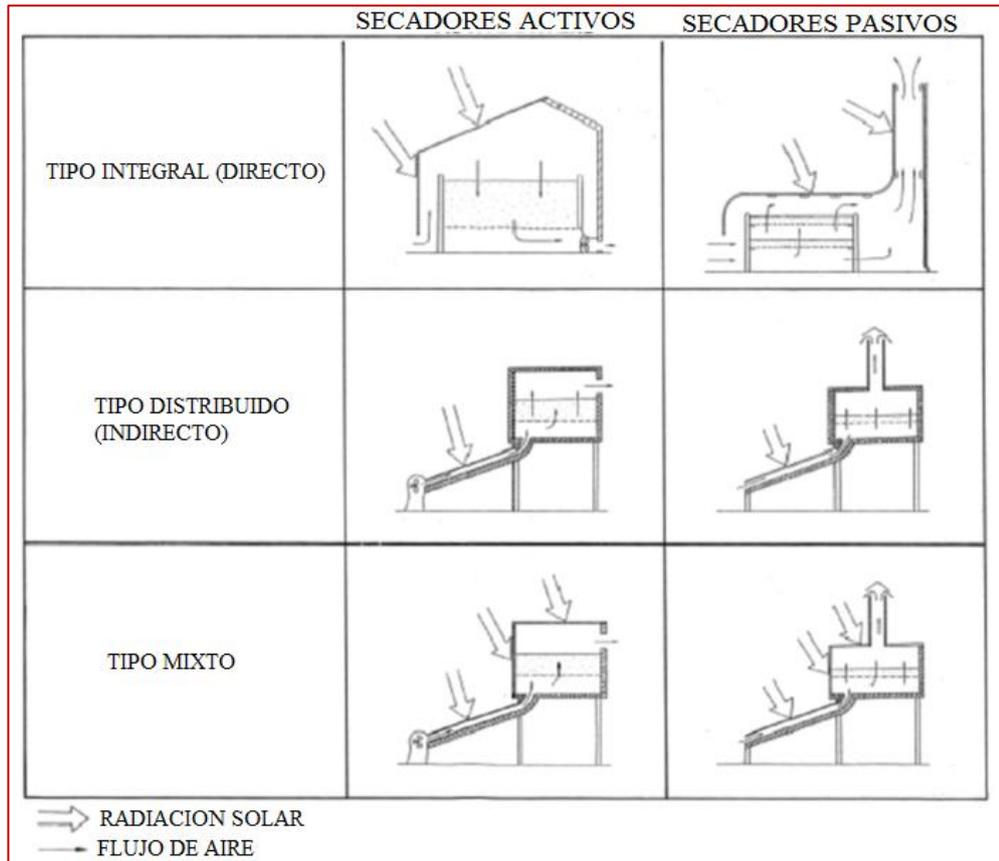


Figura 16. Tipos de secadores solares
Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

1.3.3 Principios de funcionamiento de los secadores solares

Los secadores solares se pueden clasificar en secadores directos, indirectos e híbridos. El principio de funcionamiento de estos secadores depende, principalmente, del método de la colección de la energía solar y su conversión en energía térmica útil para el secado.

1.3.3.1 Secado al sol

En la figura 17 se muestra el principio de funcionamiento del secado solar al sol. Generalmente, los productos se extienden en el suelo, donde reciben la radiación solar y son sometidos a convección natural. Una parte de la energía solar se refleja de nuevo y la parte restante es absorbida por la superficie. Una parte de la energía solar absorbida se transforma en energía térmica para calentar los productos. Sin embargo, se generan pérdidas de longitud de onda larga de la superficie del producto al aire ambiente a través del aire húmedo y al mismo tiempo pérdidas de calor por convección debido al viento que sopla por medio del aire húmedo sobre la superficie del producto.

Este método de secado es barato y tiene muchas limitaciones porque depende estrictamente de la radiación solar. Por esta razón, este método de secado no cumple con los estándares de calidad requeridos y, a

veces los productos no se pueden vender en el mercado internacional (Sharma et al., 2009).

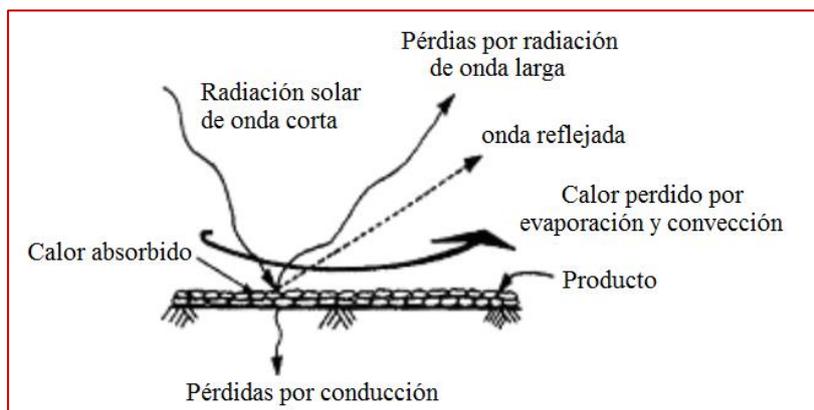


Figura 17. Principios de funcionamiento del secado al sol
Fuente: Sharma et al., 2009

1.3.3.2 Secado solar directo

En la figura 18 se muestra el principio de funcionamiento del secado solar directo o también conocido como secador solar de gabinete. Aquí la humedad es transportada por el aire que ingresa desde abajo del gabinete y sale a través de la salida en la parte superior.

En este tipo de secador, una parte de la radiación que incide sobre la cubierta de vidrio se refleja de nuevo a la atmosfera y la restante se transmite dentro del gabinete. Una parte de la radiación transmitida se refleja desde la superficie de los productos. La parte restante de la radiación transmitida es absorbida por la superficie del producto. Esto causa que la temperatura del producto aumente y emita radiaciones de longitud de onda larga que no pueden escapar a la atmosfera debido a la cubierta de vidrio. Este fenómeno causa que la temperatura en el interior del gabinete aumente.

La cubierta de vidrio es importante porque reduce las pérdidas convectivas directas al ambiente, siendo más beneficioso para el aumento de la temperatura de los productos y del gabinete.

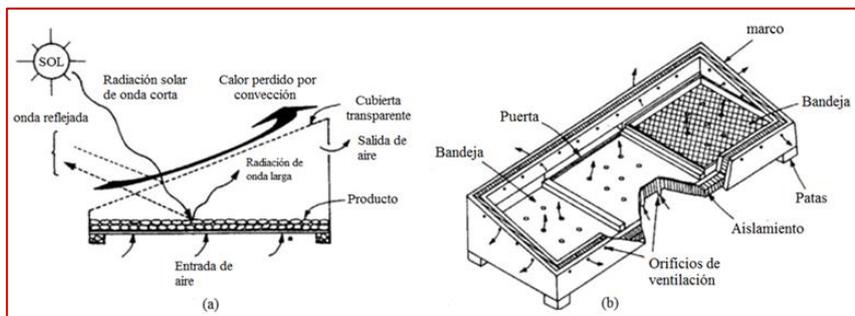


Figura 18. Principios de funcionamiento y partes de un secador solar directo típico
Fuente: Sharma et al., 2009

Las ventajas del secador solar directo son:

- Es simple y más barato de construir, en comparación de los secadores de tipo indirecto.
- Ofrece un ambiente de protección a los productos.

Las desventajas del secador solar directo son:

- Debido al exceso de calor, puede causar daños en los cultivos.
- La tasa de disipación del vapor de agua es baja, lo que conduce a velocidades de secado relativamente bajas.
- Su utilidad está limitada a pequeñas cantidades de producto.
- Podría producirse decoloración de los productos debido a la exposición directa al sol.
- La condensación de la humedad en la cubierta de vidrio, reduce su transmisibilidad, disminuyendo la eficiencia del secador.
- Podría darse que la disipación de la humedad se vea afectada por el aumento insuficiente de la temperatura del producto.

1.3.3.3 Secado solar indirecto

En la figura 19 se describe el principio de funcionamiento de un secador solar indirecto. Este tipo de secador está compuesto por dos sistemas un colector solar, donde se calienta el aire, y una cámara de secado, donde los productos están ubicados en bandejas y donde se produce el proceso de secado.

El aire caliente fluye a través o sobre la superficie del producto, con el objetivo de transferirle calor (por convección entre el aire caliente y el producto húmedo) para evaporar la humedad en el producto. El secado se lleva a cabo debido a la diferencia en el contenido de humedad entre el aire caliente y el aire en las proximidades de la superficie del producto.

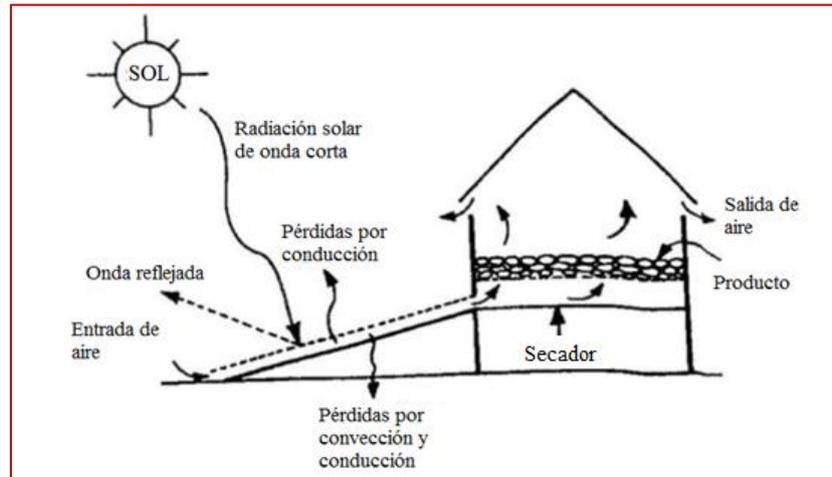


Figura 19. Principios de funcionamiento y partes de un secador indirecto

Fuente: Sharma et al., 2009

Las ventajas del secador solar indirecto son:

- Se controla mejor el proceso de secado y el producto es de mejor calidad, comparado con los otros tipos de secadores (secado al sol y secado solar directo).
- No se producen daños físicos por radiación solar en los productos.
- Muy recomendable para los productos fotosensibles.
- Es más eficiente que el secado solar directo.

Las desventajas del secador solar indirecto son:

- Son relativamente caros, en comparación con el secador solar directo.
- Su mantenimiento es más costoso con respecto al secador solar indirecto.

1.3.3.4 Secado solar mixto o híbrido

Los secadores solares mixtos o híbridos, combinan las características de los secadores solares directos e indirectos. En este tipo de secadores el producto es expuesto directamente a la radiación solar y al mismo tiempo fluye sobre su superficie aire precalentado en un colector solar.

El secado del producto se da por la transferencia de calor por radiación (el producto está expuesto a la radiación solar) y convección (entre el aire caliente y el producto húmedo).

1.3.4 Tipos de secadores solares

Los secadores solares, generalmente, se pueden clasificar en dos grandes categorías: secadores solares activos y pasivos (ver figura 16). En los secadores solares pasivos, los productos se secan por radiación solar directa con o sin circulación de aire natural, y en los secadores solares activos, el aire de secado se hace circular por medio de un ventilador (convección forzada).

1.3.4.1 Secadores solares pasivos

En un secador solar pasivo o de convección natural, el aire desecante circula de forma natural, debido a la fuerza de flotación provocada por la diferencia de temperatura en diferentes partes del fluido, o como resultado de la presión del viento o combinación de ambos.

Los secadores pasivos pueden ser de gabinete y de efecto invernadero. Los secadores pasivos son muy empleados en muchas zonas tropicales y subtropicales, especialmente en pequeñas comunidades agrícolas, África y Asia. Son primitivos, de bajo costo de construcción, fáciles de instalar y de operar, especialmente en sitios donde no hay red eléctrica. Los secadores pasivos son los más adecuados para el secado de pequeñas cantidades de frutas y verduras (Hughes y Oates, 2011).

a. Secadores solares indirectos pasivos

En este tipo de secadores, los productos se encuentran en bandejas en el interior de una cámara de secado y se deshidratan por medio de la circulación de aire precalentado en un colector solar.

Se produce el efecto chimenea, el cual aumenta el flujo vertical de aire como resultado de la diferencia de densidad del aire en la cámara y en el ambiente. Debido a que la radiación incidente solo se usa para calentar el flujo de aire en el colector, el producto no sufre daños por radiación. Estos secadores se recomiendan para productos en donde su contenido en vitaminas se ve reducido por la exposición directa al sol.

Los secadores solares indirectos pasivos tienen temperaturas de funcionamiento más altas que los secadores directos y que los de secado al sol y pueden producir productos de mayor calidad. Sin embargo, uno de sus inconvenientes son las fluctuaciones de la temperatura del aire a la salida del colector. Lo que hace difícil mantener las condiciones de funcionamiento constantes dentro de la cámara de secado.

A pesar de las fluctuaciones a la entrada de la cámara de secado, este tipo de secadores tiene una inherente tendencia hacia la mayor eficiencia, porque las unidades que lo componen pueden ser diseñadas para una óptima eficiencia. Se requiere mayor costo para su construcción y mantenimiento (Sharma et al., 2009). Un secador

solar indirecto pasivo típico (figura 20) se compone de un colector solar, una cámara de secado y una chimenea.

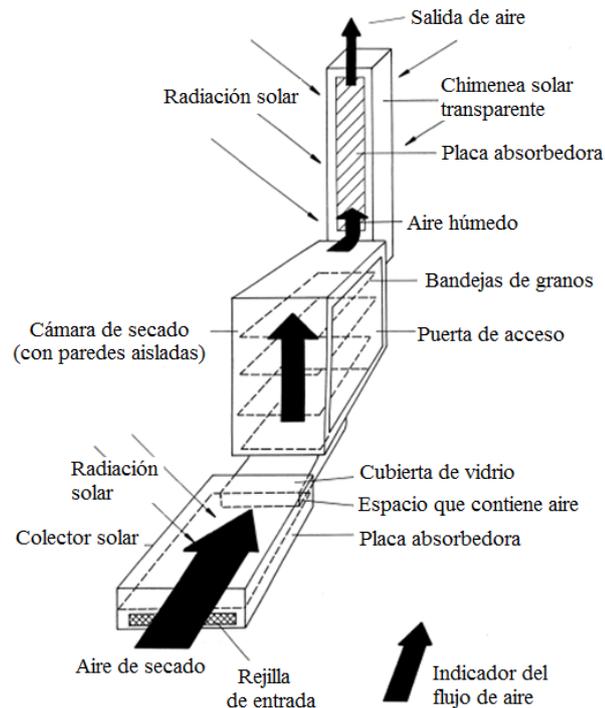


Figura 20. Secador solar indirecto pasivo

Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

Se han construido muchos secadores solares indirectos pasivos (Sharma et al., 2009). Con el objetivo de mejorar la eficiencia de los secadores solares indirectos pasivos, se han implementado muchos adelantos en los aspectos constructivos de los colectores solares y en la circulación del aire. Sin embargo, se ha prestado poca atención en el mejoramiento de la cámara de secado. Las cámaras de secado, por lo general, se construyen a partir de materiales de madera (a veces sin aislamiento adicional) por lo que son susceptibles a daños por desgaste.

La figura 21 muestra un secador solar indirecto para maíz (Ekechukwu y Norton, 1999). El secador consiste en un colector solar de una sola cubierta de vidrio, con una sola placa absorbedora de $1m^2$ y un espacio de aire de $5cm$. El colector de aire se conecta a una cámara de secado aislada equipada con una chimenea. La cámara de secado fue construida con madera prensada.

Para mejorar la eficiencia del colector se modificó el espacio de aire a 15 cm . Este secador es capaz de secar 90 kg de maíz de un contenido de humedad inicial de 20% a 12% db en aproximadamente 3 días con alta radiación solar.

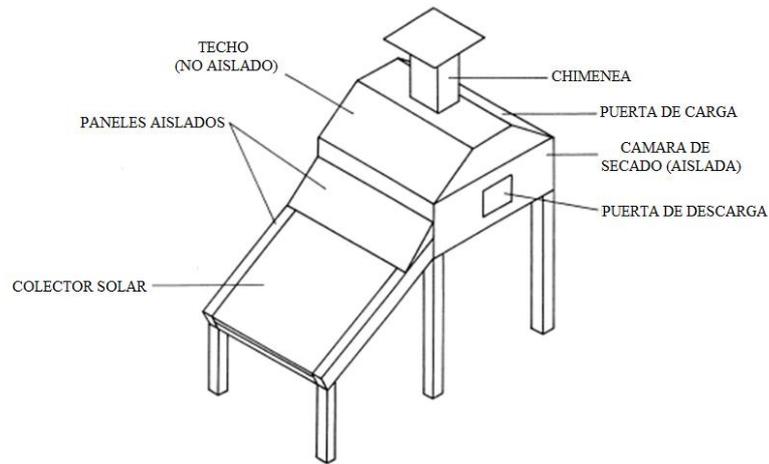


Figura 21. Secador solar indirecto pasivo para maíz
Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

b. Secadores solares directos pasivos

El producto se coloca en una cámara de secado con paredes transparentes para que la radiación solar sea la adecuada para el secado del producto. El calor extrae la humedad del producto y disminuye la humedad relativa del aire desecante, de esta forma aumenta la capacidad de transporte de humedad en el secado del producto. Las partes de un secador solar directo pasivo se muestran en la figura 22.

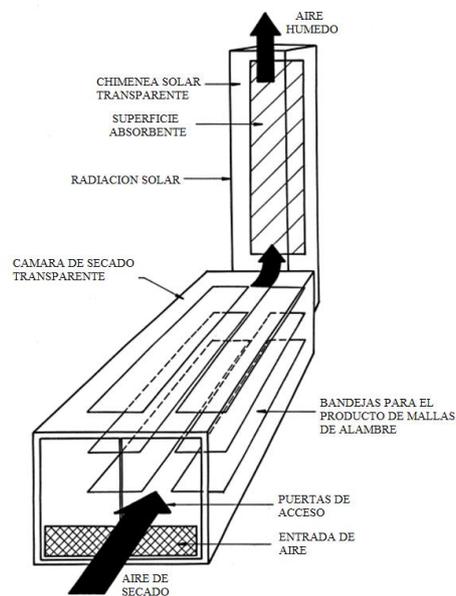


Figura 22. Secador solar directo pasivo
Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

La exposición directa a la radiación solar aumenta la maduración de algunos productos, mejorando de esta manera sus características físicas como el color.

Este tipo de secador es más barato, porque no requieren de un colector solar. Sin embargo, las desventajas más importantes son las siguientes: podría provocar daños por radiación en los productos y las velocidades de secado, en general, son relativamente bajas debido a la baja velocidad de eliminación del vapor (Ekechukwu y Norton, 1999). Para mejorar este inconveniente se podría implementar una chimenea y de esta forma mejorar la flotabilidad de la corriente de aire, para proporcionar una mayor velocidad de aire, y por tanto una mayor velocidad de eliminación de humedad. Hay dos tipos de secadores en este grupo: secador solar pasivo de gabinete y secador de efecto invernadero.

Los secadores solares directos pasivos de gabinete son, generalmente, simples y de bajo costo que tienen muchas aplicaciones para usos domésticos.

Son muy adecuados para el secado de productos agrícolas, especias y hierbas, etc. Construidos normalmente para una área de secado de $1.2 m^2$ y capacidades de secado entre 10 kg a 20 kg. La figura 23 muestra un secador solar directo pasivo de gabinete.

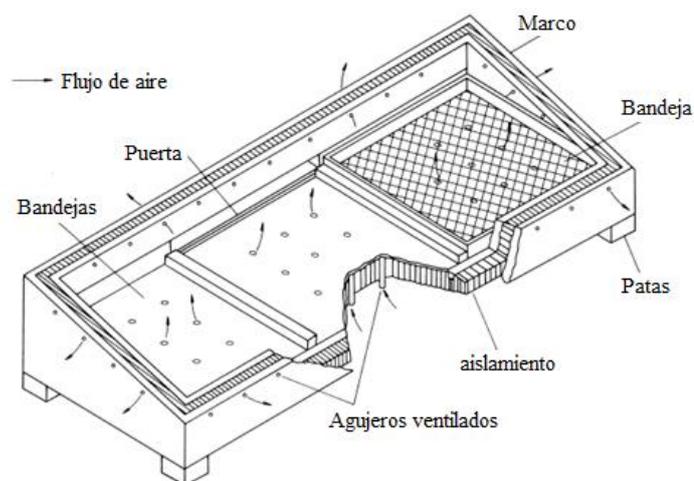


Figura 23. Secador solar directo pasivo de gabinete
Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

Se han construido muchos secadores solares de gabinetes. En la figura 24 se muestra una modificación en el diseño típico de un secador solar de gabinete. Una de las modificaciones fue, la implementación de una chimenea a la salida de la cámara de secado con el objetivo de mejorar la circulación natural del aire precalentado, aumentando de esta manera la velocidad del secado.

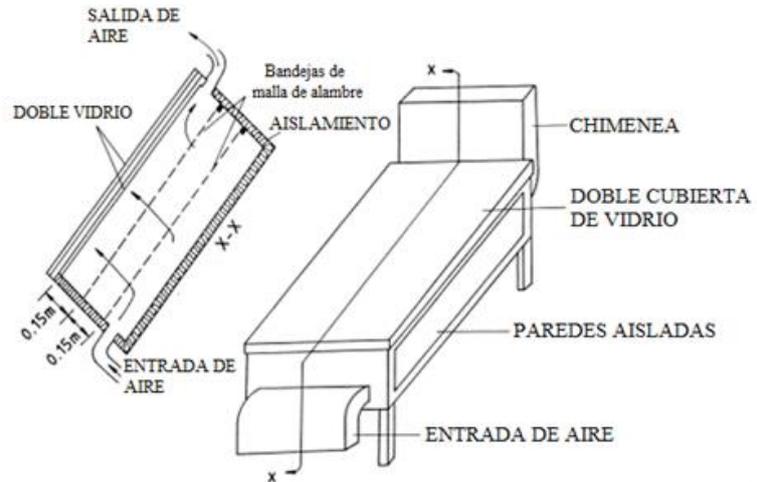


Figura 24. Modificación del secador solar de gabinete
Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

Los secadores de efecto invernadero son llamados secadores de carpas. Son diseñados con orificios de ventilación con un tamaño y una posición adecuada para que el flujo de aire de secado sea controlado.

c. Secadores solares mixtos pasivos

Un secador solar mixto pasivo combina las características estructurales de un secador de tipo directo e indirecto (es decir, un colector solar de aire, una cámara de secado y una chimenea), además tiene paredes de vidrio para que la radiación solar incida directamente sobre el producto como en los secadores de tipo directo. En la figura 25 se muestra la estructura de un secador solar mixto pasivo.

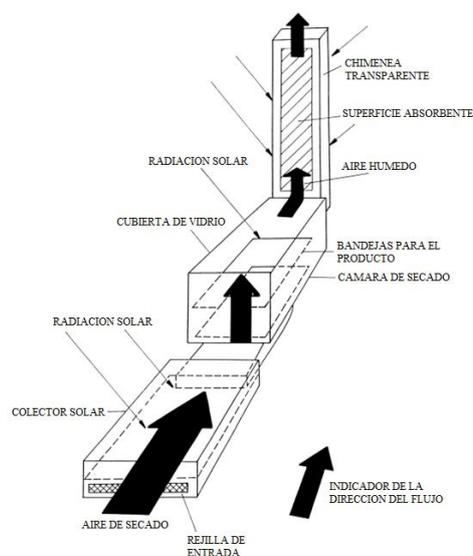


Figura 25. Secador solar mixto pasivo
Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

1.3.4.2 Secadores solares activos

Los sistemas de secado solar activos, están compuestos por bombas o ventiladores, para transportar la energía solar en forma de aire caliente a la cámara de secado. Por lo tanto, todos los secadores solares activos son de convección forzada. Un secador solar activo típico depende de la energía solar sólo para la transferencia de calor entre el aire desecante y el producto, mientras que para la circulación del aire utiliza ventiladores. Este tipo de secadores, son muy adecuados para el secado de productos con más altos contenidos de humedad.

a. Secadores solares indirectos activos

Los secadores solares indirectos activos están compuestos de un colector solar de aire, una cámara de secado y un ventilador para la circulación del aire.

Variando la velocidad del flujo del aire, se puede obtener fácilmente temperaturas de secado más altas en el colector. Sin embargo, la eficiencia del colector disminuye ante un aumento de la temperatura de secado. La figura 26 muestra un secador solar indirecto activo típico.

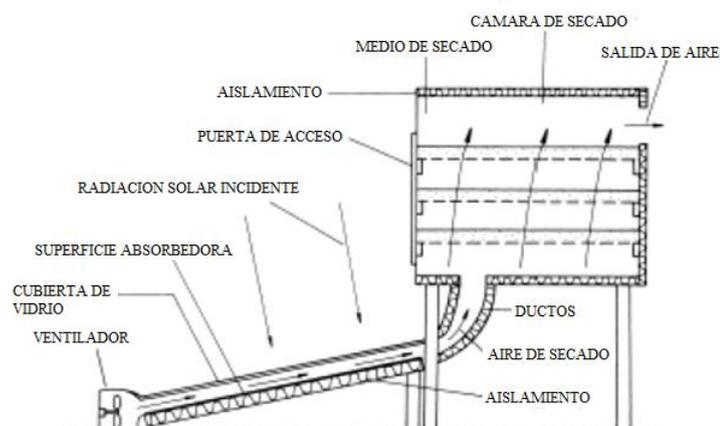


Figura 26. Secador solar indirecto activo

Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

b. Secadores solares directos activos

En los secadores solares directos activos, la absorción de la radiación solar se lleva a cabo en la propia cámara de secado. A su vez, pueden ser secadores de absorción directa sobre el producto, secadores con pared o cubierta colectora y secadores tipo invernadero con cámara de absorción interna. En la figura 27 se muestra un diseño típico de secadores solares directos activos.

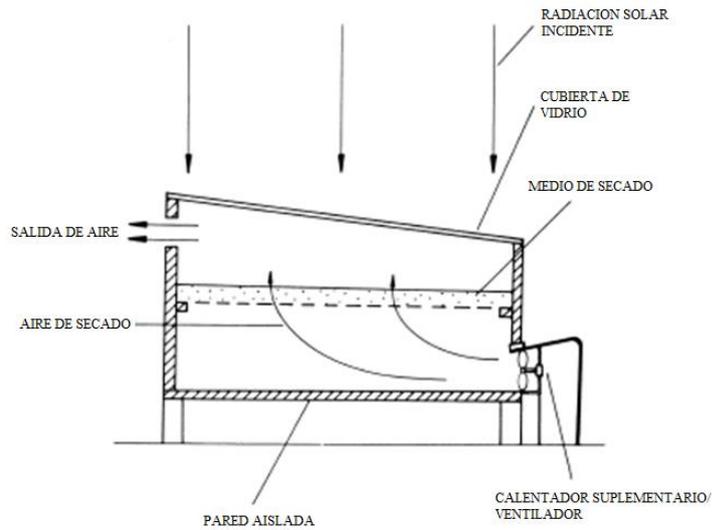


Figura 27. Secador solar directo activo
Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

c. Secadores solares mixtos activos

Los secadores solares mixtos activos combinan las características de los secadores indirectos y directos activos. La figura 28, muestra las características de un secador mixto activo típico.

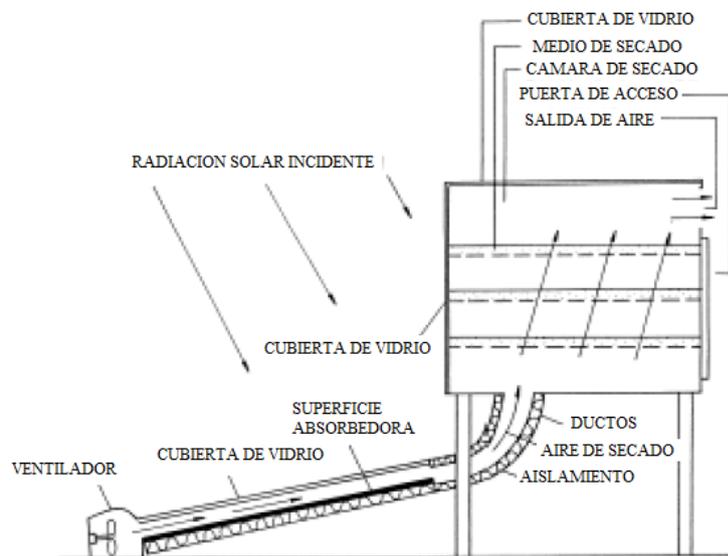


Figura 28. Secador solar mixto activo
Fuente: Ekechukwu y Norton, 1999

Capítulo 2

El proceso de secado de cacao

2.1 Introducción

Como se sabe, el secado es una etapa en la que se elimina el exceso de humedad de los granos por calentamiento y se completa la formación del aroma y sabor a chocolate. Al finalizar la fermentación, la humedad del cacao es de aproximadamente 55%. Luego sigue el proceso de secado, donde la humedad del cacao es reducida hasta un valor próximo a 8% para evitar el desarrollo de mohos que deterioran la calidad y para facilitar el almacenamiento, transporte, manejo y comercialización del cacao. Es recomendable reducir la humedad hasta valores del 6 a 7%, máximo 8%, ya que si se reduce demasiado los granos se vuelven frágiles y quebradizos, en caso contrario existe el riesgo del crecimiento de hongos al almacenar el grano.

El tiempo de secado es de alrededor de una semana. La humedad del grano debe descender lentamente debido a que la fase oxidativa de la fermentación continua, por lo que juega un papel importante en la disminución de la astringencia, amargor y acidez del grano, así como en el desarrollo del color marrón a partir de los compuestos fenólicos, lo que ocurre solamente en esta etapa (Hii et al., 2008).

Diversos estudios se han llevado a cabo para mejorar la calidad de los granos de cacao en los procesos de fermentación y secado. En el caso del secado, se han realizado muchos estudios en el secado natural, solar y convencional (artificial) (Oke y Omotayo, 2011; Hii et al., 2008; Bonaparte et al., 1998).

El secado natural, consiste en la exposición al sol en plataformas de cemento, donde se colocan los granos y se extienden uniformemente, removiendo la masa regularmente con un rastrillo de madera. Es el método de secado más conocido para producir granos de buena calidad debido a la condición de secado lento que permite el desarrollo del sabor y el bajo contenido de acidez que es ideal para la fabricación del chocolate (Ekechukwu y Norton, 1997).

Para determinar el contenido de humedad se realizan en forma técnica y práctica. En forma técnica, haciendo uso del medidor de humedad de granos. En forma práctica, cuando a la presión de los dedos los granos se rompen y descascaran fácilmente.

2.2 El origen del cacao

El cacao es el fruto originario de América del Sur, apareció por primera vez en la región amazónica Orinoquia (Colombia), aproximadamente hace unos 4000 años, se argumenta que la expansión del cacao al resto del continente americano se llevó a cabo por el ser humano, los animales y otros factores meteorológicos.

Se sabe que los primeros árboles de cacao aparecieron en tierras tropicales del Continente Americano en donde las tribus de los Mayas y los Aztecas lo usaban como medicina natural y sus médicos lo recetaban como relajante y estimulante, principalmente la manteca de cacao la usaban como reconstituyente. Las tribus también usaban al cacao como bebida o moneda de intercambio, sorprendentemente, el consumo actual del chocolate en Latinoamérica es prácticamente atractivo en las estadísticas internacionales. (Prabhakaran, 2010).

La producción del cacao tiene una distribución en cada uno de los puntos de Latinoamérica, teniendo el 55%, en América Central y del Sur con el 36%. El porcentaje restante se cultiva en Asia y Oceanía (Prabhakaran, 2010).

2.3 Panorámica mundial del cacao

El cacao es uno de los productos con mayor presencia en los mercados internacionales, si bien la extracción del mismo no sale en un 90% de Latinoamérica, es en este lugar donde se encuentran todas las variedades de cacao conocidas, que luego de muchas investigaciones se han determinado que son 13 y no tan sólo el "criollo", "forastero" o "trinitario"(Prabhakaran, 2010). Este grandioso producto gracias a su apreciado sabor, valores nutritivos y diversas aplicaciones y usos se ha convertido en un reconocido y deseado producto, tanto como para convertirlo en uno de los principales productos en el sector de las materias primas en el mercado internacional.

2.3.1 Organizaciones

En el mundo existen organizaciones dedicadas al mercado, investigación, industrialización y comercio del grano del cacao y de sus derivados.

En cuanto al mercado se encuentran procesadores, industriales, exportadores, comercializadoras, asistencia técnica, control, promoción y vigilancia. A nivel internacional con sede en Nigeria esta la asociación de productores de cacao "Cocoa Producers Alliance", en esta asociación hacen parte 13 organismos gubernamentales.

La organización Internacional del Cacao ICCO, es la organización más importante a nivel mundial.

2.3.2 Oferta de cacao

Por el momento, los principales países exportadores de cacao en el mundo son: Costa de Marfil, Ghana, Indonesia, Nigeria, Camerún, Ecuador, Brasil, República Dominicana, Perú, Colombia, Nueva Guinea, Venezuela y Malasia.

El cacao producido en Ghana ha sido reconocido por largo tiempo como el estándar para la calidad básica de cacao. El total de producción total en los años recientes ha bordeado los 3 millones de TM. En la figura 29 se muestra la producción global de cacao por país en el año 2013.



Figura 29. Producción global de cacao por país
Fuente: Proexport Colombia

Dentro del ranking de los mayores exportadores de cacao, vemos que a pesar de que Perú se encuentra dentro de los diez primeros lugares, presenta un porcentaje bastante pequeño respecto al mayor, un 1.2% muestra la falta de importancia que se le da a la exportación del cacao, siendo un producto de calidad Premium.

Según la ICCO (Organización internacional de cacao), al cierre del 2014, los tres mayores países productores fueron, en conjunto, aproximadamente el 70.7% de la producción mundial de cacao, compuesto por Costa de Marfil (39.8%), Ghana (21.1%) e Indonesia (9.8%). Sin embargo, Indonesia es ahora un importador neto de granos de África occidental debido a la creciente demanda de chocolate en el país. Otro 20 por ciento es producido por los siguientes cuatro mayores productores: Brasil, Nigeria, Camerún y Ecuador, con cuotas de producción estimadas en 4.8, 5.5, 4.6 y 4.6 %, respectivamente. Brasil, sin embargo, es ahora también un importador neto de granos de África occidental debido a su creciente demanda de chocolate en el país. Los otros contribuyentes relativamente poco significativos en el mercado mundial, a este momento son: Perú, Colombia, México, República Dominicana y Papúa Nueva Guinea.

2.3.3 Demanda de cacao

Los principales importadores de granos de cacao son Holanda, Estados Unidos, Alemania, Malasia, Bélgica, Francia, España, Italia, entre otros. En la siguiente tabla 4 se puede apreciar las toneladas importadas por cada país en el año 2013.

Como se puede apreciar, la demanda total de cacao en el año 2013 fue de cerca de 3 millones. Según la ICCO en el año 2014 la demanda fue de 4.3 millones de toneladas. Según estas cifras, se puede observar que hay un fuerte incremento en la demanda mundial de cacao. Este aumento en la demanda, sobre todo se ha dado en Asia, esto podría constituir una nueva oportunidad para América latina, porque produce las variedades de mejor calidad.

Existen buenas señales de crecimiento en Asia, donde el mercado del cacao se expandiría entre 5 y 9% durante los próximos cuatro a cinco años. América latina será responsable del 16% de la producción mundial, esto representa una buena oportunidad para el Perú.

Tabla 4.- Principales importadores de cacao

Importadores	2013 Toneladas
Holanda	630.745
Estados Unidos	445.203
Alemania	292.697
Malasia	264.856
Bélgica	250.454
Francia	121.995
España	102.664
Italia	89.165
Turquía	82.188
Singapur	77.725
Reino Unido	73.104
Canadá	70.032
Rusia	62.301
China	48.943
Estonia	45.829
Japón	40.976
Suiza	40.925
Indonesia	30.766
México	22.953
Ucrania	20.804
Otros	138.257
TOTAL	2.952.582

Fuente: Proexport Colombia

En Europa la demanda de cacao fino es mucho mayor; mientras que los norteamericanos están habituados a chocolates de alto contenido lácteo y de azúcar y para eso no se necesita cacao de excelente calidad. Pero cuando se requiere un cacao oscuro y con buenas características gustativas, se busca cacao latinoamericano o de Madagascar. Con 70,000 toneladas producidas en 2014 (Información de la ICCO), el Perú posee simultáneamente granos de cacao de excelente calidad, sin embargo el contenido de cacao en el Perú no permite satisfacer a toda la demanda existente; por ello se está buscando ofrecer un producto diferenciado, para el cual se está realizando inversión en producción biológica; así como, el mejoramiento en la productividad.

2.4 Producción de cacao en el Perú

Perú es el tercer mayor productor de cacao en América Latina con aproximadamente 145.000 hectáreas plantadas a partir del 2014.

La producción de cacao peruano en 2014 alcanzó 70,000 toneladas métricas, un incremento del 5 por ciento con respecto al año 2013.

Los directores creen que el total de la finca corporativa plantada de 1,199 hectáreas, incluyendo el programa PAPEC (Programa Alianza Productivo Estratégico Cacao), a partir de finales de septiembre 2015, constituye la mayor plantación de cacao en el Perú. En la figura 30 se muestra un mapa donde se detallan las principales zonas productoras de cacao en el Perú.

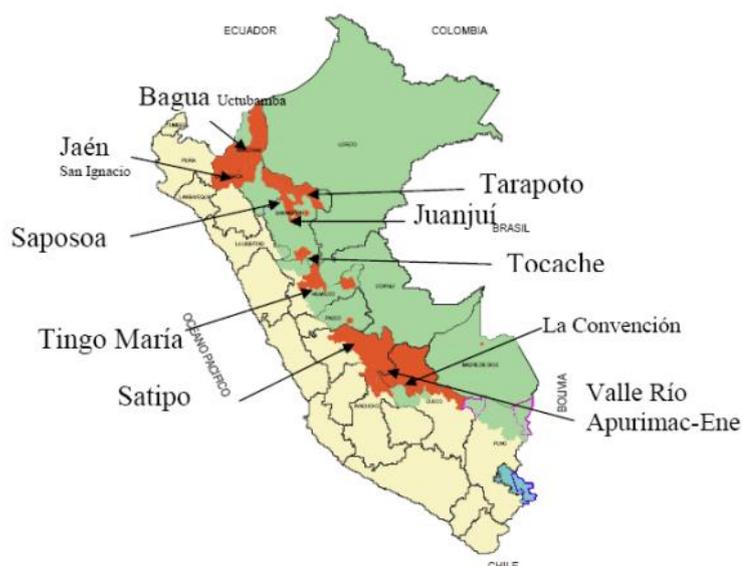


Figura 30. Principales zonas productoras de cacao en el Perú
Fuente: Ministerio de Agricultura

Las principales zonas de producción y rendimiento al año 2011 fueron: San Martín (26 mil TM), Cuzco (8 mil TM), Ayacucho (6 mil TM), Junín (6 mil TM), Amazonas (4 mil TM), Huánuco (2 mil TM). En la tabla 5 se muestra la producción de cacao por departamento en el Perú.

Tabla 5.- Producción de cacao por departamento del Perú.

N.	Región	Mil. TM		Mil. Ha		Rend. T/Ha	
		2010	2011	2010	2011	2010	2011
1	San Martín	21	26	25	29	0.9	0.9
2	Cusco	7	8	21	22	0.3	0.4
3	Ayacucho	6	6	9	9	0.7	0.7
4	Junín	4	6	9	9	0.5	0.7
5	Amazonas	3	4	6	6	0.4	0.7
6	Huánuco	2	2	4	4	0.5	0.5
7	Cajamarca	1	1	1	0	0.8	0.0
8	Ucayali	1	2	1	2	0.9	0.9
	Otros	1	1	1	2		
	Total	47	56	77	84		

Fuente: Ministerio de Agricultura

En la provincia de Piura se cuentan con zonas específicas para el cultivo de cacao, a continuación, se muestran los caseríos junto al número de productores por cada uno de ellos: En la tabla 6 se muestra las zonas específicas de la región Piura donde se cultiva cacao.

Tabla 6.- Zonas específicas de la región Piura para el cultivo del cacao.

Distrito/Caseríos	Área (Has)	N. Familias Productoras
Lalaquiz: Tunal, Guayaquil Alto, Guayaquil Bajo, Caraveli.	140	110
Canchaque: La Soccha, Los Ranchos, Las Vegas, Sapse, Papayal Bajo, Pajonal, Cilia, San Francisco, Huabal.	165	164
Bigote: Virgen del Carmen, Barrios, Huasimo, La pareja, Bigote.	109	105
Salitral: Piedra Blanca, Algarrobal, Palo Blanco, Cisneros, San Pedro, Manga Manguilla.	46	50
Total	460	409

Fuente: Ministerio de Agricultura

2.5 Variedades de cacao en el mercado

En el mundo existen diferentes variedades de cacao, originalmente eran dos tipos; el criollo (*Theobroma ovalifolium*) que presenta cotiledón de color blanco y es poco cultivado por ser muy susceptible a enfermedades; y el forastero (*Theobroma cacao* L.), y del cruce de estas dos especies dio origen al cacao trinitario (*Theobroma de Celian*), y del cruce repetido entre ellos, se originaron los diferentes tipos de cacao (Prabhakaran, 2010).

2.5.1 Cacao criollo o dulce

Es originario de Centroamérica, Colombia y Venezuela. Hasta mediados del siglo XVIII esta especie de cacao era la más cultivada de esa época. En los países de habla hispana en América, el cacao criollo es, frecuentemente, traducido como el nativo. El cacao criollo se cultiva en los países de América del Sur y América Central, como: Perú, Ecuador, Venezuela, Colombia, Honduras, Nicaragua, Guatemala, Jamaica, Bolivia; y en el Caribe, en la zona del océano Índico y en Indonesia (Bennett, 2011).

Los cotiledones de esta variedad de cacao son blancos, es un cacao suave. El grano, después de la fermentación toma un color pardo, por oxidación de los taninos derivados de la catequina. El chocolate obtenido con este tipo de cacao es de color ligeramente pardo muy parecido al del chocolate con leche, presenta un sabor a frutos secos. Este cacao es menos fuerte que el forastero y está más expuesto a enfermedades. Esta variedad no tiene antiocianinas, responsables del color violeta en los otros granos (Prabhakaran, 2010).

El cacao criollo recibe también el nombre de nativo de descendencia extranjera, se caracteriza por el aroma y el sabor. En la figura 31, se muestra la mazorca de cacao criollo.

Esta variedad de cacao se suele demandar para chocolatería fina y elaboraciones más selectas, además los árboles de esta variedad son más delicados y propensos a plagas, por lo que está disminuyendo su área de cultivo. Con esta variedad, se elaboran refinados bombones y piezas de artesanía repostería y variedad de chocolates para su degustación y cata.



Figura 31. Mazorca de cacao criollo
Fuente: Organización Internacional del cacao

Los frutos de esta variedad presentan las siguientes características especiales:

- La superficie de la cáscara es suave y delgada.
- Las mazorcas son de color verde y/o rojo antes de madurar.
- La forma de la mazorca es ovalada casi redonda.
- El contenido de azúcar en la pulpa es muy alto.
- Las habas son gruesas y algo redondas, son de color blanco a rosa.
- El sabor del cacao criollo es suave, su olor es dulce con un aroma delicado.
- Los cacaos criollos puros son muy difíciles de encontrar.

La calidad de un cacao fino y de aroma depende de los siguientes factores:

- 50% Genética del grano. Si no es utilizada una planta fina no se podrá nunca producir un chocolate de degustación,

- 20% Post-cosecha es decir que se fermenten y deshidraten apropiadamente.
- 25% Transformación (tostado y conchado),
- 5% Suelo y estación.

2.5.2 Cacao amargo o forastero

Las características propias de los forasteros son: la acidez del grano, la forma de la mazorca que es amelonada de cáscara gruesa y dura con superficie lisa, la almendra es pequeña pigmentada resistente a plagas, el sabor amargo, el cotiledón es de color violeta cuando el grano está recién extraído de la mazorca. También llamados Amazónicos pues se originaron en la cuenca alta del Río Amazonas, desde donde fueron llevados a África Occidental y Brasil. Son los forasteros que, en términos de calidad, tienden a dar granos del tipo corriente (Prabhakaran, 2010). En la figura 32 se muestra una mazorca de cacao forastero.



Figura 32. Cacao forastero

Fuente: Organización Internacional del cacao

Los cacaos forasteros, también denominados Amazónicos, presentan una producción muy abundante y se caracterizan por varios parámetros como los que se mencionan a continuación.

- La forma de las mazorcas es alargada y puntiaguda.
- La superficie es lisa con surcos profundos.
- La cáscara es gruesa y dura.
- Las habas son de tamaño pequeño, casi planas y de color púrpura.
- Este cacao es de sabor más fuerte, astringente.

2.5.3 Cacao variedad trinitaria

Surge del cruce del cacao Criollo y Forastero, el nombre se debe a los cacaos de Trinidad y Venezuela. Las mazorcas pueden ser de muchas formas y colores; las semillas son más grandes que las del cacao criollo y forastero; las plantas son fuertes, de tronco grueso y hojas grandes. En la figura 33 se muestra la mazorca de un cacao trinitario.



Figura 33. Cacao Trinitario

Fuente: Organización Internacional del cacao

Esta variedad de cacao adquiere las características de su origen como son: la robustez del cacao forastero y el sabor delicado del cacao criollo. Los cotiledones van desde el color casi blanco al totalmente púrpura. Son cacaos con más sabor, considerado en la actualidad como cacaos superiores de mejor calidad. Este cacao híbrido presenta las siguientes características en su fruto y en las habas:

- La mazorca no tiene una forma definida.
- Las habas son de color blanco, violeta, rojo hasta púrpura

2.6 Clasificación comercial e industrial del cacao

Desde el enfoque comercial e industrial, en el mercado mundial, generalmente, se clasifican en dos categorías (Centro de Comercio Internacional UNCTAD/GATT, 1991):

2.6.1 Cacao ordinario

Granos producidos por los cacaos tipo Forastero, se utilizan por lo general en la fabricación de manteca de cacao y de productos que tengan una elevada proporción de chocolate. El cacao tiene el mismo aspecto, pero no lo es. El polvo de cacao es el cacao crudo que ha sido asado a altas temperaturas. Lamentablemente, el proceso de tostado cambia la estructura molecular de los granos de cacao, reduciendo el contenido de enzima y baja el valor nutricional (Rondon y Cumana, 2005). En la figura 34 se muestra este tipo de cacao.



Figura 34. Cacao ordinario
Fuente: Organización Internacional del cacao

2.6.2 Cacao fino o de aroma

En términos generales, los cacaos Criollos y Trinitarios corresponden a lo que en el Mercado mundial se conoce como cacao fino o de aroma (ver figura 35). La selección de cacao fino sigue estrictas especificaciones con respecto a las características de la variedad, la fermentación y deshidratación de las almendras y la verificación de la calidad del lote. Este es utilizado en mezclas con granos ordinarios o Forasteros para producir sabores específicos en los productos terminados (Rondon y Cumana, 2005). En la figura 35 se puede ver este tipo de cacao.



Figura 35. Cacao fino o de aroma
Fuente: Organización Internacional del cacao

La oferta mundial de cacao fino o de aroma es relativamente reducida y representa aproximadamente el 5% del cacao producido en el mundo.

2.7 Características del cacao en el secado

Los parámetros físicos y químicos que se toman en cuenta para determinar la calidad de los granos de cacao son: la coloración interna, la forma interna y externa, el pH y la acidez valorable, contenido de ácido graso libre, y la concentración de polifenoles en las semillas (Amoa-Awua et al., 2007).

La velocidad de secado de los granos también influye en la coloración interna y externa, así como en la forma exterior e interior de los granos (Amoa-Awua et al., 2007).

2.7.1 Tiempo de secado

Hii et al. (2008) determinaron la cinética de secado de los granos de cacao con métodos de secado convencionales y naturales. La temperatura y la humedad relativa del agente desecante durante el período de secado fluctúan entre $26^{\circ}\text{C} - 33^{\circ}\text{C}$ y $56\% - 82\%$, respectivamente. Se observó que el contenido inicial de humedad de 51% (wb) en el grano disminuyó de forma constante. Con la técnica de secado convencional, el grano de cacao se secó (7% wb) en 52 horas, debido a que la velocidad de secado es alta, mientras que con la técnica de secado natural terminó de secar en 73.5 horas. Bharath y Bowen (2007), evaluaron la velocidad de secado de los granos de cacao, utilizando pequeñas muestras, resultando que la velocidad de secado era mayor en los granos con menor masa y de capas más delgadas.

Según Fagunwa et al., (2009) la velocidad de secado de los granos de cacao se determina en gran medida por la temperatura ambiente y la humedad relativa. La afirmación anterior parece reflejar el estudio de Ndukwu et al., (2010), que investigó sobre el efecto de la temperatura y la velocidad del agente desecante sobre la velocidad de secado de los granos de cacao. Para comprobar dicho efecto, se utilizaron temperaturas de secado de 55°C , 70°C y 81°C , velocidad de aire desecante de 1.3 m/s , 2.5 m/s , y 3.7 m/s , contenido inicial de humedad de grano de 79.6% (db), humedad relativa de 80% y 1.38 kg de granos de cacao. Al mismo tiempo, se observó que las velocidades de secado medias para todo el proceso de secado en condiciones de agente desecante de 1.3 m/s y 55°C fue de 0.149 kg/h , 0.171 kg/h para 70°C y 0.291 kg/h para 81°C . Esto implica que el equipo podría eliminar un promedio de 3.576 a 6.984 kg de agua al día por encima de las condiciones de secado. Sin embargo, para una velocidad de aire desecante de 2.5 m/s se eliminó 3.912 kg , 4.464 kg y 7.512 kg de agua por día para las temperaturas de aire de secado de 55°C , 70°C , y 81°C , respectivamente. Esto demuestra que la velocidad de secado depende de la temperatura y de la velocidad del aire. La velocidad de secado era más alta en la primera hora de secado para todas las temperaturas y luego disminuye con el tiempo.

Un estudio realizado por Ndukwu et al., (2010) sobre la cinética de secado del grano de cacao, demostró que el tiempo de secado del cacao hasta una humedad de equilibrio de 6% fue de 20, 14, y 10 horas, utilizando un secador convencional con una velocidad de aire de 2.5 m/s a temperaturas de 55 , 70 y 81°C , respectivamente. En otro estudio, Oke y Omotayo (2011) utilizaron un secador intermitente convencional para investigar el efecto del aire forzado en la calidad del grano de cacao recién fermentado. Los granos se secaron desde las 08.00 hrs hasta las 17.00 horas y se dejaron reposar durante 15 horas antes de que su secado inicie de nuevo. Los granos se expusieron al horno a temperaturas de 35°C , 40°C , 45°C , 50°C y 55°C . La humedad relativa promedio en los hornos fue de 38 , 29 , 21 , 14 , y 8% , respectivamente. Para un contenido inicial de humedad de grano de 53.4% (wb) se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7.- Duración del secado de cacao para diferentes condiciones de agente desecante.

No. de días de secado	Temp 35°C	HR 38 %	Temp 40°C	HR 29 %	Temp 45°C	HR 21 %	Temp 50°C	HR 14 %	Temp 55°C	HR 8 %
1	34%		32%		30%		29%		22%	
2	22%		21%		18%		9%		7%	
3	17%		13%		7%		7%			
4	11%		8%							
5	7%		7%							

Fuente: Oke y Omotayo (2011)

La pérdida de humedad fue alta para los dos primeros días en todas las muestras. La pérdida fue marginal en el tercer día (entre el 2 y el 11%). Después del tercer día la mayoría de los granos habían alcanzado el contenido de humedad de almacenamiento (base húmeda 7%), excepto la muestra desecada a 35 °C y 40 °C, que alcanzó el contenido de humedad de almacenamiento en el quinto día de secado. Esta tendencia es consistente con lo reportado por Ndukwu et al., (2010). En una investigación similar para determinar las características de secado de los granos de cacao usando un secador solar, Nicholas (2012) confirmó que el contenido de humedad disminuye a medida que el tiempo de secado aumenta, independientemente de las velocidades del aire de secado deseado y temperaturas.

2.7.2 Coloración interna y externa del cacao

La manera de realizar el tratamiento poscosecha influye en el color de la parte interior del grano de cacao. La prueba de corte es la prueba estándar que se utiliza para evaluar la idoneidad de los granos de cacao para el procesamiento del chocolate. También es el método estándar de evaluación de la calidad tal como se define en las normas de calidad y puede ser utilizado para estimar dos estados inadecuados como: granos con moho y no fermentados (Wood y Lass, 1987).

Bonaparte et al., (1998) demostraron que el color interno de los granos de cacao depende del método de secado. Para esto utilizaron un secador natural y un secador solar para 13 kg m⁻² de cacao. Sin embargo, no encontró diferencias significativas en la coloración interna de los granos. Hii et al., (2006), utilizaron un secador solar directo a diferentes cargas, encontraron que los granos de una menor carga (20 kg) produjeron el menor porcentaje de granos de color púrpura (7,21%), pero el mayor porcentaje de color pardo (77,65%). En un experimento de seguimiento, Hii et al., (2008) determinaron las características físicas de calidad de los granos de cacao fermentados que se secaron convencionalmente a 60 °C, 70 °C y 80 °C. Para la prueba de corte se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 8).

Tabla 8.- Resultados de las pruebas de corte para los granos secados de manera convencional.

Color	60°C	70°C	80°C
Pizarro	-	-	-
Morado	-	4.24 %	5.56 %
Marrón purpura	31.11 %	37.98 %	35.55 %
Marrón	68.89%	57.78 %	58.89 %

Fuente: Hii et al., (2008)

Los autores también observaron que el secado de cacao en un horno con una temperatura de secado de 60 °C dió como resultado el mayor porcentaje de cacao de color pardo, menor porcentaje de granos marrones y morados en comparación con los granos deshidratados con el horno a temperaturas de 70 °C y 80 °C. En el tratamiento 60 °C, el porcentaje de color marrón era más del 60% lo que indica granos con buena calidad de sabor. Por otro lado, los granos de los otros dos tratamientos mostraron el color marrón ligeramente por debajo de 60%. Los autores, por lo tanto, concluyen que las temperaturas muy altas de secado tienen un efecto perjudicial en la calidad del grano.

2.7.3 Forma del grano de cacao

El moldeado externo del grano de cacao se asocia, generalmente, con un contenido alto de humedad y bajo flujo de aire durante el secado. Hii et al., (2006), observaron que el enmohecimiento en la superficie del grano fue ligero para una cantidad de 20 kg, moderadamente pesada para una cantidad de 30 kg y muy pesada para una cantidad de 60kg. Se esperaba que el enmohecimiento sea ligero para la cantidad de 20 kg, porque el secado se llevó a cabo en un período más corto (5 días), en comparación con las cantidades de 30 kg (7,5 días), y 60 kg (9,5 días). El enmohecimiento fue mayor para la cantidad de 60 kg debido a la alta humedad relativa, lo que favoreció el crecimiento de moho superficial. Para la cantidad de 60 kg, se observó que el vapor de agua se condensa dentro del lecho de los granos y por esto dió como resultado un secado más lento.

2.7.4 Efectos sobre el pH y la acidez valorable del cacao

La acidez valorable es el número de protones recuperados durante una valoración con una base fuerte a un punto final especificado y puede ser expresado como una cantidad molar (Boulton, 1980). Muchos investigadores utilizan la acidez valorable y acidez total como sinónimos, pero no lo son. La acidez valorable es siempre menor que la acidez total, porque no todos los iones de hidrógeno que se esperan de los ácidos se encuentran durante la determinación de la acidez valorable. Sin embargo, la acidez valorable es más fácil de medir. La acidez valorable mide la cantidad de ácidos, especialmente ácidos láctico y acético presentes en los granos de cacao, mientras que el pH es una medida de la fuerza de los ácidos.

La acidez valorable es una mejor medida de ácidos totales en licor de cacao que el pH, pero ambos parámetros se han correlacionado con las puntuaciones de sabor o acidez (Guehi et al., 2010). Jinap y Dimick (1990) encontraron un coeficiente de correlación relativa acidez valorable y pH igual a -0.91 para unas muestras de granos de cacao. Todos los granos de cacao contienen una serie de ácidos a cierto grado y son volátiles y no volátiles, el más importante de los cuales son: acéticos, cítricos y

lácticos. El ácido cítrico está presente en los granos frescos de 1 a 2% y aproximadamente en media desaparece durante la fermentación en la sudoración o se metaboliza, dejando aproximadamente 0,5% en granos secos (Wood y Lass, 1987). Ácidos acéticos y lácticos se forman durante la fermentación, se difunden en el cotiledón y están presentes en cantidades variables en los granos de diferentes países.

La presencia de ácido acético es evidente desde el olor acre de los granos secos pero la mayoría del ácido acético se disipa durante el procesamiento de los granos en chocolate, después de lo cual poco o nada de restos de sabor ácido queda (Wood y Lass, 1987). Por otro lado, el ácido láctico no es volátil y no se disipa durante la fabricación dejando un sabor ácido en el producto acabado. La presencia de estos ácidos baja el pH de los granos secos y, como la acidez del grano a menudo carecen de sabor a chocolate, es posible que el bajo pH, por debajo de 5, interfiera con las reacciones que crean precursores de chocolate (Wood y Lass, 1987).

Bonaparte et al., (1998), investigaron algunas características de los granos de cacao para diferentes densidades de carga, utilizando un secador solar y un secador natural. Los autores observaron que el pH de los granos secos varió de 4.6 a 5.1, pero no mostró diferencias significativas con cualquier tipo de secador o densidad de carga del grano. En general, los granos secos por secado solar y natural fueron de sabor ácido en comparación con los estándares internacionales y tenían un olor distinto durante la prueba de corte. También se observó que la acidez valorable variaba de 18,59 a 23,31 meq.NaOH 100-1g para cualquier tipo de secador y densidad de carga. En 40.4 kg/m^2 de densidad de carga, la acidez valorable fue tan baja como 18,59 meq.NaOH 100-1g, llegando a 23,31 meq.NaOH 100-1 g a $13,5 \text{ kg/m}^2$ de carga. Aunque el análisis estadístico no reveló diferencias en la acidez valorable para los diferentes tipos de secado, las diferencias debido a mayores tasas de carga existían (Bonaparte et al., 1998).

Las altas tasas de carga tienen el potencial de disminuir la velocidad inicial de secado en la masa del grano y así permitir un período más largo para la pérdida de ácidos ya sea enzimáticamente o físicamente (Jinap et al., 1994). Hii et al., (2006), llevaron a cabo un experimento similar que usa el secador solar con tres cargas diferentes, de 20kg, 30kg y 60kg. Se encontró que el pH de las muestras secas varió de 4,91 a 5.39 con un pH inicial de 4,64, mostrando diferencias significativas entre los métodos de secado. El pH fue significativamente mayor para la carga de 60 kg.

Sin embargo, el pH no fue significativamente diferente entre las cargas de 20 kg y 30 kg. Se observó una tendencia similar en la acidez valorable de los granos secos.

La acidez valorable de los granos secos osciló entre 13,30-18,57 meq. NaOH 100-1g, con un valor inicial de 25,75 meq. NaOH 100-1g. La carga de 60kg mostró significativamente menor acidez valorable en comparación con las otras cargas. Los autores concluyeron que, generalmente, la mayor carga hace que el secado se produzca más lentamente y permite la evaporación suficiente y difusión equilibrada de líquido libre, que contenía los ácidos disueltos, a partir de la testa y desde la punta. La acidez de los granos obtenidos a partir de las cargas de 20 kg y 30 kg eran también ligeramente mejor que los reportados por Bonaparte et al., (1998), para los granos por secado solar el pH estaba en el rango de 4.78 a 4,81, y la acidez valorable en el intervalo de 22,38 a 23.03 meq. NaOH 100-1g (Hii et al., 2006).

Hii et al., (2008), después informaron que los granos ácidos grandes están siempre asociados con pH inferior a 5,2, mientras que los mejores granos con sabor de África occidental suelen tener valores de pH alrededor de 5,5.

Además, los autores informaron que el valor del pH de los granos secados mediante secado natural suele ser mayor (menos ácida) que los granos secados mediante secado convencional, debido a que proceso de secado natural es lento y suave permitiendo la evaporación de más ácido acético. De acuerdo con esta investigación, la alta tasa de secado convencional, causó la capa de la testa de los granos se seque más rápido y se rompiera la trayectoria de difusión del ácido acético durante la eliminación de la humedad. De ahí que la mayoría de los ácidos se mantuvo dentro de los granos y causó la acidez excesiva de estos. Por lo tanto, se recomienda que el secado deba realizarse a temperatura de grano no superior a 60 ° C para evitar la retención de exceso de ácidos.

Irie et al., (2010), compararon el secado natural con el secado convencional y observaron que los granos de cacao secados mediante secado natural fueron menos ácidos con un pH de 4,0, mientras que utilizando un secador convencional la acidez del grano fue mucho mayor con un pH alrededor de 3,7. Los autores también afirmaron que el sabor amargo típico de los granos secados convencionalmente se debió al ácido acético contenido en los granos. Guehi et al., (2010) también encontraron resultados similares de los niveles de pH entre 3,8 y 5,2 para los granos secados mediante horno y secado mixto y un rango de 4,5 a 5,5 para los secados de forma natural.

Oke y Omotayo (2012) también investigaron que los granos secados mediante secado convencional intermitente con aire forzado eran más ácidos (pH de 4.7 a 5.2) en comparación con los granos secados de forma natural (pH de 5.3).

2.7.5 Efectos sobre el contenido de ácidos grasos libres

La calidad de la manteca de cacao es importante como la composición y las propiedades de cristalización de los triglicéridos porque determinan las propiedades de textura, dureza y de fusión del chocolate (Murphy y Flood, 2004). Los autores indicaron que los altos niveles de ácidos grasos libres (AGL), que son los productos de descomposición de los triglicéridos, pueden causar problemas de calidad en el chocolate, y son un indicador de que los granos de cacao no se han tratado adecuadamente. Los autores afirmaron además que AGL son generados, principalmente, por las enzimas lipolíticas de microorganismos, por lo tanto, los niveles altos indican un alto nivel de granos que se descomponen, no se han secado correctamente o se han almacenado durante mucho tiempo en condiciones inadecuadas. Guehi et al., (2010), declaró que la calidad de los granos de cacao depende ampliamente de su contenido de AGL. Alta AGL es un defecto grave de la calidad y reduce el valor económico de los granos de cacao. Evaluaron la influencia de las tecnologías de procesamiento de cacao en la formación de ácidos grasos libres en los granos de cacao almacenados, Guehi et al., (2010) encontraron muy bajo contenido de ácidos grasos libres en los granos de cacao sanos enteros que, en general, cumplen con las normas internacionales (1,75% equivalente ácido oleico) en todo el periodo de almacenamiento.

Los autores concluyeron que la formación de ácidos grasos libres no depende del genotipo o de tecnologías de procesamiento post-cosecha de cacao. Los autores atribuyen el alto contenido de ácidos grasos libres en los granos defectuosos, probablemente, a la actividad de la microflora que a su vez se asocia con la calidad inicial y la pérdida de la integridad física de los granos de cacao (Guehi et al., 2010).

A principios Wood y Lass (1987) reportaron que alto contenido de ácidos grasos libres en los granos de cacao podría ser el resultado de granos negros procedentes de las vainas podridas o granos germinados. Del mismo modo, microflora, en particular moldes pueden causar problemas similares durante el almacenamiento.

Además, Wood y Lass (1987) sugirieron que la formación de AGL en los granos de cacao almacenados podría estar vinculada a la acción de las lipasas microbianas. Opoku-Ameyaw et al., (2010) también declaró que el alto contenido de ácidos grasos libres de los granos de cacao es causado por enfermedades como: la vaina de color negro y la podredumbre parda, las vainas que se han quedado en los árboles durante un largo tiempo antes de la cosecha y el almacenamiento inadecuado o largo tiempo de almacenamiento de granos de cacao. Según Johnfiah-Essien y Navarro (2010) el contenido de AGL, a pesar de no ser un parámetro de calidad, debe ser inferior a 1,0% para alcanzar el nivel aceptable de 1,75% en la manteca de cacao que se extrae de los granos de cacao secos.

Los autores reportaron que la calidad de los granos de cacao secos en el comercio internacional se evalúa el nivel de porcentaje de molde total pizarroso, púrpura, insectos infestados, granos planos y germinados, pero más recientemente, el comercio del cacao ha asumido una posición más científica y una gran cantidad hace hincapié en el contenido de ácidos grasos libres que está influenciada por muchos factores, como la humedad, mohos y oxígeno. Contrariamente a la afirmación anterior de que el contenido de ácidos grasos libres se atribuyó principalmente a la integridad física de los granos de cacao, Guehi et al., (2010) estudiaron el efecto de los métodos de secado sobre los niveles de AGL, observaron que, entre las tres muestras secas estudiadas, los granos secos mediante horno mostraron mayor contenido de ácidos grasos libres con respecto a los granos secos por secado solar y mixto. Los autores también observaron que mediante el proceso de secado convencional el contenido de ácidos grasos libres fue por encima de 0,70%, mientras que el secado natural y proceso de secado mixto producen los granos de cacao en bruto con contenido AGL inferior a 0,70%.

2.7.6 Efectos en la concentración de polifenoles en los granos de cacao

Hii et al., (2009) informaron de que los polifenoles han ganado mucho interés recientemente debido a su capacidad antioxidante y posibles beneficios para la salud humana, tales como anti-cancerígena, anti-aterogénico, anti-úlceras, anti-trombótica, anti-inflamatorio, inmunológico moduladora, anti microbiana, vasodilatador y efectos analgésicos.

Los autores añaden que los polifenoles en granos de cacao contribuyen a alrededor de 12 a 18% del peso seco de todos los granos y que las principales clases de compuestos polifenólicos identificados son: los fenoles simples, benzoquinonas, ácidos fenólicos, acetofenonas, ácidos fenilacético, ácidos hidroxicinámicos, fenilpropenos, cumarinas, cromonas, naftoquinonas, xantonas, estilbenos, antraquinonas, flavonoides, lignanos y ligninas.

Hii et al., (2009) identificaron tres grupos principales de polifenoles de cacao, a saber, catequinas también conocidos como flavonoles (37%), antocianinas (4%), y proantocianidinas (58%). Los autores indicaron que la principal catequina es la epicatequina con hasta 35% de polifenoles.

Según Kyi et al., (2003), la concentración de polifenoles totales disminuye rápidamente durante el secado debido a la oxidación enzimática de los polifenoles. Los autores observaron que cuanto mayor sea la temperatura y la humedad relativa del aire de secado, menor será la cantidad residual de polifenoles en los granos de cacao durante el secado. Hii et al., (2009) confirmaron que los compuestos fenólicos o concentración de polifenoles en los granos de cacao se ven afectados por la fermentación y el secado debido, principalmente, a las reacciones de oxidación enzimáticas.

La reacción de oxidación enzimática que se inicia durante la fermentación continúa durante el secado proporcionando suficiente humedad todavía existen en los granos. La evaporación de la humedad garantiza un suministro continuo de oxígeno gaseoso a la vecindad interior del cotiledón.

Los polifenoles en granos de cacao se someten a la oxidación para condensar taninos insolubles de alto peso molecular. Los pigmentos marrones poliméricos (melanina) formados al final de la reacción dan el color marrón típico de chocolate, (Hii et al., 2009).

La reducción del contenido de polifenoles en los granos de cacao por los tratamientos post-cosecha fue observado por Kyi et al., (2003), y Hii et al., (2009). En los estudios de fermentación y secado, los autores hicieron las siguientes observaciones: algunos polifenoles se pierden por difusión en la sudoración de fermentación, algunos se someten a reacción de oxidación que es tanto no enzimática y enzimática a través de la acción del polifenol oxidasa, aproximadamente el 24% de polifenoles totales difusa fuera de los cotiledones después de 60 horas de fermentación, llegando a 58% después de 8 días. Durante el secado, el polifenol oxidasa está completamente inactiva dentro de las 24 horas a 65 ° C (Hii et al., 2009). Los autores observaron también que en 55 °C perdía más del 80% de la actividad se produjo en 24 horas y más del 95% en 48 horas. Después de secar, el nivel de compuestos fenólicos disminuyó en un 32% en comparación con la muestra fermentada. La concentración de polifenoles disminuyó rápidamente durante el secado en condiciones de aire de 40 a 60 ° C y una humedad relativa del 50 a 80%. La liofilización conserva el mayor contenido de polifenoles totales en comparación con el aire caliente y secado natural. Las muestras mediante secado natural mostraron el contenido de polifenoles total más bajo debido al perfil de menor temperatura y tiempo de secado más largo (Hii et al., 2009).

De acuerdo con Hii et al., (2009), el cacao con demasiado alto contenido de polifenoles es indeseable ya que esto ocasiona alto amargor y astringencia al chocolate terminado. Sin embargo, por cuestiones de salud, algunos mercados buscan chocolates con alto contenido de polifenoles. Hii et al., (2009) evaluaron el contenido de polifenoles totales de las diferentes variedades de cacao de diferentes países productores de cacao del mundo y los resultados fueron como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9.- Contenido total de polifenoles en granos de cacao

Origen geográfico	Variedad	Contenido total de polifenoles (mg/g)
Costa de Marfil	Forastero	81.5
Colombia	Amazónico	81.4
Guinea Ecuatorial	Amazónico forastero	72.4
Ecuador	Amazónico híbrido	84.2
Venezuela	Trinitario	64.3
Perú	Criollo	50
República Dominicana	Criollo	40
Malasia	Desconocida	71.42-82.64

Fuente: Hii et al, (2009)

Se puede observar que el rango de polifenoles totales grabados (de 40,0 mg / g a 84,2 mg / g) varía entre las regiones geográficas y también las variedades plantadas. La variedad Criollo general muestra un menor contenido de polifenoles totales, ya que carece de antocianinas, que es un tipo de polifenol, (Hii et al., 2009).

2.8 Características de un adecuado secado de cacao

La eliminación del contenido de humedad en el cacao al finalizar el proceso de fermentación es vital porque evita el desarrollo de mohos que deterioran la calidad y facilita el almacenamiento, manejo y comercialización del cacao. Sin embargo, la eliminación de la humedad debe ser hasta valores del 6 al 7%, máximo 8% y con un valor de pH debe ser próximo a 5.2 (Hii et al., (2008):

- El grano es de forma arriñonada.
- Color externo café oscuro o canela.
- Consistencia quebradiza. Cascara fácilmente desprendible.
- Estructura interna arriñonada y con espacios dentro de la estructura de los cotiledones. Presenta unas membranas transparentes delgadas entre las grietas del grano.
- Color interno café marrón, violeta o simplemente chocolate.
- Olor a chocolate, agradable.

- Sabor, medianamente amargo.

2.9 Secadores para cacao

Como se detalló en el apartado 1.3, existen muchos tipos de secadores para deshidratar productos. En general, el secado de productos básicamente se refiere a la eliminación de líquido de un sólido por evaporación (Jiang H. et al., 2015).

Su objetivo es mejorar la estabilidad de un producto para ser almacenado, con un mínimo de requerimientos de empaque y reduciendo los pesos para su transportación.

En el caso del grano de cacao, se han empleado muchos tipos de secadores para aumentar la productividad mejorando los tiempos de secado y la calidad del grano. Así mismo, también se ha estudiado la cinética del secado mediante simulaciones en 3D del grano de cacao (Hii C.L. et al., 2013). En la literatura investigada, se encontraron varios tipos de secadores naturales, solares y convencionales aplicados al secado de cacao (Fudholi A. et al., 2009).

El secado solar es una opción alternativa al secado natural y al secado convencional de aire caliente por varias razones, principalmente debido a la fuente ilimitada y renovable de la radiación solar, que se puede captar mediante el uso de un sistema de colector solar. Esto reduce el uso de combustibles fósiles y el impacto ambiental debido al consumo de productos no renovables.

En general, el secado solar muestra los siguientes beneficios.

- Mejora significativa en la calidad del producto (color, textura y sabor).
- No hay contaminación de insectos, microorganismos y micotoxinas.
- Reducción del tiempo de secado hasta un 50%.
- Reducción de las pérdidas de secado y almacenamiento.
- Aumento considerable de la vida útil de los productos secos.

2.9.1 Secado natural de cacao

Este método de secado se realiza exponiendo los granos de cacao fermentados en capas muy delgadas a los rayos del sol, sobre superficies de madera o cemento (ver figura 36). Las capas de los granos se rastrillan o mueven frecuentemente durante el día con el fin de distribuir uniformemente el calor, consiguiéndose de esta manera un secado homogéneo y retirándose al mismo tiempo impurezas, así como se muestra en la figura 37. Este tipo de secado tarda aproximadamente entre 3 y 9 días, necesario para impedir el crecimiento de mohos durante el almacenamiento.



Figura 36. Secado de granos de cacao sobre superficies de madera y cemento

Fuente: Elaboración propia



Figura 37. Remoción del grano para que el secado sea uniforme

Fuente: Organización Internacional de cacao

Los métodos de secado natural más comunes son:

- Patios de cemento, ladrillo o madera.
- Patios de cemento o ladrillo con techos rodantes.
- Gavetas de madera rodante con techo fijo
- Secadores de tipo túnel
- Secadores en pasarelas

El secado natural tiene las siguientes ventajas:

- Permite que la temperatura de secado sea moderada y uniforme.
- La calidad del cacao es mejor, su aroma es más fino y su color es más claro.

Sin embargo, presenta las siguientes desventajas:

- Este método de secado depende de las condiciones ambientales.
- Si el secado es demasiado lento, el sabor de los granos es muy ácido.
- Se contamina fácilmente por materias extrañas como tierra, polvo, hojas, piedras, entre otras.

2.9.2 Secado convencional de cacao

Este tipo de secado es muy empleado en lugares en donde el clima es húmedo. Para este tipo de secado se emplea aire caliente.

El secador convencional más simple es básicamente una plataforma permeable (de madera, metálica o una lámina de aluminio perforada), donde se ubican los granos, empotrada horizontalmente sobre una cámara provista de un quemador de carbón o combustible acoplada a un tubo metálico con su extremo posterior unido a una chimenea cuyo diámetro debe ser mínimo el 10% del diámetro del tubo (Fudholi A. et al., 2009). En la lámina perforada los huecos deben tener una separación de 3 centímetros y su diámetro o longitud no debe pasar de 1 centímetro.

El aire caliente sale por la plataforma y seca los granos de cacao. Como el extremo posterior de la plataforma calienta más que el lado del quemador, es necesario voltear la masa de granos intercambiando gradualmente su posición para que el secado sea lo más uniformemente posible.

Existen dos métodos de secado convencional de cacao. El que emplea altas temperaturas de secado que están entre valores de 45 y 120 °C o más en diferentes casos, y el que utiliza bajas temperaturas de secado con o sin calentamiento adicional del aire de secado (Vijaya S. et al., 2012).

En general, las ventajas de estos tipos de secadores convencionales son:

- No depende del clima.
- Su mantenimiento es barato.
- Es más rápido que el secado al sol, no hay problemas de mohos.

2.9.2.1 Secado de cacao por bomba de calor

Hii C.L et al., 2013, estudiaron la cinética del secado de granos de cacao, mediante un secador de bomba de calor. En la figura 38, se muestra el diagrama esquemático del secador de bomba de calor y la dirección del flujo de aire caliente en el secador. El análisis de transferencia de calor y de masa fue realizado mediante simulación en 3D.

El secador de bomba de calor se basa en el concepto de refrigeración y en los intercambios de calor con el aire de secado que pasa a través del condensador (calefacción de aire) y el evaporador (refrigeración por aire). Tiene varias ventajas, tales como la capacidad de secar a condiciones de deshumidificador, recuperar el calor latente y sensible de la evaporación del agua, mejorar la calidad del producto (color, textura y apariencia) y lo más importante, la capacidad de conservar calor sensible en los productos (Hii, 2010; Perera y Rahman, 1997; Colak y Hepbasli, 2009).

Con estas ventajas, este secador es muy conveniente para mejorar la calidad de los granos de cacao, especialmente, el sabor de cacao. Se secaron 25 kg de granos de cacao de Malasia durante 5 días. Se trabajó con temperaturas de secado por debajo de los 60 °C, para garantizar la calidad del cacao. Esto se hace con el fin de evitar el exceso de ácidos en los granos que son los causantes de la pérdida del sabor.

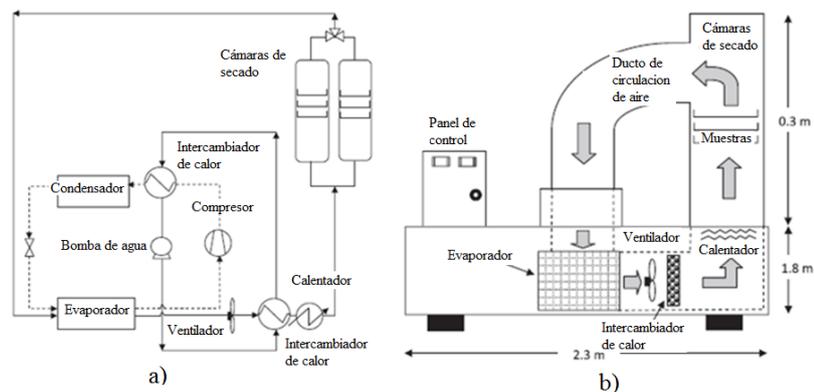


Figura 38. Secador por bomba de calor para cacao. a) Diagrama esquemático del prototipo de secador por bomba de calor, b) Vista esquemática de la circulación de aire dentro del secador.

Fuente: Hii C.L et al., (2013)

2.9.2.2 Secador rotativo para cacao

Vega y Martínez, 2015, implementaron un sistema rotatorio de flujo constante para el secado de cacao, basándose en la transferencia de calor por convección y control predictivo basado en el modelo. El secado de cacao requiere de 6 -7 días, siempre y cuando el clima lo permita ya que depende de las condiciones climatológicas de la zona. Mediante dicho secador se redujo el tiempo de secado a un periodo promedio de 10 horas y el proceso pudo desarrollarse de forma independiente a las condiciones climatológicas de la zona. En la figura 39 se muestra el secador que utilizaron para sus experimentaciones y validación matemática.

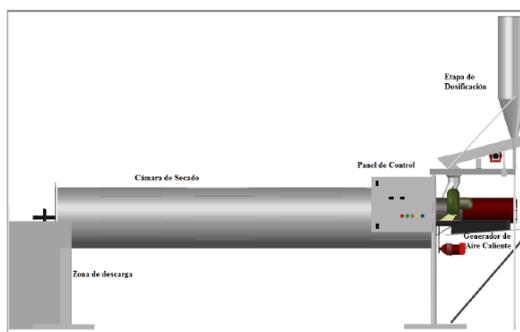


Figura 39. Secador rotativo para cacao
Fuente: Vega y Martínez, (2015)

2.9.2.3 Secador tipo batch

Komolafe et al., 2014, diseñaron un secador batch para 25 kg de cacao, también se evaluó utilizando madera como material combustible.

Dicho secador se compone de cuatro partes principales: la plataforma de secado, la cámara de secado, el conducto de calefacción (combustión) y los agujeros de aire. El secado en este tipo de secador fue exitoso porque se disminuyó la humedad del cacao de 80.01 % db a 7.49 % db en 7 horas de secado continuo a temperaturas de secado entre 61.3 °C y 66.7 °C. La eficiencia del secado oscilaba entre 72.3 % a 92.9 %. En la figura 40 se muestra el secador antes mencionado.



Figura 40. Secador tipo batch para cacao
Fuente: Komolafe et al., (2014)

Chinenye et. al., 2010, investigaron la cinética del secado del cacao, al mismo tiempo realizaron experimentos bajo condiciones isotérmicas, usando un secador discontinuo en caliente a 55, 70, y 81 °C. Los datos de humedad obtenidos en el proceso de secado se ajustaron a un modelo de secado de dos capas delgadas con buenos resultados. El secado fue más rápido a una temperatura de secado mayor. Se utilizó la ley de Fick para predecir la difusividad efectiva usando datos experimentales, asumiendo que la variación de difusividad con la temperatura puede ser expresada por una función tipo Arrhenius. Los valores de difusividad

obtenidos variaron de $6,137 \times 10^{-10}$ a $2,1855 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. La constante de Arrhenius (D) predicha fue $8,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ mientras que la energía de activación predicha fue $39,94 \text{ kJ mol}^{-1}$. En la figura 41 se muestra el secador empleado en dicho experimento.

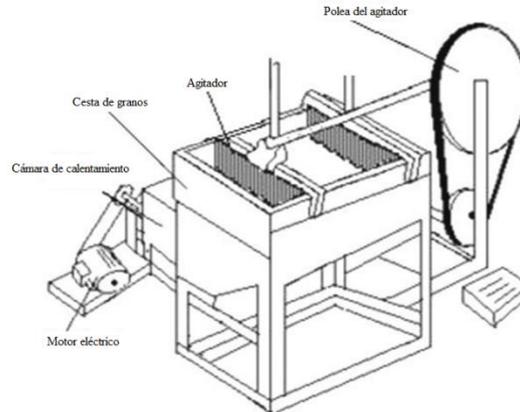


Figura 41. Secador tipo batch para cacao
Fuente: Chinenye et al., (2010)

2.9.3 Secadores solares para cacao

Fagunwa et. al., 2009, desarrollaron un secador solar con almacenamiento de energía térmica para granos de cacao. El secador experimental (ver figura 42) tiene tres partes fundamentales, que son: colector solar, cámara de secado y la cámara de almacenamiento térmico. En la figura 43 se muestran la reducción en el contenido de humedad de los granos de cacao por convección libre y forzada en el secador.

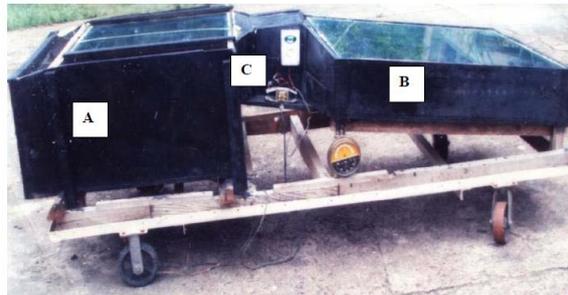


Figura 42. Secador solar intermitente para cacao
Fuente: Fagunwa et al., (2009)

En la figura 43, se puede observar que, el secado por convección libre, el contenido inicial de humedad en el grano es de 53.4% (wb) y disminuyó hasta 3.56% (wb) y en el secado por convección forzada con caudales de $1.02 \text{ m}^3/\text{min}$ y $1.32 \text{ m}^3/\text{min}$, la humedad disminuyó a 9.09% (wb) y 7.11% (wb), respectivamente. Además, las curvas muestran la reabsorción de humedad, entre las 1:00 y 3:00 am. La reabsorción de la humedad es mayor en el caso del secado por convección forzada. La reabsorción de la humedad es debido a la alta humedad relativa (98%) del aire en el ambiente en este periodo de tiempo y a la naturaleza higroscópica de los granos de cacao. Esto confirma que el secado por convección forzada no es beneficioso durante el periodo de descenso de la temperatura del aire desecante.

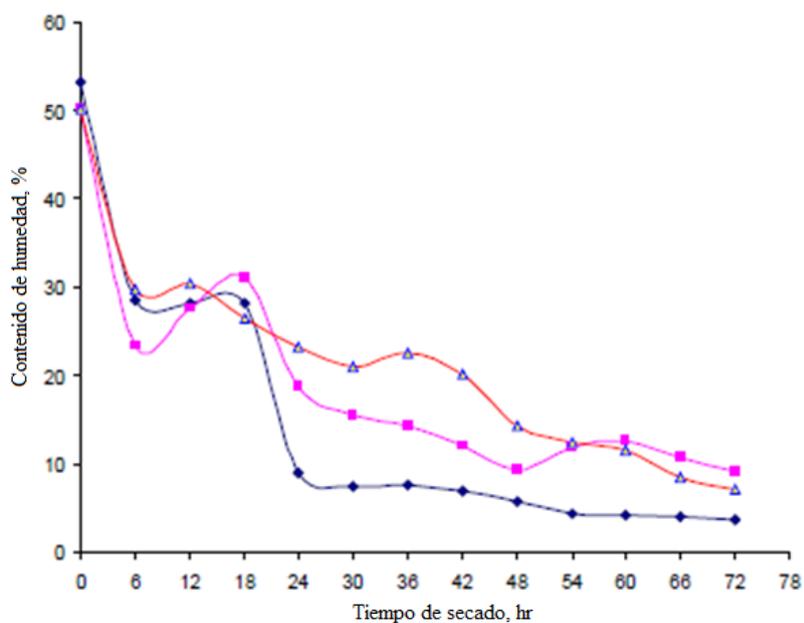


Figura 43. Contenido de humedad en los granos de cacao por convección libre y forzada: ◆, convección libre; ■, flujo de aire de $1.02 \text{ m}^3/\text{min}$; Δ, flujo de aire de $1.32 \text{ m}^3/\text{min}$
Fuente: Fagunwa et. al., 2009

En la tabla 10, se muestran los resultados obtenidos de las características físicoquímicas de los granos de cacao utilizando el secador de la figura 42. Como se puede apreciar, Fagunwa et. al., obtuvieron características de grano muy favorables con respecto al secado natural. Las características de acidez, pH y sabor, para el secado natural y por convección forzada están dentro de los niveles aceptables de las normas internacionales. Todas las muestras que se secaron por convección libre o forzada se deshidrataron correctamente mostrando un color rojizo oscuro; mientras que utilizando un secador natural se obtuvieron malas características con respecto al color del grano de cacao.

Los resultados obtenidos (ver tabla 10) indicaron que el secado por convección libre produce un cacao de mejor calidad con un pH de 6.35, índice de acidez de 3.4 mg/g y un sabor ligeramente amargo. Los granos de cacao deshidratados por convección forzada son más ácidos, porque la acidez aumenta con la velocidad del flujo de aire.

Farah et al., 2014, evaluaron la eficacia de un secador solar continuo con material de almacenamiento térmico para deshidratar granos de cacao de la provincia de Sumatra Utara de Indonesia. La cantidad de granos de cacao fue de 1kg con un contenido inicial de humedad que varía entre 59.15 % - 60.37%. Este es un contenido de humedad típico de los granos después del proceso de fermentación en Indonesia. Implementaron un prototipo de secador solar para la experimentación de sus hipótesis, en la figura 44 se muestra dicho secador solar, consta de tres componentes principales que son: la cámara de secado, el colector solar y un material de almacenamiento de energía térmica.

En la figura 44c se muestra la sección transversal detallada y la resistencia térmica de los materiales que componen el colector solar.

Tabla 10. Características del grano de cacao seco, utilizando los tres métodos de secado.

Cualidad	Flujo de aire, m ³ /min			
	Convección libre	1.02	1.32	Control
Contenido de aceite, %	31.7 (38.5)*	41.6 (29.5)	31.2 (32.4)	
pH	6.35 (6.46)	5.18 (5.35)	4.97 (5.20)	6.80
Índice de acidez, mg/g	3.4 (3.32)	3.24 (3.32)	3.2 (3.24)	3.5
Ácidos grasos libres, mg/g	0.42 (0.42)	0.41 (0.42)	0.40 (0.41)	0.50
Sabor	Ligeramente amargo (Ligeramente amargo)	Ligeramente amargo (Ligeramente amargo)	Amargo (Ligeramente amargo)	
Color	marrón rojizo oscuro (marrón rojizo oscuro)	marrón rojizo oscuro (rojo oscuro)	marrón rojizo oscuro (marrón rojizo oscuro)	
Pizarro	Ninguna (ninguna)	Ninguna (ninguna)	Ninguna (ninguna)	
Molde	Ninguna (ninguna)	Ninguna (ninguna)	Ninguna (ninguna)	

*Numero en paréntesis son los atributos de calidad de las muestras utilizando método natural de secado
+ Recomendaciones internacionales

Fuente: Fagunwa et. al., 2009

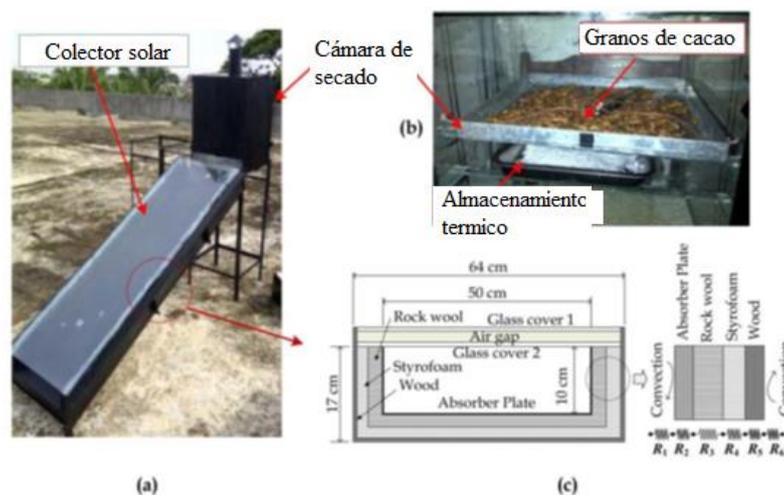


Figura 44. Secador solar con almacenamiento de energía térmica para cacao.

Fuente: Farah et al., 2014

El secador solar operó en dos condiciones de secado, durante el día y la noche. Durante el día, los granos de cacao se secaron mediante aire caliente producido por el colector solar. Al mismo tiempo, el material de almacenamiento absorbió la energía solar de forma directa con la finalidad de liberarla durante la noche. En la noche, el almacenamiento térmico se coloca dentro de la cámara de secado junto con los granos de cacao. De esta forma, el cacao se deshidrató de forma continua durante la noche y se mejoró la eficiencia del secado.

En todos los experimentos se registraron la temperatura, la masa de los granos de cacao, humedad relativa, velocidad del viento, y la radiación solar. Para medir la temperatura se utilizó termopares de tipo J con una precisión del 4%. Farah et al. 2014, utilizaron un sistema de adquisición de datos de Agilent 3497A con un multiplexor de 20 canales para las mediciones de los parámetros antes mencionados (Ver figura 45). Para medir la humedad dentro de la cámara de secado, se utilizaron 2 USB Temperatura Humedad Logger. La precisión de la temperatura y la humedad relativa fueron $\pm 0.5^\circ \text{C}$ y $\pm 3\% \text{RH}$, respectivamente. Para medir la masa de los granos de cacao utilizaron un sistema de adquisición de peso online con una precisión de 0,01 kg. La masa desecante se midió utilizando una balanza analítica (Mettler Toledo, EE.UU.) con una capacidad de 600 gramos y una precisión de 0,01 gramos. El esquema del secador solar y el sistema de adquisición de datos para la validación del modelo matemático se muestra en la figura 45.

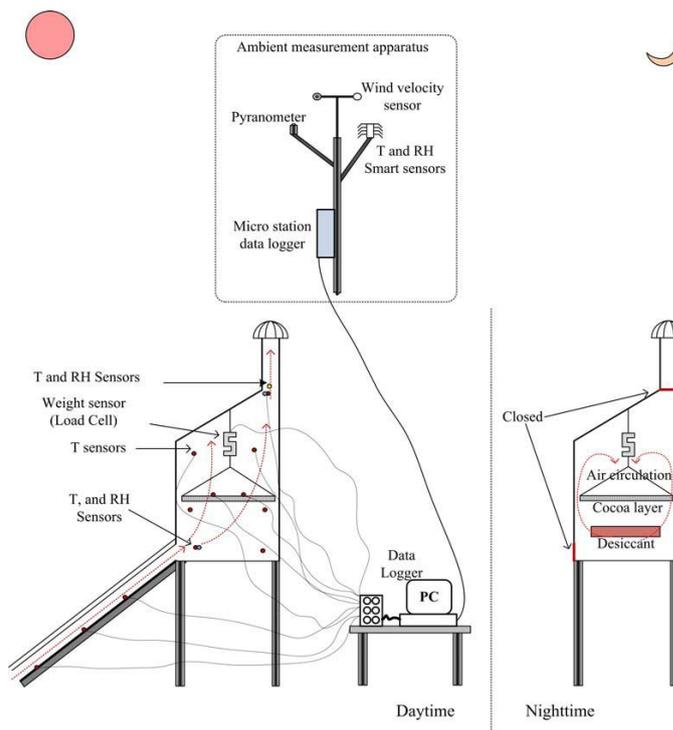


Figura 45. Sistema de adquisición de datos Agilent en el secador solar con almacenamiento de energía térmica.

Fuente: Farah et al., 2014

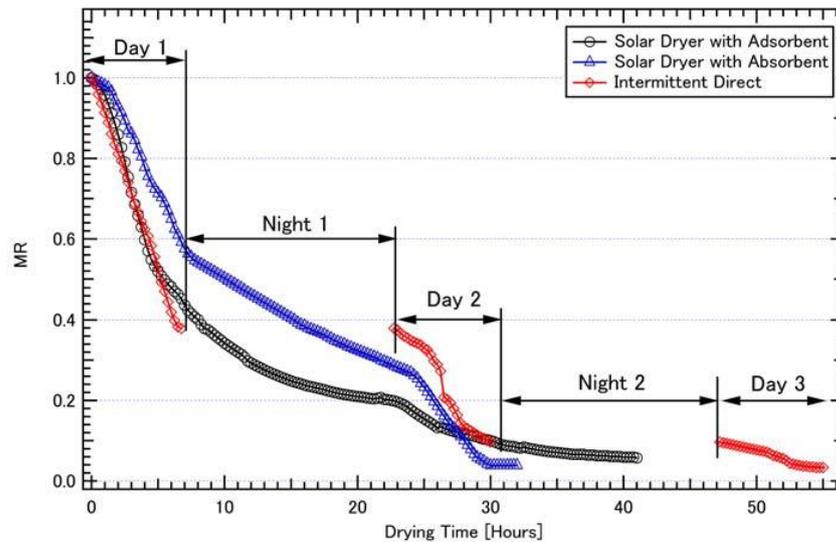


Figura 46. Contenido de humedad no dimensional (MR) en el grano de cacao, utilizando los tres métodos de secado.

Fuente: Farah et al., 2014

En la figura 46, se obtuvieron la humedad no dimensional (MR) para los tres métodos de secado utilizados.

Los tres métodos fueron el secado natural, secado con material de almacenamiento térmico adsorbente y absorbente. La figura 46, muestra que el tiempo total para la deshidratación del cacao utilizando el secado natural fue de 3 días. Un estudio reveló que el tiempo de secado promedio en indonesia varía entre 3 a 5 días (Farah et al., 2014).

Como se puede concluir de los resultados de la figura 46, durante la noche, no se registró una reducción de la MR (humedad adimensional). Sin embargo, el tiempo de secado de cacao mediante un secador solar con almacenamiento de energía térmica disminuyó con respecto al secado natural. Los tiempos de secado para el secador con adsorbente y con absorbente fueron de 41 horas y 30 horas, respectivamente. Esto demuestra que el secador con desecante es más eficaz en comparación con el secado natural.

2.10 Secado en Asprobo

En la empresa ASPROBO (Asociación de productores de banano y cacao orgánico) ubicada en el distrito de Buenos Aires, Morropón, Piura se produce cacao de tipo forastero y blanco porcelana. Para secar los granos de cacao, dicha empresa utiliza el método de secado natural. En la figura 47 se muestra la manera de realizarse el secado de cacao en ASPROBO.



Figura 47. Secado de granos de cacao en ASPROBO.

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 47, el grano de cacao después de la fermentación se coloca en una plataforma de cemento a una cierta altura. Los granos se mueven frecuentemente durante el día con el fin de que la transferencia de calor entre el aire y el cacao sea uniforme. Este tipo de secado tarda entre 5 a 7 días. El secado en ASPROBO se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- Los granos recién fermentados tienen 50%-55% de humedad y debe reducirse hasta 7-8% como máximo.
- El secado debe realizarse en una plataforma de cemento o tarimas de madera y sobre mantas.
- El secado debe ser de forma gradual, el primer día se debe exponer al sol entre 2 a 3 hrs y luego juntarlo y abrigo.
- El segundo día se expone al sol de 3 a 4 horas y luego de junta y se abrigo.
- El tercer día se expone al sol durante 5 horas, y los días posteriores todo el día hasta alcanzar el 8% de humedad.
- Al abrigo los dos primeros días permitirá que se terminen las reacciones químicas en el cacao.
- Se debe evitar que el grano, se rehumedezca, honguee o tenga olores extraños.
- El grano está seco cuando al frotar entre las manos tiene un sonido a cascajo; al presionarlo se quiebra y la cascarilla se desprende con facilidad.

Para determinar la calidad del grano de cacao, ASPROBO utiliza las siguientes normas técnicas:

- NTP 208.005, CACAO Y DERIVADOS: Métodos y Ensayos.
- NTP-ISO-1114:2006, GRANOS DE CACAO: Prueba de Corte.
- NTP-ISO-2291:2006, GRANOS DE CACAO: Determinación del Contenido de Humedad (método de rutina).

- NTP-ISO-2292:2006, GRANOS DE CACAO: Muestreo.
- NTP-ISO-2451:2006, GRANOS DE CACAO: Especificaciones

2.10.1 Determinación del contenido de la humedad

2.10.1.1 Método de rutina (norma técnica)

Materiales y equipos: Para el método de rutina se emplean los siguientes materiales y equipos: Horno, cápsulas de vidrio, mortero, balanza digital de precisión y un desecador.

Procedimiento

Para la determinación del contenido de humedad, se pesa 10 gr de muestra del producto a evaluar, luego será triturado en un mortero en partículas gruesas, para evitar la formación de pasta. Luego se coloca en la cápsula de vidrio la muestra triturada y luego se coloca en la estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ (ver figura 48), por un tiempo de 16 ± 1 hrs, luego se ingresa al desecador dejándolo enfriar durante 40 minutos, para luego proceder a pesar. Para una mayor exactitud de los resultados se recomienda realizar la prueba como mínimo con 2 repeticiones.



Figura 48. Horno que se usa para medir la humedad para el método de rutina.

Fuente: NTP-ISO-2291:2006, GRANOS DE CACAO

El cálculo del contenido de humedad en base húmeda (wb) se realiza aplicando la ecuación 1.1.

2.10.1.2 Método rápido

Materiales y equipos: medidor de humedad electrónico (Ver figura 49).

Procedimiento:

Para la determinación de la humedad se debe extraer una muestra, luego se coloca en la balanza del equipo, porque este requiere un mínimo de

muestra. Una vez pesada se enciende el equipo y se espera mensaje de “verter muestra”. Una vez en el interior del equipo, se espera hasta que la lectura sea digitalizada en pantalla.



Figura 49. Medidor de humedad electrónico
Fuente: NTP-ISO-2291:2006, GRANOS DE CACAO

El cálculo de la humedad se calcula con la siguiente ecuación 2.1.

$$\%M = \text{Lectura del medidor de humedad (\%)} \times f \quad (2.1)$$

Donde, $\%M$ es el porcentaje de humedad del producto en base húmeda, f es el factor de corrección de lectura del peso final de la muestra en gramos. Si el equipo está calibrado continuamente el $f = 1$.

En ASPROBO se hicieron pruebas para determinar los porcentajes humedad (wb) diaria del grano de cacao, durante todo el proceso de secado. En la tabla 11 se muestran los datos obtenidos mediante el método de rutina. El contenido inicial de humedad fue de 56% (wb). En el primer día de secado disminuyó a 49.159 % (wb), hasta llegar a la humedad de equilibrio de 7.4 % (wb), la cual es la apropiada para asegurar la calidad del grano de cacao y por lo tanto un buen almacenamiento. En la figura 50 se muestran los datos de humedad en base húmeda del cacao desde el día 08/02/2016 hasta el día 15/02/2016.

Tabla 11: Humedad del grano de cacao desde el 08/02/2016 hasta el día 15/02/2016

Días	Humedad(%wb)
1	49.159
2	43.659
3	31.5
4	22.05
5	12.6
6	9.3
7	7.4

Fuente: Elaboración propia

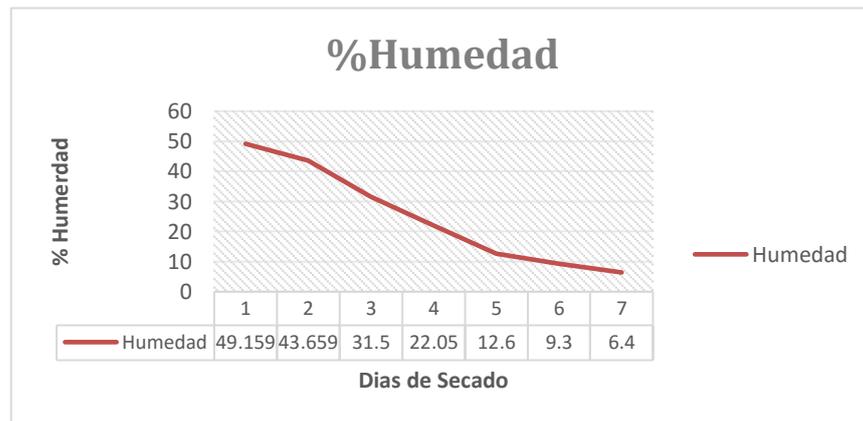


Figura 50. Datos de la humedad en base húmeda del cacao desde el día 08/02/2016 hasta el día 15/02/2016.

Fuente: Datos experimentales.

Capítulo 3

Modelo matemático de la cámara de secado solar para cacao

3.1 Introducción

Como se detalló en los capítulos anteriores; la tecnología de secado solar es una alternativa muy buena, porque se obtienen características del producto, que son aceptables para el mercado internacional, y proporciona un ambiente controlado de secado para el mismo, es decir, si se varía un parámetro de entrada, se puede cambiar las características y la dinámica del proceso de secado (ver tabla 10). Tienen muchas ventajas en comparación con los secadores naturales, por ejemplo, se ahorra tiempo de secado, ocupa menos área, protege al producto del medio ambiente y mejora la calidad del producto, haciendo que el secado sea más eficiente.

La cámara de secado es un elemento importante en un secador solar, porque es donde se produce los procesos simultáneos de transferencia de masa y de calor, para extraer la humedad del producto. Hay muchos tipos de cámaras de secado que depende principalmente del tipo de secador, es decir en un secador directo, la cámara de secado que contiene al producto presenta una cubierta transparente, porque también cumple la función de colector solar. Para un secador solar indirecto, la radiación solar no incide sobre el producto, porque la cámara de secado está totalmente aislada. Finalmente, en el secador solar mixto puede darse el caso en que la absorción de la radiación solar se realice tanto en el colector solar como en la misma cámara de secado.

Durante muchos años, se han desarrollado distintos modelos matemáticos de secadores solares, con el objetivo de comprender su funcionamiento, plantear mejoras de diseño, disminuir el tiempo de secado, mejorar la calidad del producto, elegir las condiciones de secado óptimas para aplicaciones industriales a pequeña escala y controlar su funcionamiento.

Por lo general, los modelos matemáticos de secadores se basan en las ecuaciones de transferencia de calor y de masa en el aire desecante y el producto. Los modelos matemáticos para secadores se clasifican en modelos de no equilibrio y modelos logarítmicos (Aregba et al., 2006). Los modelos de no equilibrio, dependen principalmente de la dirección del flujo del aire, y pueden ser modelos de cama estacionaria, de flujo cruzado, de flujo simultáneo, y de flujo contracorriente.

Los modelos logarítmicos son mucho más simplificados y fáciles de resolver que los modelos de no equilibrio, porque las variables del modelo están expresadas en funciones logarítmicas que dependen del tiempo y profundidad del secador.

La cinética de secado del producto se puede describir completamente mediante el uso de sus propiedades de transporte (conductividad térmica, la difusividad térmica, la difusividad de la humedad, calor de interface, y los coeficientes de transferencia de masa) y las propiedades del medio de secado (aire precalentado en el colector). En el secado de productos, la constante K (ecuación 1.14) se utiliza para expresar todos los fenómenos de transporte antes mencionados, y pueden ser definidos por una sola ecuación de capa fina.

Las ecuaciones de capa fina describen los fenómenos de secado de una forma unificada, independientemente del mecanismo que controla al secado. Se han utilizado para estimar el tiempo de secado de varios productos agrícolas, y para determinar las curvas de secado. En el desarrollo de modelos de secado de capa fina para productos agrícolas, generalmente se mide y correlaciona el contenido de humedad del producto, en cada instante de tiempo.

En la figura 52, se representa un esquema, para los secadores tipo colector -cámara, las variables necesarias a introducir para conseguir un modelo apropiado de estos dispositivos. En conclusión, serán necesarios parámetros climatológicos, así como un extenso número de variables relacionadas con el colector y la cámara de secado.

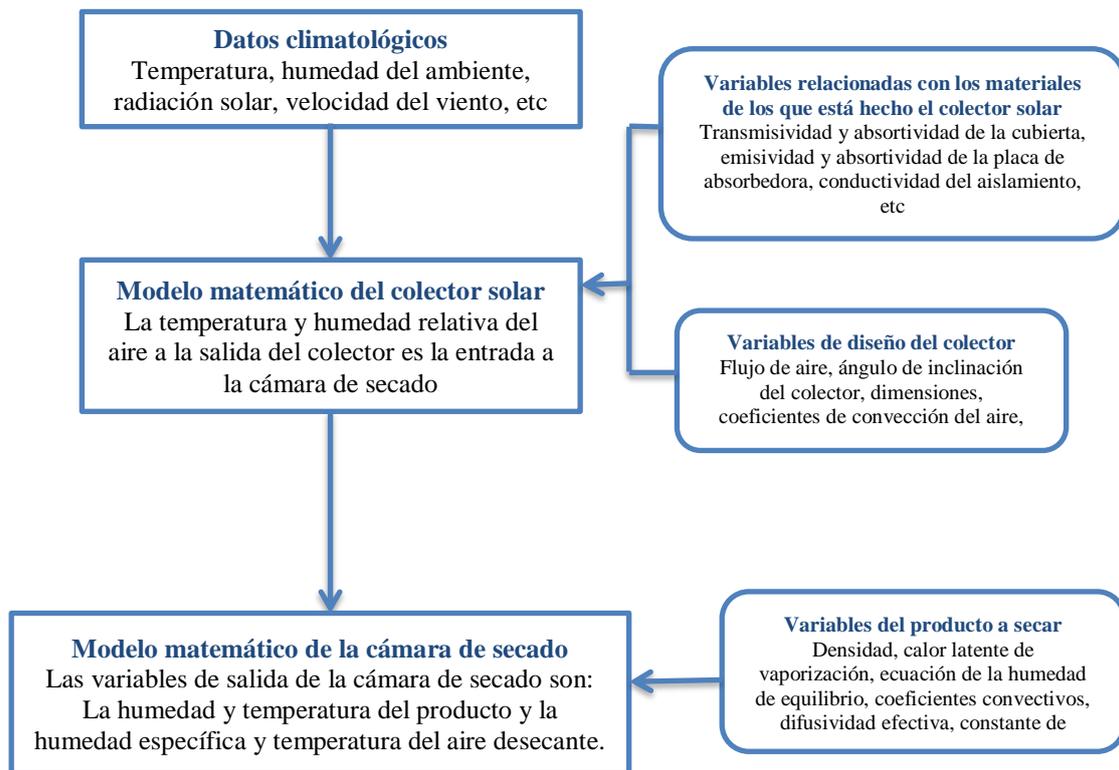


Figura 52. Esquema general de las variables necesarias para la simulación.

Fuente: Elaboración propia

En el presente capítulo, primeramente, se describe el secador solar indirecto propuesto, para mejorar el proceso de secado tradicional de cacao que se realiza en la empresa Asprobo ubicado en la provincia de Morropón, Piura. Luego, se realizará el modelo matemático de no equilibrio de la cámara de secado solar indirecta en bandejas para granos de cacao. Finalmente, se simula mediante MATLAB, el comportamiento de la cámara de secado, cuyos resultados se compararán con el secado al sol, para obtener conclusiones valiosas acerca de la mejora en la dinámica del proceso de secado de cacao.

3.2 Descripción del sistema

El diagrama esquemático del secador solar indirecto propuesto se muestra en la figura 53. El secador solar consta de un colector solar de doble flujo con una superficie de $1.54m \times 0.53m$ conectado a la cámara de secado, mediante una pieza de transición. El colector solar tiene 2 cubiertas de vidrio y una placa absorbidora. La dimensión del ducto perpendicular a la dirección del flujo del aire en el colector es de $0.71 m \times 0.27 m$. El colector está aislado térmicamente con fibra de vidrio con un espesor de 60 mm.

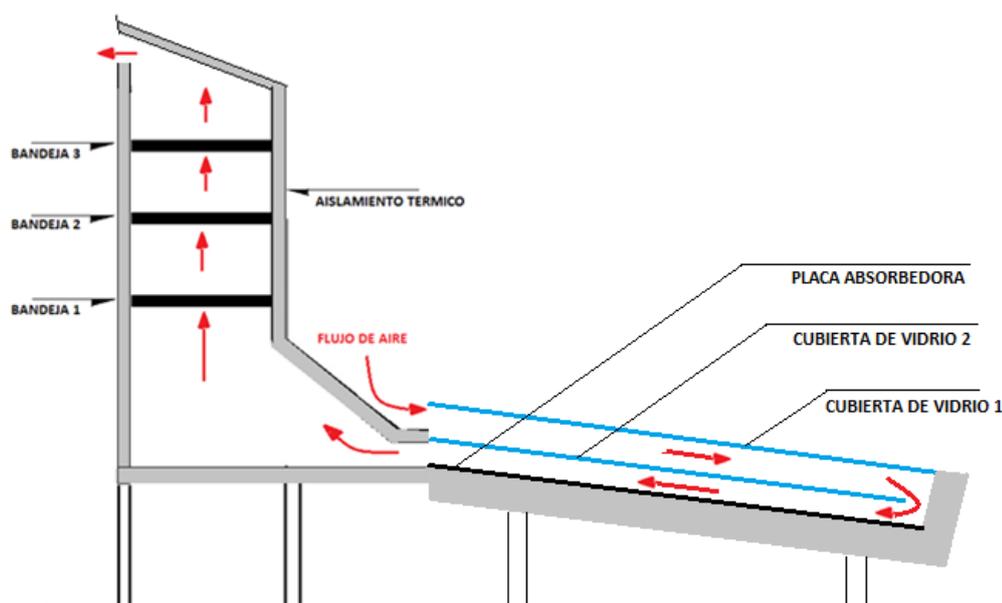


Figura 53. Esquema del secador solar indirecto para cacao
Fuente: Elaboración propia

La cámara de secado está hecha de madera prensada OSV de $19mm$ de espesor con anchura, profundidad y altura de $0.51m$, $0.53m$ y $1m$, respectivamente. El secador es capaz de contener $4 kg$ de granos de cacao. La cámara de secado está aislada con fibra de vidrio de espesor de $60 mm$ de espesor. En el techo de la cámara de secado se encuentra una chimenea solar que actúa como un extractor aguas abajo del aire húmedo. La cámara de secado tiene 3 bandejas, donde se ubican los granos de cacao. La dimensión de las bandejas es de $0.51 m \times 0.53 m$. En la figura 54 se muestra el detalle de la cámara de secado (con sus respectivas vistas) y de la bandeja.

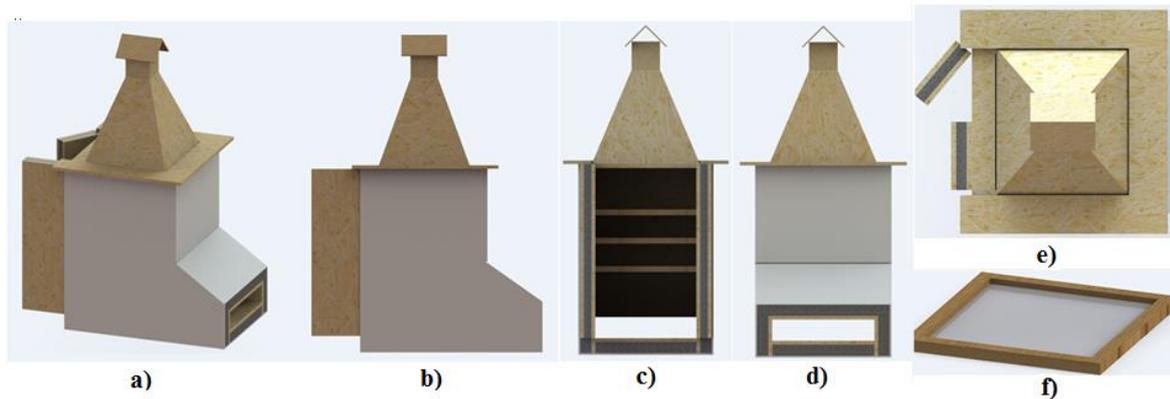


Figura 54. Detalle de la cámara de secado. a) Vista en 3D, b) Vista de perfil, c) Vista frontal posterior, d) Vista frontal anterior, e) Vista aérea, f) Bandeja para los granos de cacao.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Objetivos del modelo matemático

El modelo matemático desarrollado, es capaz de predecir el comportamiento de la temperatura en el grano de cacao, la temperatura del aire en cada bandeja, la humedad absoluta del aire, y la humedad en base seca del grano de cacao en función del tiempo. El comportamiento de dichas cuatro variables se puede utilizar para:

- Estudiar la cinética de secado del cacao, basados en el modelo teórico de Fick.
- Predecir el tiempo de secado del cacao.
- Determinar el efecto de diversos parámetros de secado en la eficiencia de la cámara de secado, el costo y la calidad del cacao.
- Optimizar los costos en la construcción de dicho secador.

3.4 Procesos de transferencia de calor y de masa en un secador solar indirecto

El modelo matemático es de no equilibrio, es decir se basan en las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de la transferencia de calor y de masa en una sección de la cámara durante el proceso de secado. En la figura 55A se muestra el esquema de un secador solar indirecto. En la figura 55B se muestra los fenómenos de transferencia de calor y masa en una sección longitudinal de la cámara de secado correspondiente a la primera bandeja. Los granos de cacao están colocados en tres bandejas, y están expuestos solamente al aire desecante que ingresa en la cámara de secado. Debido a esto, el modelo matemático para el secado es un modelo de cama estacionaria.

El aire caliente no saturado de circulación forzada, ingresa a la cámara de secado con unas determinadas condiciones de temperatura, humedad específica y relativa. Al ponerse en contacto con el cacao húmedo se produce simultáneamente una transferencia de masa y de calor (Figura 56). El agua contenida en el cacao se desplaza hacia la interfase cacao-aire y posteriormente, a la corriente de aire desecante.

El gradiente de temperatura entre el aire desecante y el cacao provoca la transferencia de calor. El calor y la transferencia de masa dependen de la temperatura, humedad, y de las propiedades de difusión de la corriente de aire caliente. Al mismo tiempo se producen pérdidas por transferencia de calor por convección, conducción y radiación entre el aire, las paredes internas y externas de la cámara y el ambiente (Figura 55). En resumen, los procesos de transferencia de calor y de masa que ocurren en una sección longitudinal de la cámara de secado son los siguientes:

- Transferencia de masa a través del cacao. Se produce por el fenómeno de difusión (Ver figura 56, proceso numero 4).
- Transferencia de calor por convección entre el aire desecante y la interfase cacao-aire (ver figura 56, proceso numero 1).
- Transferencia de vapor de agua desde la interfase cacao-aire a la corriente de aire P_{ev} (ver figura 55B o figura 5, proceso 5).
- Transferencia de calor desde la interfase al interior del cacao. Se produce solo por conducción (ver figura 56, proceso numero 2).
- Evaporación del agua contenida en el interior del cacao (ver figura 56, proceso 3).
- Transferencia de calor por conducción entre la superficie interior y exterior de la cámara de secado (ver figura 55B).
- Transferencia de calor por convección entre el flujo de aire caliente y las paredes internas de la cámara de secado (ver figura 55B).
- Transferencia de calor por convección entre el aire del ambiente y las paredes externas de la cámara de secado (ver figura 55B).
- Transferencia de calor por radiación entre la pared externa de la cámara de secado hacia el cielo (ver figura 55B).

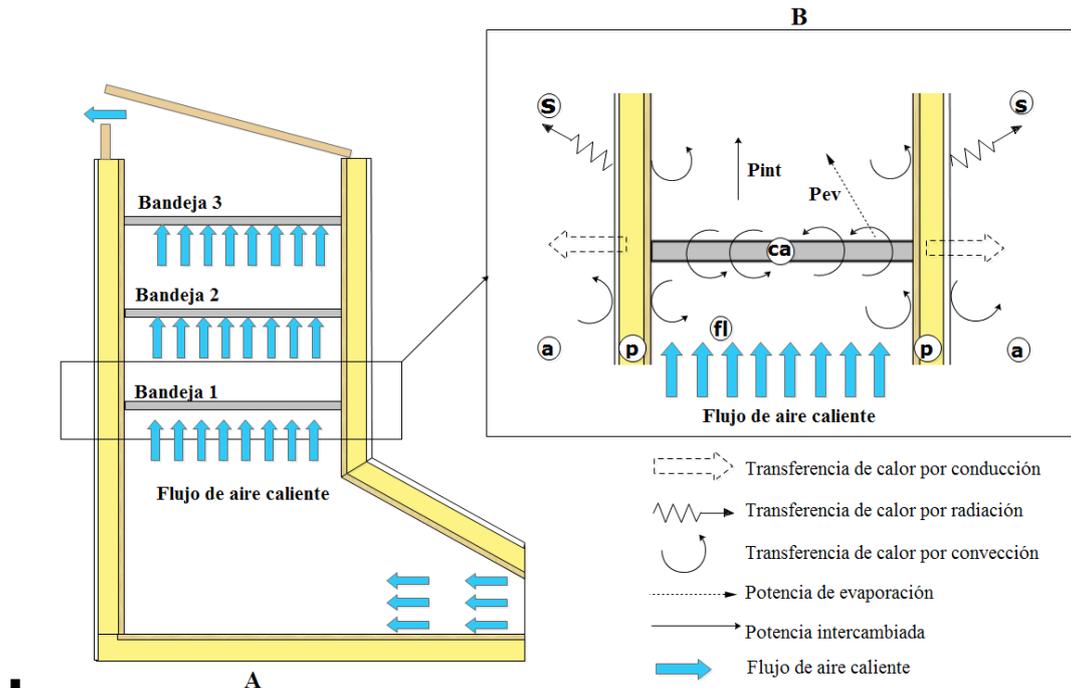


Figura 55. (A) Esquema de una cámara solar indirecta, (B) Fenómenos de transferencia de calor y masa en una sección longitudinal de la cámara correspondiente a la bandeja 1. s: cielo; a: ambiente; p: paredes de la cámara; ca: granos de cacao; fl: aire de secado.

Fuente: Elaboración propia.

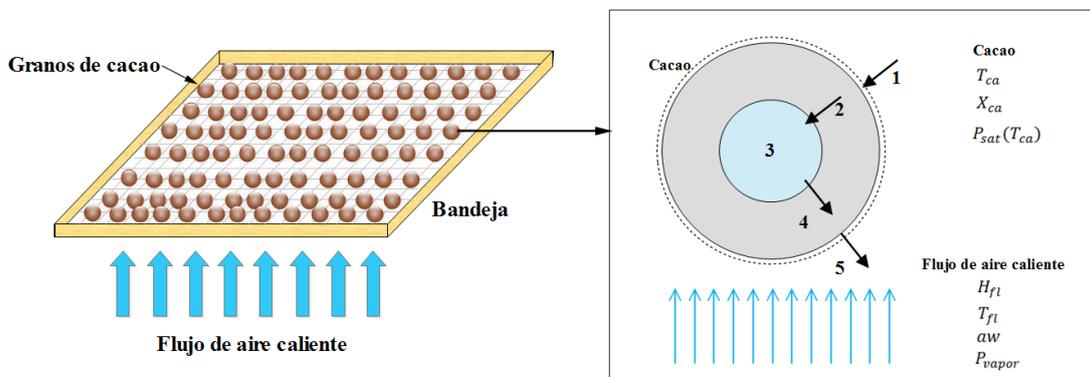


Figura 56. Procesos de transferencia de calor y de masa que ocurren en cada grano de cacao, ubicados en cada bandeja, durante el proceso de secado. 1: Transferencia de calor por convección; 2: Transferencia de calor interna por conducción; 3: Evaporación; 4: Difusión de vapor; 5: Transferencia de masa por convección.

Fuente: Elaboración propia

3.5 Hipótesis para el modelo matemático de la cámara de secado

Como ya se mencionó antes, las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (ODE) del secado de granos de cacao se fundamentan en las leyes de transferencia de calor y de masa y dan lugar a un sistema de ecuaciones en derivadas parciales.

Debido a que el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales del secado de granos de cacao es complejo, se pueden hacer las siguientes hipótesis:

Hipótesis para el aire desecante:

- Las transferencias de calor y masa son unidireccionales.
- El flujo de aire a lo largo de la sección longitudinal de la cámara de secado es constante, unidimensional y uniformemente distribuido en la sección transversal de la cámara de secado.
- La tasa de acumulación de energía térmica y de vapor en aire húmedo intergranular es despreciable, en comparación con las contribuciones de convección de aire desecante forzado.
- La temperatura y humedad específica del aire desecante en cada sección de la cámara, son invariables con el tiempo.
- Los intercambios de calor y masa en cada bandeja están determinados por las condiciones de secado del aire desecante de la bandeja anterior.
- El aire desecante húmedo y sus componentes (vapor de agua y aire seco) se consideran gases ideales a las condiciones de secado.
- La evaporación de la humedad se lleva a cabo a la temperatura del aire desecante.
- No se consideran las fugas de aire en las paredes de la cámara de secado.

Hipótesis para el cacao

- La contracción de volumen en el grano de cacao es despreciable durante el proceso de secado.
- Los gradientes de temperatura dentro de los granos de cacao son insignificantes.
- La tasa de transferencia de masa entre los granos y el aire desecante, para un grano de cacao o para una capa fina de granos es internamente controlada, y la segunda ley de difusión de Fick para materiales homogéneos e isotrópicos, gobierna el movimiento de la humedad de los granos.
- La conducción de calor entre los granos de cacao es despreciable en comparación a la transferencia de calor por convección entre los granos y el aire desecante.
- Los parámetros físicos del cacao y del aire desecante varían “paso a paso” en cada bandeja y desde una bandeja a otra.
- Los granos de cacao se consideran esferas, que tienen la misma área específica de los granos verdaderos y se caracterizan por su temperatura superficial.

- Las ecuaciones de secado y de humedad de equilibrio para los granos de cacao son exactas.

Hipótesis para las pérdidas de calor

- Las pérdidas térmicas en la parte inferior del secador se consideran despreciables.
- Si se consideran las pérdidas de calor a través de las paredes del secador.

3.6 Modelo matemático de no equilibrio de la cámara de secado

3.6.1 Nomenclatura

Primeramente, en la tabla 13 se muestra la nomenclatura de todas las variables y constantes que se van a utilizar en la modelación matemática de la cámara de secado. Se han dividido en tres categorías. La primera categoría son las variables correspondientes al aire desecante, la segunda categoría corresponde a las variables del cacao y la tercera son las constantes que corresponden a la cámara de secado. Al mismo tiempo se muestran las unidades de cada variable.

Tabla 13. Nomenclatura para el desarrollo del modelo matemático

Variables del aire caliente desecante		
T_{fl}	Temperatura del aire desecante	$^{\circ}\text{C}$
T_a	Temperatura del ambiente	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura del cielo	$^{\circ}\text{C}$
H_{fl}	Humedad específica	$\text{kg}_{\text{vapor de agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$
V_{fl}	Velocidad del aire	m/s
ρ_{fl}	Densidad del aire	kg/m^3
C_{fl}	Calor específico del aire seco	$\text{J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$
C_v	Calor específico del vapor de agua	$\text{J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$
C_w	Calor específico del agua	$\text{J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$
G_{fl}	Flujo másico por unidad de área	$\text{kg}/(\text{s m}^2)$
RH	Humedad relativa del aire	%
u_{fl}	Viscosidad del aire	$\text{kg}/(\text{m s})$
h_{flca}	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el aire y el cacao	$\text{J}/(\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C})$
h_{flpi}	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el aire y las paredes internas de la cámara de secado	$\text{J}/(\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C})$
h_{cp}	Coefficiente de transferencia de calor por conducción entre las paredes de la cámara de secado y el ambiente	$\text{J}/(\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C})$
h_{rc}	Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre las paredes externas de la cámara de secado y el ambiente	$\text{J}/(\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C})$
h_{vv}	Coefficiente de transferencia de calor por convección causado por el viento	$\text{J}/(\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C})$
T_{pi}	Temperatura de las paredes internas de la cámara de secado	$^{\circ}\text{C}$
T_{pe}	Temperatura de las paredes externas de la cámara de secado	$^{\circ}\text{C}$
Variables del cacao		
T_{ca}	Temperatura del cacao	$^{\circ}\text{C}$
M	Humedad del cacao	$\text{db}(\%)$
M_e	Humedad de equilibrio	$\text{db}(\%)$
D_{e-ca}	Difusividad efectiva del cacao	m^2/s
C_{ca}	Calor específico del cacao	$\text{J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$
ρ_{ca}	Densidad del cacao	kg/m^3
a_{ca}	Superficie específica del cacao	m^2/m^3
h_{fg}	Calor latente de vaporización del cacao	J/kg
K	Constante cinética del cacao	$1/\text{s}$
Constantes		
S	Superficie de las bandejas	m^2
L	Longitud de la cámara de secado	m
ε	Porosidad del cacao	--
x	Posición	m
t	Tiempo	hrs
S_p	Superficie de las paredes de la cámara de secado	m^2
e_v	Espesor de la fibra de vidrio	m
e_y	Espesor de la plancha de yeso	m
e_m	Espesor de la madera prensada OSV	m
k_v	Conductividad de la fibra de vidrio	$\text{W}/(\text{K m})$
k_y	Conductividad de la plancha de yeso	$\text{W}/(\text{K m})$
k_m	Conductividad de la madera prensada OSV	$\text{W}/(\text{K m})$
Δt	Variación del tiempo	hrs
Δx	Variación de la posición a lo largo de la cámara de secado	m

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Formulación del modelo matemático

En la figura 57 se muestra un elemento diferencial de volumen localizado en una posición arbitraria de la cámara de secado. Dicho elemento diferencial tiene un espesor de dx . Teniendo en cuenta dicho elemento diferencial se plantea las ecuaciones de transferencia de calor y de masa del aire desecante y el cacao.

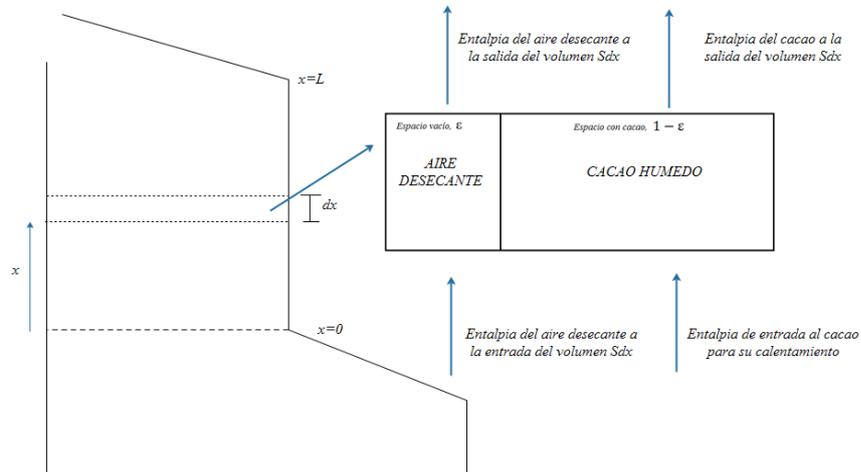


Figura 57. Elemento diferencial de volumen para la modelación matemática
Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.1 Balance de energía para el aire desecante

Observando la figura 57, se plantea el siguiente balance de energía:

*[El cambio en el calor sensible del aire dentro del volumen de control]=
[Entalpia del flujo del aire hacia el interior del volumen de control Sdx]-
[Entalpia del flujo del aire hacia afuera del volumen de control Sdx]-[Calor
intercambiado por convección entre el aire desecante y el cacao]-[pérdidas en
las paredes de la cámara de secado]*

El cambio en el calor sensible del aire dentro del volumen de control Sdx se define en la ecuación 3.1.

$$q_s = (\rho_{fl}V_{fl}C_{fl} + \rho_{fl}V_{fl}H_{fl}C_v) \frac{\partial T_{fl}}{\partial x} dx S dt \quad (3.1)$$

La entalpia del flujo del aire hacia el interior del volumen de control Sdx , se determina en la ecuación 3.2. La entalpia del flujo del aire hacia afuera del volumen de control Sdx se muestra en la ecuación 3.3. El calor intercambiado por convección entre el aire desecante y el cacao se muestra en la figura 3.4.

$$h_{in} = (\rho_{fl}V_{fl}C_{fl} + \rho_{fl}V_{fl}H_{fl}C_v)ST_{fl} dt \quad (3.2)$$

$$h_{out} = (\rho_{fl} V_{fl} C_{fl} + \rho_{fl} V_{fl} H_{fl} C_v) (T_{fl} + \frac{\partial T_{fl}}{\partial x} dx) S dt \quad (3.3)$$

$$q_c = h_{flca} a_{ca} (T_{fl} - T_{ca}) S dx dt \quad (3.4)$$

Para calcular las pérdidas de calor en las paredes, se utiliza el esquema que se muestra en la figura 58.

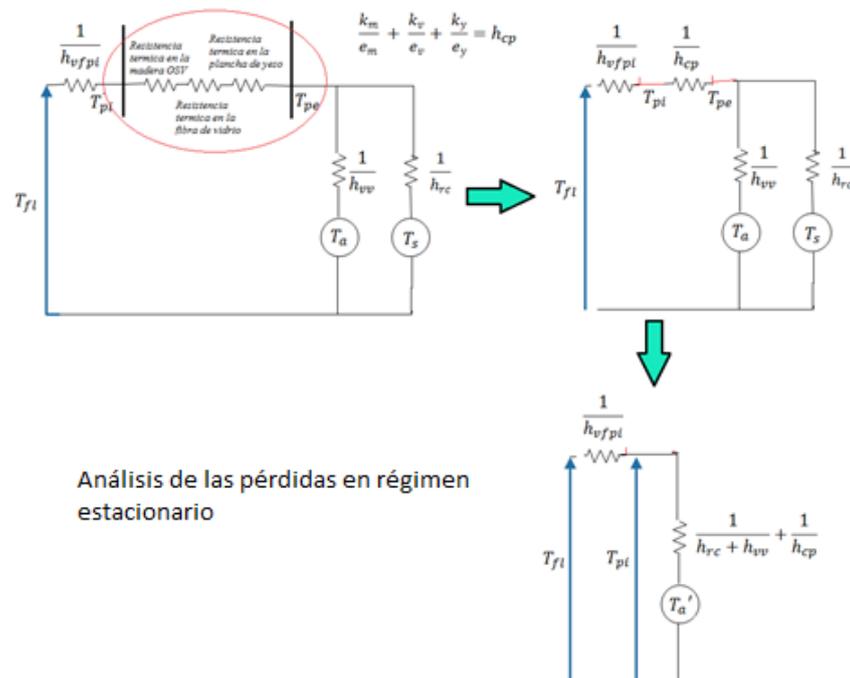


Figura 58. Resistencias térmicas para calcular las pérdidas hacia el exterior en la cámara de secado

Fuente: Elaboración propia

Donde T_{pi} representa la temperatura superficial promedio de la pared interna de la cámara de secado. Este valor se determina mediante resistencias térmicas que se muestra en la ecuación 3.5. El cálculo de la temperatura T_a' se muestra en la ecuación 3.6.

$$T_{pi} = \frac{h_{flpi}(h_{cp} + h_{rc} + h_{vv})T_{fl} + h_{cp}(h_{rc} + h_{vv})T_a'}{h_{cp}(h_{rc} + h_{vv}) + h_{flpi}(h_{cp} + h_{rc} + h_{vv})} \quad (3.5)$$

$$T_a' = \frac{\frac{T_a}{h_{rc}} + \frac{T_s}{h_{vv}}}{\frac{1}{h_{rc}} + \frac{1}{h_{vv}}} = \frac{T_a h_{vv} + T_s h_{rc}}{h_{vv} + h_{rc}} \quad (3.6)$$

Entonces, las pérdidas térmicas se calculan de la siguiente manera (ecuación 3.7).

$$p\acute{e}rdidas = h_{flpi} S_p (T_{fl} - T_{pi}) \quad (3.7)$$

Finalmente, reemplazando las ecuaciones 3.1, a la 3.7, en la ecuación de balance de energía queda como se muestra en la ecuación 3.8.

$$q_s = h_{in} - h_{out} - q_c - p\acute{e}rdidas \quad (3.8)$$

Tomando en cuenta las suposiciones del modelo matemático y despejando adecuadamente la ecuación para el balance de calor en el aire desecante queda (ecuación 3.9):

$$\frac{\partial T_{fl}}{\partial x} = \frac{-h_{flca} a_{ca}}{G_{fl} C_{fl} + G_{fl} C_v H_{fl}} (T_{fl} - T_{ca}) - h_{flpi} S_p (T_{fl} - T_{pi}) \quad (3.9)$$

3.6.2.2 Balance de energía en el cacao

Observando la figura 57, se plantea el siguiente balance de energía:

[Cambio de la energía interna en el cacao en el elemento diferencial de volumen Sdx] = [Calor intercambiado por convección entre el aire desecante y el cacao] - [Energía para evaporar la humedad del producto]

El cambio de la energía interna en el cacao en el elemento diferencial de volumen Sdx se muestra en la ecuación 3.10.

$$q_{s-ca} = (1 - \varepsilon) (\rho_{ca} C_{ca} + \rho_{ca} \bar{M} C_w) S dx \left(\frac{\partial T_{ca}}{\partial t} \right) dt \quad (3.10)$$

El calor intercambio por convección entre el aire desecante y el cacao se muestra en la ecuación 3.11.

$$q_c = h_{flca} a_{ca} (T_{fl} - T_{ca}) S dx dt \quad (3.11)$$

La energía para evaporar la humedad del cacao se muestra en la ecuación 3.12.

$$E_{evap} = (h_{fg} + (T_{fl} - T_{ca}) C_v) G_{fl} \frac{\partial H_{fl}}{\partial x} S dx dt \quad (3.12)$$

Finalmente, reemplazando las ecuaciones 3.10, 3.11 y 3.12, en la ecuación de balance de energía, queda como se muestra en la ecuación 3.13.

$$q_{s-ca} = q_c - E_{evap} \quad (3.13)$$

Tomando en cuenta las suposiciones del modelo matemático y despejando adecuadamente la ecuación para el balance de energía en el aire desecante queda (ecuación 3.14):

$$\frac{\partial T_{ca}}{\partial t} = \frac{h_{flca} a_{ca} (T_{fl} - T_{ca})}{(1 - \varepsilon)(\rho_{ca} C_{ca} + \rho_{ca} \bar{M} C_w)} - \frac{h_{fg} + (T_{fl} - T_{ca}) C_v}{(1 - \varepsilon)(\rho_{ca} C_{ca} + \rho_{ca} \bar{M} C_w)} G_{fl} \frac{\partial H_{fl}}{\partial x} \quad (3.14)$$

3.6.2.3 Balance de masa del aire intergranular

[Cambio en la humedad absoluta en el elemento diferencial de volumen Sdx] = -[Calor intercambiado por convección entre el aire desecante y el cacao] - [Energía para evaporar la humedad del producto]

$$\rho_{fl} \left[\varepsilon \frac{\partial H_{fl}}{\partial t} + V_{fl} \frac{\partial H_{fl}}{\partial x} \right] = -\rho_{ca} (1 - \varepsilon) \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.15)$$

Teniendo en cuenta las hipótesis, la ecuación 3.15 se reduce a la ecuación 3.16.

$$\rho_{fl} V_{fl} \frac{\partial H_{fl}}{\partial x} = -(1 - \varepsilon) \rho_{ca} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.16)$$

Finalmente, la ecuación 3.16 queda (ecuación 3.17):

$$\frac{\partial H_{fl}}{\partial x} = -(1 - \varepsilon) \frac{\rho_{ca}}{G_{fl}} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.17)$$

3.6.2.4 Balance de masa en el grano de cacao

La ecuación de balance de masa para el cacao está dada por la ecuación de velocidad de secado de capa fina (ecuación 3.18) (Aregba et al., 2006).

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = -K(\bar{M} - \bar{M}_e) \quad (3.18)$$

Donde K es la constante cinética, que depende de la temperatura del cacao durante el secado, como se muestra en la ecuación 3.19. Donde a_{ca} es la superficie específica del cacao (Aregba et al., 2006).

$$K = \frac{\pi^2}{9} a_{ca}^2 D_{e-ca} \quad (3.19)$$

3.6.3 Condiciones iniciales y de frontera

Las ecuaciones anteriores, se basan en la transferencia de calor y de masa para el aire desecante y en el cacao en un elemento diferencial de volumen, ubicado arbitrariamente en una posición x a lo largo de la cámara de secado.

Estas ecuaciones siguen siendo las mismas sin importar las condiciones térmicas de entrada. Es decir, estas ecuaciones no incorporan información relacionada a las condiciones térmicas de entrada al modelo matemático. Pero se sabe que la temperatura y la humedad específica del aire a lo largo de la cámara de secado dependen de las condiciones térmicas en la superficie, en la posición x (ver figura 57).

Como se puede observar en la figura 57, para iniciar la simulación del modelo matemático de la cámara de secado, se necesitan las expresiones matemáticas en la posición $x = 0$, de la cámara de secado. Dichas expresiones matemáticas son las condiciones de frontera, y son las siguientes (ecuaciones 3.20 y 3.21):

$$T_{fl}(0, t) = T_{sal-col}, \quad t \geq 0 \quad (3.20)$$

$$H_{fl}(0, t) = H_{sal-col}, \quad t \geq 0 \quad (3.21)$$

La temperatura y la humedad del cacao (db) en una posición arbitraria x , en un momento dado, también depende de las condiciones de pared al inicio del proceso de secado. Entonces, se necesitan las expresiones matemáticas en el tiempo $t = 0$, para la temperatura y humedad del cacao. Dichas expresiones matemáticas para la distribución de temperatura y humedad del cacao, se denominan condiciones iniciales y son (ecuaciones 3.22 y 3.23):

$$T_{ca}(x, 0) = T_{ca0}, \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.22)$$

$$\bar{M}_{ca}(x, 0) = \bar{M}_{ca0}, \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.23)$$

3.6.4 Discretización del modelo matemático por diferencias finitas

Luego de la formulación del sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de la cámara de secado para cacao, y la definición de las condiciones iniciales y de frontera, el siguiente paso es resolver el modelo matemático.

Como en el modelo matemático, hay muchas ecuaciones en derivadas parciales (EDPs) que describen el transporte de calor y de masa y muchas ecuaciones no lineales que describen las propiedades y dinámica del secado de cacao, es muy difícil resolver el modelo analíticamente, por esta razón se utiliza el método de diferencias finitas para discretizar el sistema de EDPs.

En la figura 59, se muestra el esquema del mallado de diferencias finitas para el modelo bidimensional de la cámara de secado de cacao en coordenadas rectangulares.

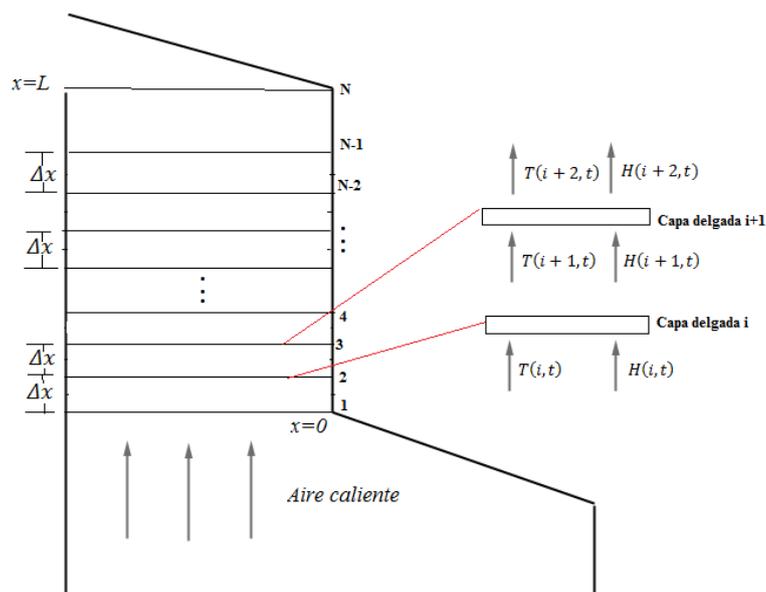


Figura 59. Diagrama esquemático del mallado en diferencias finitas de la cámara de secado

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 59, se ha dividido en varias capas delgadas a la cama donde se ubican los granos de cacao. La sección longitudinal de la cama donde se ubica el cacao, se divide en N nodos con $\Delta x = L/N$ pasos espaciales a lo largo de la dirección longitudinal de la cámara de secado. El valor del parámetro físico Φ () en algún punto N_i en el tiempo $t + \Delta t$ se denota como $\Phi_i^{t+\Delta t}$. Las ecuaciones del modelo matemático se integran a lo largo del volumen de control para una posición i y sobre un intervalo de tiempo $[t, t + \Delta t]$.

Con el fin de discretizar las ecuaciones del modelo matemático, se supone lo siguiente:

- El flujo de aire es constante en el lado perpendicular del volumen de control, que es perpendicular al flujo.
- Los términos en derivadas parciales, pueden ser aproximados por medio de diferencias finitas hacia adelante.

Teniendo en cuenta las hipótesis anteriores, las primeras derivadas espaciales para una propiedad física Φ se aproximan mediante series de Taylor de segundo orden (Mabrouk et al., 2006), desarrollado alrededor de $(i + 1)$ y i , que son los límites del volumen de control diferencial ubicado en la posición i (ecuación 3.24).

$$\frac{\Phi_{j+1}^{i+1} - \Phi_{j+1}^i}{\Delta x} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_{j+1}^i + \delta(\Delta x^2) \quad (3.24)$$

Para las derivadas parciales temporales (ecuación 3.25):

$$\frac{\Phi_{j+1}^{i+1} - \Phi_j^{i+1}}{\Delta t} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_{j+1}^{i+1} + \delta(\Delta t^2) \quad (3.25)$$

Las derivadas parciales para las cuatro variables del modelo matemático, quedan aproximadas por el método de diferencias finitas de la siguiente forma (ecuaciones 3.26, 3.27, 3.28 y 3.29):

$$\left(\frac{\partial T_{fl}}{\partial x}\right)_{j+1}^i = \frac{T_{fl_{j+1}}^{i+1} - T_{fl_{j+1}}^i}{\Delta x} \quad (3.26)$$

$$\left(\frac{\partial H_{fl}}{\partial x}\right)_{j+1}^i = \frac{H_{fl_{j+1}}^{i+1} - H_{fl_{j+1}}^i}{\Delta x} \quad (3.27)$$

$$\left(\frac{\partial T_{ca}}{\partial t}\right)_{j+1}^{i+1} = \frac{T_{ca_{j+1}}^{i+1} - T_{ca_j}^{i+1}}{\Delta t} \quad (3.28)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{M}_{ca}}{\partial t}\right)_{j+1}^{i+1} = \frac{\bar{M}_{ca_{j+1}}^{i+1} - \bar{M}_{ca_j}^{i+1}}{2\Delta t} \quad (3.29)$$

Primeramente, se calcula la humedad del cacao para el tiempo $j + 1$. Este cálculo se realiza mediante el método de Runge Kutta de cuarto orden, porque es una ecuación diferencial que solo depende del tiempo (ecuaciones 3.30, a la 3.34).

$$\frac{\partial \bar{M}_{ca}}{\partial t} = -K(\bar{M}_{ca} - \bar{M}_{eq}) \quad (3.30)$$

$$k_1 = -K(\bar{M}_{ca_j}^{i+1} - \bar{M}_{eq}) \quad (3.31)$$

$$k_2 = -K(\bar{M}_{ca_j}^{i+1} + 0.05k_1 - \bar{M}_{eq}) \quad (3.32)$$

$$k_3 = -K(\bar{M}_{ca_j}^{i+1} + 0.05k_2 - \bar{M}_{eq}) \quad (3.33)$$

$$k_4 = -K(\bar{M}_{ca_j}^{i+1} + 0.1k_3 - \bar{M}_{eq}) \quad (3.34)$$

La humedad del cacao, para el instante $j + 1$ es (ecuación 3.35):

$$\bar{M}_{ca_{j+1}}^{i+1} = \bar{M}_{ca_j}^{i+1} + 0.0167(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.35)$$

Luego, dicho valor de humedad en el cacao, se reemplaza en las ecuaciones discretizadas que se muestran a continuación.

Ecuación del balance de masa en el aire desecante (ecuación 3.36):

$$\frac{H_{flj+1}^{i+1} - H_{flj+1}^i}{\Delta x} = - \left(\frac{\rho_{ca}}{G_{fl}} \right) \frac{\bar{M}_{caj+1}^{i+1} - \bar{M}_{caj}^{i+1}}{2\Delta t} \quad (3.36)$$

Balance de energía en el cacao (ecuación 3.37):

$$\frac{T_{caj+1}^{i+1} - T_{caj}^{i+1}}{\Delta t} = \frac{h_{flca} a_{ca} (T_{flj+1}^i - T_{caj}^{i+1})}{\rho_{ca} C_{ca} + \rho_{ca} \bar{M} C_w} - \frac{h_{fg} + (T_{flj+1}^{i+1} - T_{caj}^{i+1}) C_v}{\rho_{ca} C_{ca} + \rho_{ca} \bar{M} C_w} G_{fl} \frac{H_{flj+1}^{i+1} - H_{flj+1}^i}{\Delta x} \quad (3.37)$$

Balance de energía intergranular en el aire desecante (ecuación 3.38):

$$\frac{T_{flj+1}^{i+1} - T_{flj+1}^i}{\Delta x} = \frac{-h_{flca} a_{ca}}{G_{fl} C_{fl} + G_{fl} C_v H_{fl}} (T_{flj+1}^i - T_{caj}^{i+1}) \quad (3.38)$$

3.7 Parámetros para el aire desecante húmedo

A continuación, se muestran las propiedades del aire húmedo que se consideran para la simulación del modelo matemático de la cámara de secado.

3.7.1 Calor específico del aire seco

El calor específico para el aire seco se muestra en la ecuación 3.39 (Liu et al., 2015).

$$C_{fl} = 1003.4 + 0.178T_{fl} \quad (3.39)$$

Donde T_{fl} es la temperatura del aire desecante en °C.

3.7.2 Calor específico del vapor de agua

El calor específico para el vapor de agua se muestra en la ecuación 3.40 (Liu et al., 2015).

$$C_v = 1859 + 0.236T_{fl} \quad (3.40)$$

Donde T_{fl} es la temperatura del aire desecante en °C.

3.7.3 Humedad relativa

La humedad relativa para el aire a la salida del colector se muestra en la ecuación 3.41 (Liu et al., 2015).

$$RH = \frac{1.626H_{fl}/(1 + 1.608H_{fl}) \times 10^5}{6892.4 \exp[54.633 - \frac{12301.69}{1.8T_{fl} + 492} - 5.169 \ln(1.8T_{fl} + 492)]} \quad (3.41)$$

Donde T_{fl} es la temperatura del aire desecante en °C

3.8 Parámetros del cacao

A continuación, se muestran las propiedades del cacao que se consideran para la simulación de la cámara de secado.

3.8.1 Calor específico del cacao

El calor específico del cacao, se muestra en la ecuación 3.42. Como se puede apreciar el calor específico varía con el contenido de humedad del cacao (Bart-Plange y Baryeh., 2003).

$$C_{ca} = 1755 + 23.45M \quad (3.42)$$

La humedad del cacao $M(\%db)$ esta en base seca.

3.8.2 Densidad del cacao

La densidad del cacao se muestra en la ecuación 3.43. Como se puede observar la densidad depende de la temperatura en el cacao (Hii et al., 2013).

$$\rho_{ca} = -0.008T_{ca}^2 + 4.7188T_{ca} + 408.42 \quad (3.43)$$

Sin embargo, en la literatura existen muchas más ecuaciones como por ejemplo: la ecuación 3.44, donde la densidad del cacao depende del contenido de humedad en el cacao (Bart-Plange y Baryeh., 2003).

$$\rho_{ca} = 726.47 - 4.1352M \quad (3.44)$$

La humedad del cacao $M(\%wb)$ esta en base húmeda.

3.8.3 Diámetro equivalente del cacao

El diámetro equivalente promedio en el cacao se determina con la ecuación 3.45. Es importante determinar el diámetro equivalente porque en las suposiciones se considera al cacao como una esfera. En la figura 60 se muestra un diagrama de las dimensiones del cacao para tener una idea mucho más clara de cómo determinar el diámetro equivalente (Bart-Plange y Baryeh., 2003).

$$D_{ca} = (D_1 D_2 D_3)^{1/3} \quad (3.45)$$

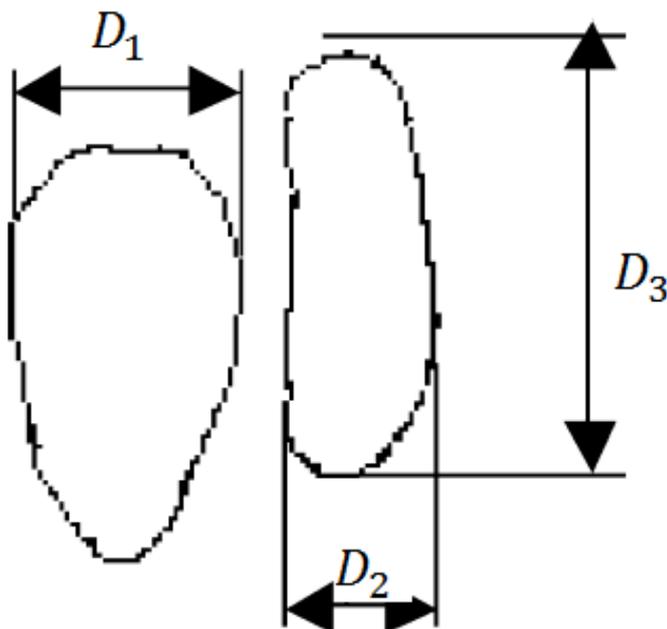


Figura 60. Diagrama esquemático de las dimensiones de un grano de cacao
Fuente: Elaboración propia.

3.8.4 Superficie específica del cacao

La superficie específica del cacao se muestra en la ecuación 3.46. Como se puede observar está en función del diámetro equivalente (Bart-Plange y Baryeh., 2003).

$$a_{ca} = \frac{6}{D_{ca}} \quad (3.46)$$

Donde D_{ca} es el diámetro equivalente del cacao en m.

3.8.5 Calor latente de vaporización del cacao

El calor latente de vaporización del cacao se muestra en la ecuación 3.47 (Mabrouk et al., 2006).

$$h_{fg} = 2501.6 + (C_v - C_w)(T_{ca} + 273) \quad (3.47)$$

Donde T_{ca} es la temperatura del aire desecante en °C.

3.9 Estructura del algoritmo para la simulación

A continuación, se detalla las etapas del programa de cálculo en MATLAB para la solución del modelo matemático de la cámara de secado:

3.9.1 Etapa de pre proceso

En esta parte, se presentan las variables de entrada al modelo, que deben ser inicializadas con sus valores correspondientes previo al cálculo de la simulación. En la tabla 14 se muestran las variables termodinámicas de entrada al modelo correspondientes al aire desecante y al cacao. Luego, en la tabla 15 se muestran los parámetros de dimensionamiento de entrada al modelo. Finalmente, en la tabla 16 se muestran los parámetros adicionales para el desarrollo del programa.

Tabla 14. Variables termodinámicas de entrada correspondientes al aire desecante y al cacao

Símbolo	Descripción	Unidades
T_{fl}	Temperatura del aire desecante en la entrada de la cámara de secado.	°C
ω	Humedad específica del aire a la entrada de la cámara de secado	kg de vapor/kg de aire seco
T_{ca}	Temperatura inicial del cacao	°C
M	Humedad en base seca inicial del cacao	kg de agua/kg de producto seco

Fuente: elaboración propia

Tabla 15. Parámetros de dimensionamiento de la cámara de secado

Símbolo	Descripción	Unidades
L	Altura de la cámara de secado.	m
l_1	Ancho de la cámara de secado	m
l_2	Largo de la cámara de secado	m
e_m	Espesor de la madera OSV (material de la cámara de secado)	m
e_v	Espesor de la fibra de vidrio	m
e_y	Espesor de la plancha de yeso	m
S_p	Área de las paredes de la cámara de secado	m^2

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Parámetros adicionales para el desarrollo de la simulación

Símbolo	Descripción	Unidades
D_{ca}	Diámetro equivalente del cacao	m
a_{ca}	Superficie específica del cacao	m^2/m^3
t_{final}	Tiempo final de simulación	h
Δx	Paso espacial de iteración a lo largo de la longitud de la cámara de secado	m
Δt	Paso temporal para cada iteración en la simulación	h
N	Numero de divisiones a la longitud de la cámara de secado	--

Fuente: Elaboración propia

3.9.2 Etapa de proceso

En el siguiente apartado se explica el algoritmo de simulación en MATLAB que se realizó para la solución de las ecuaciones de la cámara de secado.

Como se explicó antes, primeramente, se discretiza el modelo matemático y despeja cada variable independiente (Temperatura del cacao, temperatura del aire desecante, humedad en base seca del cacao, humedad específica del aire) de modo que cada variable se calcule para cada nodo durante un instante de tiempo de simulación. Luego de discretizar las ecuaciones se deben ingresar los parámetros del apartado anterior.

El programa de simulación requiere una secuencia de pasos descrito en el diagrama de flujo mostrado en la figura 61.

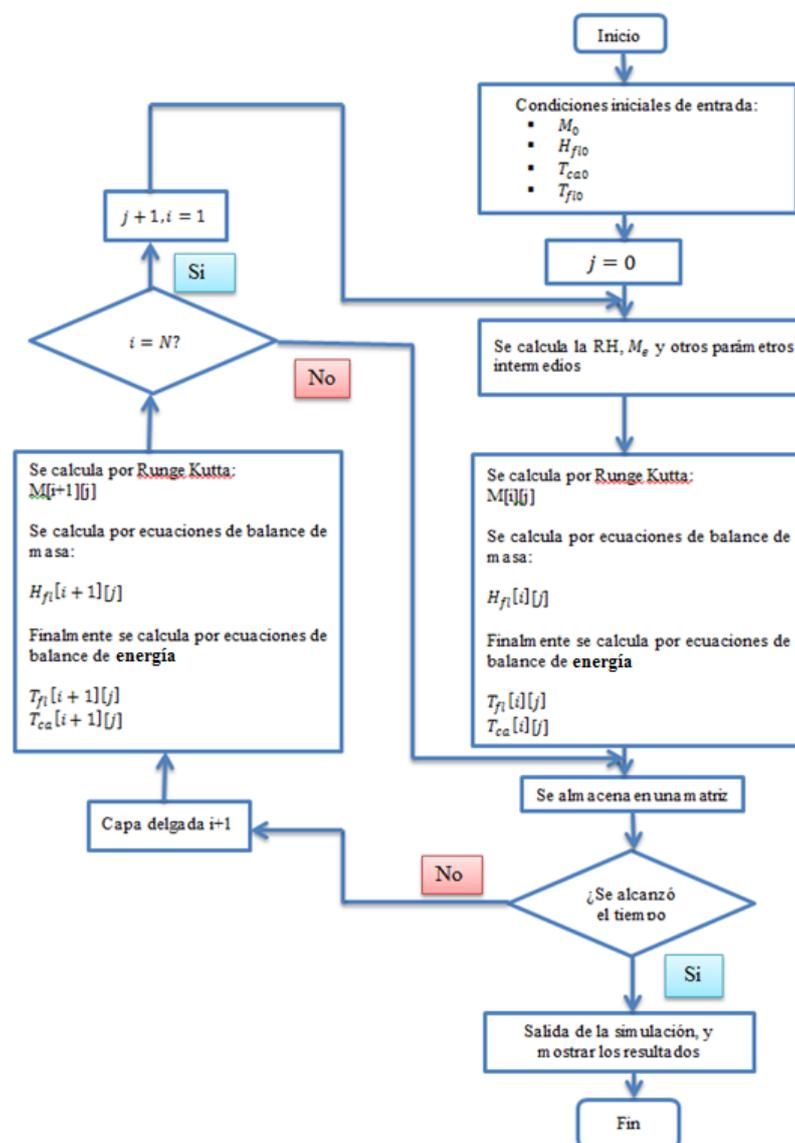


Figura 61. Diagrama de flujo que se utilizó para la solución del modelo matemático

Fuente: Elaboración propia.

3.9.3 Etapa de post proceso

Los valores resultantes que se desean evaluar e interpretar son: la humedad en base seca del cacao, la temperatura del cacao, la temperatura del aire desecante y la humedad específica del aire desecante, utilizando para su simulación los datos de entrada antes mencionados. En el siguiente apartado se analiza los comportamientos de las variables antes mencionadas.

3.10 Datos del programa de simulación

A continuación, se presentan los valores de entrada, que se describieron en la parte de pre proceso del programa para poder realizar la simulación numérica, al mismo tiempo se relaciona el símbolo del modelo matemático con la variable computacional utilizada en el programa. Los parámetros con valores de – no se especifican, porque dependen de otros parámetros o se calculan en base a las ecuaciones del modelo matemático. En la tabla 17 se muestran los valores de entrada de las variables termodinámicas del aire desecante y el cacao.

Tabla 17. Valores de entrada de las variables termodinámicas de entrada (aire desecante y cacao)

Símbolo	Descripción	Unidades	Variable computacional	Valor y/o unidad
T_{fl}	Temperatura del aire desecante a la entrada de la cámara de secado	°C	Tfl	--
T_{ca}	Temperatura inicial del cacao	°C	Tca	20
H_{fl}	Humedad específica a la entrada de la cámara de secado	kg de vapor/kg de aire seco	Hfl	0.01
T_a	Temperatura del ambiente	°C	Ta	--
M	Humedad inicial del cacao	%db	M	127

Fuente: elaboración propia

La temperatura ambiente y la temperatura de entrada a la cámara de secado se tomaron para un determinado día (15/01/2016). A partir de estos datos, se realizó un ajuste por series de Fourier de 8 armónicos para la temperatura del ambiente y de 7 armónicos para la temperatura a la entrada a la cámara de secado con el objetivo de poder simular para los siguientes días (Anexo – A).

En la tabla 18 y tabla 19 se muestran los valores de entrada para los parámetros dimensionales de la cámara de secado y los valores de los datos adicionales para la simulación. Al mismo tiempo se muestra su respectiva descripción, unidades y la variable computacional.

Tabla 18. Valores de entrada de los parámetros de dimensionamiento de la cámara de secado

Símbolo	Descripción	Unidades	Variable computacional	Valor y/o unidad
L	Altura de la cámara de secado.	m	L	0.5
l_1	Ancho de la cámara de secado	m	l1	0.53
l_2	Largo de la cámara de secado	m	l2	0.51
e_m	Espesor de la madera OSV (material de la cámara de secado)	m	em	0.0025
e_v	Espesor de la fibra de vidrio	m	ev	0.006
e_y	Espesor de la plancha de yeso	m	ey	0.0015
S_p	Área de las paredes de la cámara de secado	m^2	Sp	0.35
k_v	Conductividad de la fibra de vidrio	$J/(s\ m\ ^\circ C)$	kv	0.05
k_y	Conductividad de la plancha de yeso	$J/(s\ m\ ^\circ C)$	ky	0.35
k_m	Conductividad de la madera OSV	$J/(s\ m\ ^\circ C)$	km	0.13
v	Velocidad del viento	m/s	v	1
h_{fipi}	Coefficiente de convección entre el aire desecante y las paredes interiores de la cámara de secado	$J/(m^2\ s\ ^\circ C)$	hfipi	4.1
m_a	Flujo másico	kg/s	ma	0.028

Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Valores de entrada de los parámetros adicionales para el desarrollo de la simulación

Símbolo	Descripción	Unidades	Variable computacional	Valor y/o unidad
D_{ca}	Diámetro equivalente del cacao	m	D0	0.008
a_{ca}	Superficie específica del cacao	m^2/m^3	as	784
t_{final}	Tiempo final de simulación	h	tfinal	108
Δx	Paso espacial de iteración	m	x	0.125
Δt	Paso temporal de iteración	hrs	h	0.5
N	Numero de divisiones a la longitud de la cámara de secado	--	N	4

Fuente: elaboración propia

3.11 Simulación de la cámara de secado

La simulación de la cámara de secado se llevó a cabo, utilizando los valores de entrada del apartado anterior. Se simuló el comportamiento de la humedad del cacao, la temperatura del cacao, la temperatura del aire desecante, y el contenido de humedad específica en el aire desecante, para tres bandejas, ubicadas a lo largo de la cámara de secado.

Luego de iniciar la simulación, se obtuvieron las gráficas de cada variable de interés, así como también la velocidad de secado, que es una variable importante en el análisis de la dinámica del secado (Anexo – B).

3.11.1 Análisis del contenido de humedad en el cacao

En la figura 62, se muestra el resultado de la simulación de la humedad del cacao (%*db*) versus el tiempo de secado en horas en tres bandejas de secado bajo las condiciones iniciales que se detallaron en la tabla 17. El cacao ubicado en cada bandeja, se seca desde una humedad inicial de 127% *db* hasta una humedad de 7.6% *db*. La humedad final corresponde a una humedad de 7.06% *wb*, la cual corresponde con las condiciones de calidad y para asegurar el adecuado almacenamiento posterior del cacao. La reducción del contenido de humedad, es de forma descendente de la bandeja 1 a la bandeja 3, debido a que la temperatura en el cacao decrece de la bandeja 1 a la bandeja 3.

Suponiendo que el secado inicia entre las 6:00 am a 7:00 am, para cada bandeja, la curva de humedad (figura 62) muestra que la caída de humedad por las noches es muy pequeña, debido a que la temperatura del aire desecante disminuye en las noches. Luego del amanecer del siguiente día, la humedad vuelve a bajar fuertemente. Por lo tanto, bajo las condiciones de secado ingresadas en el modelo, el secador solar permite alcanzar contenido de humedad final de entre 7 y 8 % *wb* después de 4 días de secado.

Las simulaciones también mostraron que las curvas de secado fueron casi similares para las tres bandejas de la cámara, esto demuestra que la posición de la bandeja no tiene una influencia significativa en la cinética de secado de cacao para una cámara de secado de aproximadamente 0.5 m de altura.

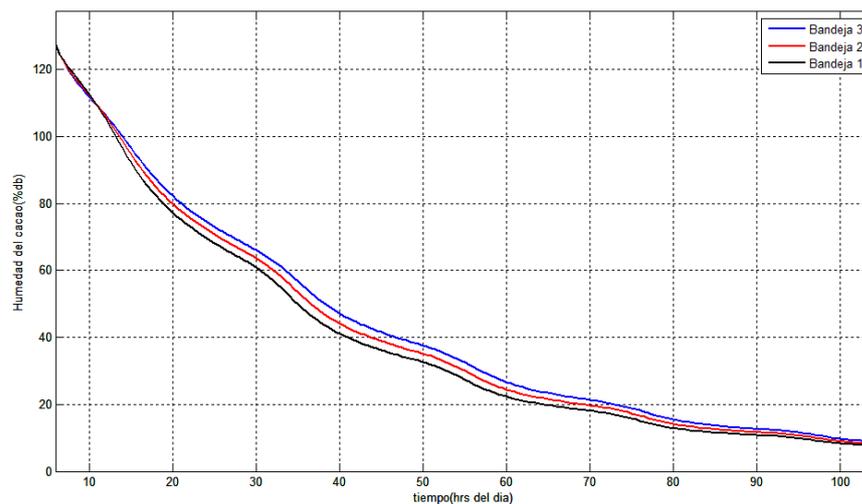


Figura 62. Humedad del cacao en %db durante el secado solar indirecto
Fuente: Elaboración propia.

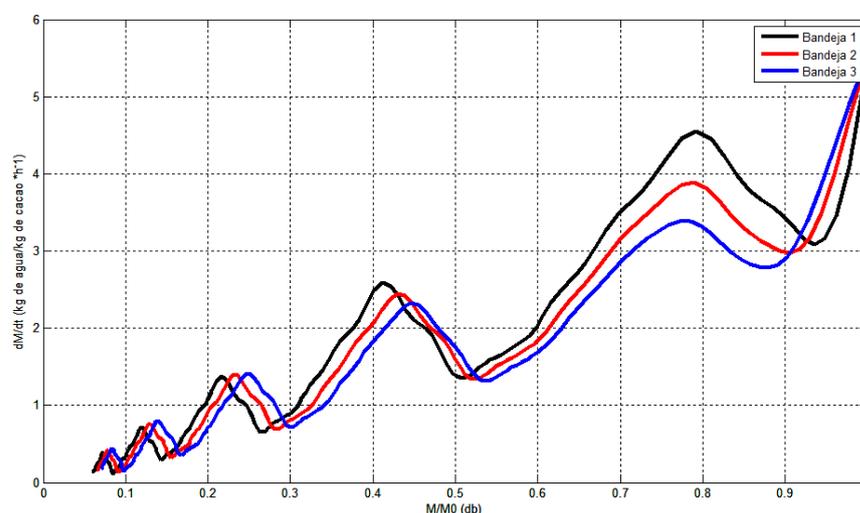


Figura 63. Velocidad de secado de cacao para cada bandeja
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 63, se muestra el efecto del contenido de humedad sobre la velocidad de secado ($kg\ de\ agua/kg\ de\ cacao\ h^{-1}$). Como se puede apreciar, para cada bandeja se muestran las tres etapas de secado estudiadas en el capítulo 1 de la tesis.

Para las tres bandejas, al inicio hay una caída en la velocidad de secado porque se produce un enfriamiento en el cacao, luego hay un incremento de la velocidad, donde se produce la evaporación de la humedad libre y finalmente una caída de la velocidad donde se produce la evaporación de la humedad ligada del cacao.

En la figura 64 también se puede observar que las máximas velocidad de secado se obtienen en el primer día de secado. Esto se debe a que en el primer día, el gradiente de concentración de humedad es mayor en comparación con los siguientes días.

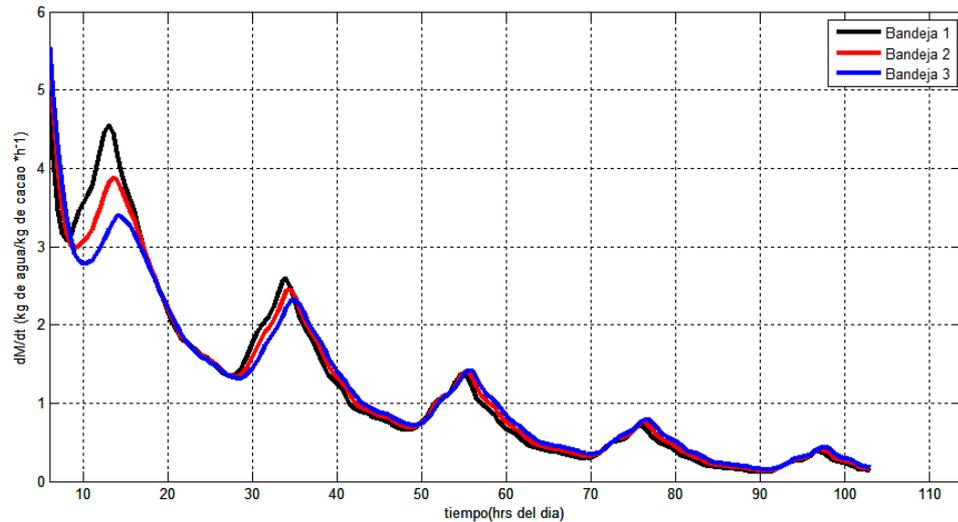


Figura 64. Velocidad de secado de cacao para cada bandeja
Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de secado en cada bandeja ($\text{kg de agua/kg de cacao h}^{-1}$) versus el tiempo de secado se muestra en la figura 64. Luego de la fase de enfriamiento del cacao, la máxima velocidad de secado es de 4.5 ($\text{kg de agua/kg de cacao h}^{-1}$) en la bandeja 1 a las 7 hrs de secado (01:00 pm). El descenso de la velocidad de secado de la bandeja 1 a la bandeja 3 se debe a la disminución de la temperatura del cacao de la bandeja 1 a la bandeja 3.

3.11.2 Análisis de la temperatura del aire desecante

La temperatura del aire desecante en las tres bandejas bajo diferentes condiciones iniciales se muestra en la figura 65. A medida que aumenta la altura de la cámara de secado, la temperatura del aire desecante disminuye, debido a que la humedad específica aumenta de la bandeja 1 a la bandeja 3. A medida que transcurre el tiempo de secado, las temperaturas aumentan y disminuyen hasta alcanzar la temperatura del aire desecante inicial.

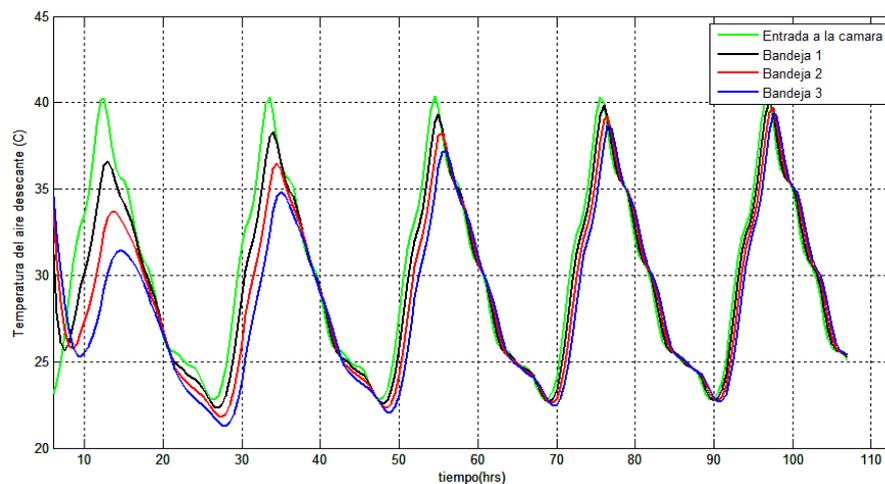


Figura 65. Temperatura del aire desecante para cada bandeja
Fuente: Elaboración propia.

3.11.3 Análisis de la temperatura del cacao

La temperatura del cacao ubicado en las bandejas 1, 2 y 3 se muestran en la figura 66. Como se puede observar, la temperatura en el grano presenta las mismas tendencias que la temperatura del aire desecante. Sin embargo, la energía entregada por el aire desecante se emplea para elevar la temperatura y evaporar la humedad del cacao. Por lo tanto, la temperatura del cacao en cada bandeja es inferior a la temperatura del aire desecante que fluye por la respectiva bandeja.

Inicialmente, la velocidad de crecimiento de la temperatura del aire desecante es mayor que la velocidad de crecimiento de la temperatura del cacao. El cacao se empieza a secar y se utiliza menos calor para la evaporación de la humedad del cacao y la mayoría de calor transferido desde el aire se utiliza para aumentar la temperatura del cacao, hasta que iguale a la temperatura del aire desecante.

Las máximas temperaturas del cacao en la bandeja 1 y la bandeja 3 son de 36 y 30.2°C, respectivamente para el primer día de secado. Debido a que la temperatura en el cacao disminuye de la bandeja 1 a la bandeja 3, la humedad en el cacao aumenta de la bandeja 1 a la bandeja 3, hasta que, en cuatro días de secado, el cacao ubicado en las tres bandejas tenga aproximadamente la misma humedad de 7.06% wb.

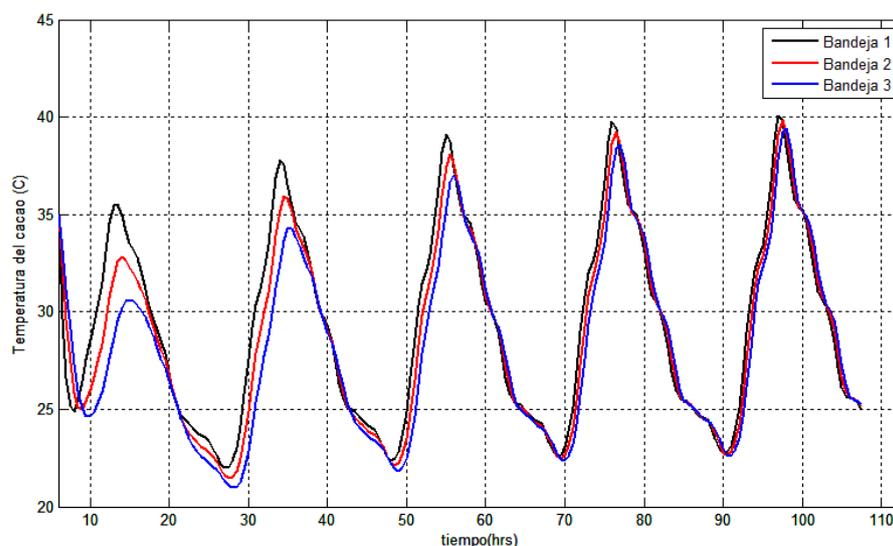


Figura 66. Temperatura del cacao para cada bandeja
Fuente: Elaboración propia.

3.11.4 Análisis de la humedad específica del aire desecante

El contenido de humedad específica en el aire desecante en cada bandeja, determinado por la interacción de la temperatura del aire desecante y la humedad del cacao con diferentes condiciones iniciales se muestra en la figura 67. El contenido de humedad del aire desecante aumenta aproximadamente a las 13:30 hrs, y este incremento es mayor conforme el aire fluye a lo largo de la altura de la cámara de secado. Esto es debido, al efecto de adsorción del cacao ubicado en las bandejas superiores de la cámara de secado. Es decir, en este momento la humedad externa

migra hacia el interior de los granos ubicados en las bandejas superiores, por lo tanto, la humedad específica del aire desecante que fluye a través de las bandejas superiores también aumenta.

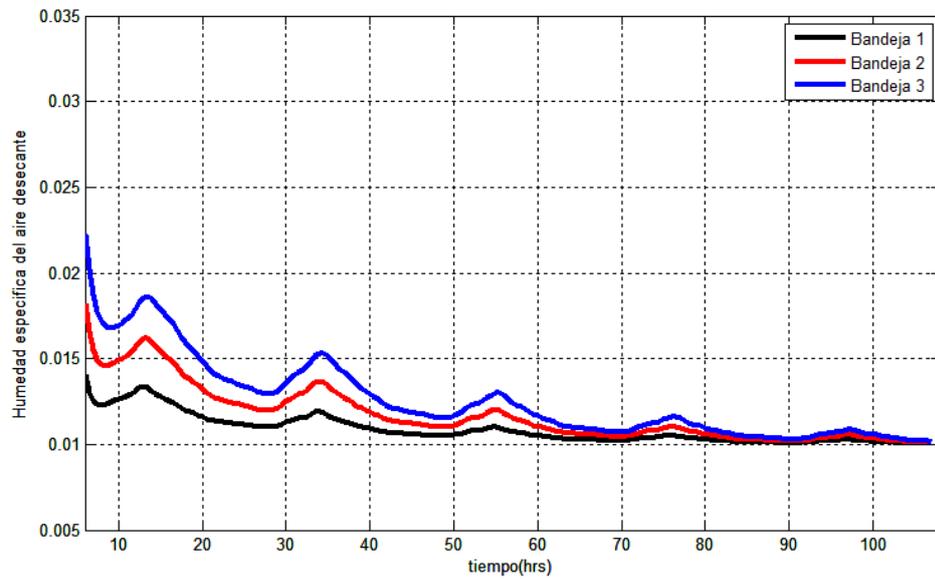


Figura 67. Humedad específica del aire desecante para cada bandeja
Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4

Análisis paramétrico de la cámara de secado solar para cacao

4.1 Introducción

Para evaluar la influencia de los parámetros geométricos (área de las bandejas y altura de la cámara de secado) así como otros parámetros de operación: flujo másico, temperatura del aire desecante a la entrada de la cámara y el tamaño del grano de cacao, se realiza un análisis paramétrico donde se determinan las curvas de humedad, temperatura del cacao y la velocidad del secado.

4.2 Prueba 1: Variando el área de las bandejas

A continuación, se muestra en las figuras 68, 69 y 70 los resultados para la humedad del cacao, velocidad de secado y la temperatura del cacao en función del tiempo según la variación del área de las bandejas. Los resultados que se muestran son para la bandeja número 1.

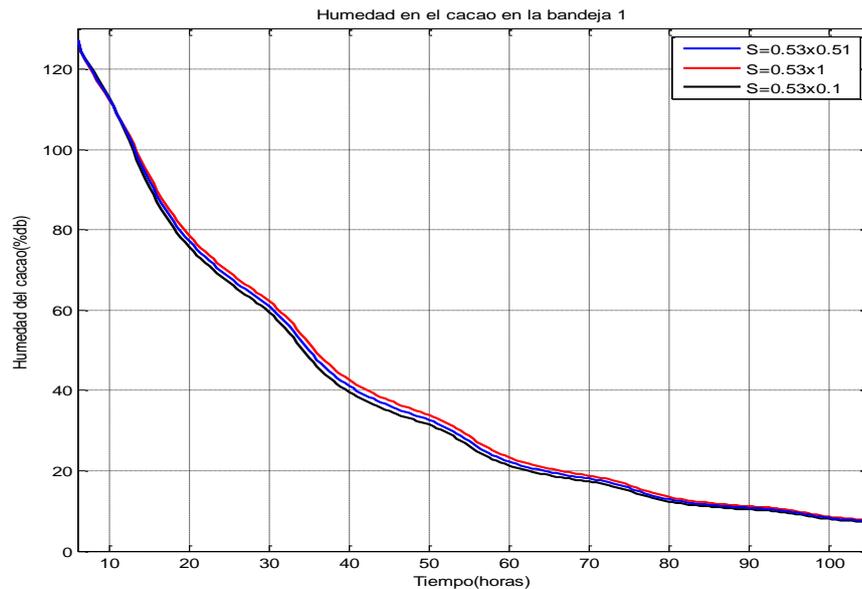


Figura 68. Comparación de la humedad del cacao variando la superficie de las bandejas

Fuente: Elaboración propia.

Según los datos obtenidos en la figura 68, se puede observar que la humedad en el cacao no varía mucho si se aumenta o disminuye la superficie de las bandejas, manteniendo los demás parámetros constantes. Se observa que para una superficie de bandeja de 0.53×0.2 la pérdida de la humedad es mucho más rápida debido a que se tendría menos cantidad de cacao en dicha bandeja (ver figura 68). Lo que se confirma en la figura 69 al ser la velocidad de secado mayor respecto a los otros casos.

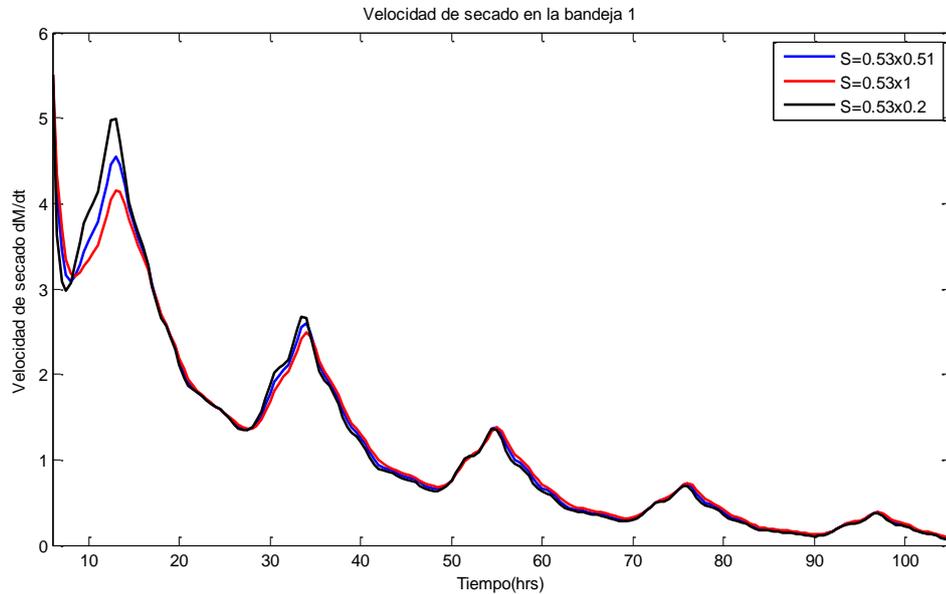


Figura 69. Comparación de la velocidad de secado variando la superficie de las bandejas

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 70 se muestra la comparación de la temperatura del cacao en la bandeja 1 cuando se varía la superficie de las bandejas. Como se puede observar mientras menor sea el área de las bandejas, la temperatura del cacao será mucho mayor, esto trae como consecuencia que el secado sea más rápido.

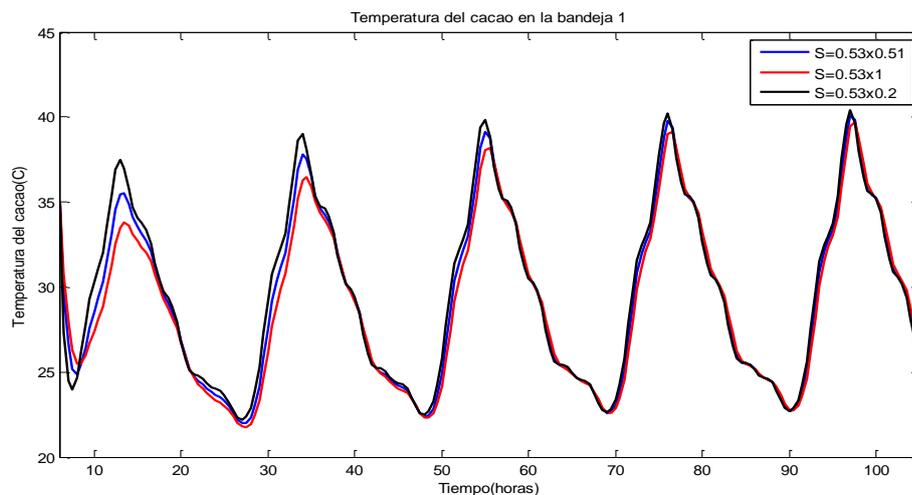


Figura 70. Comparación de la temperatura del cacao variando la superficie de las bandejas

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Prueba 2: Variando la altura de la cámara de secado

A continuación, se muestra en las figuras 71, 72 y 73 los resultados para la humedad del cacao, velocidad de secado y la temperatura del cacao en función del tiempo según la variación de la altura de la cámara de secado. Los resultados que se muestran son para la bandeja número 1.

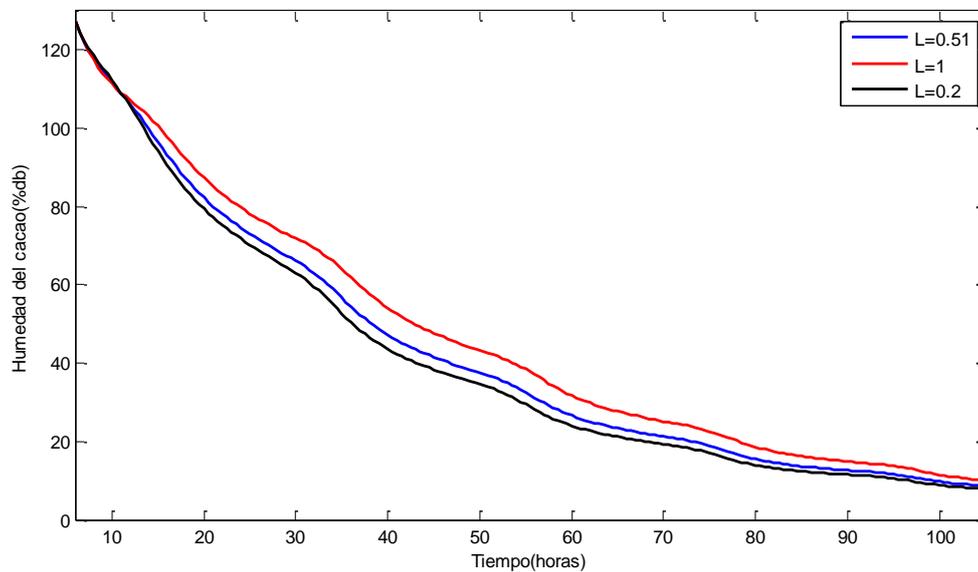


Figura 71. Comparación de la humedad del cacao variando la altura de la cámara de secado

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 71, la humedad del cacao disminuye más rápido cuando la altura de la cámara de secado es menor, esto se debe a que la temperatura del cacao para $L=0.2$ es mayor que las otras alturas. Esto se puede apreciar mejor en la figura 72, la velocidad de secado para una altura de 0.2 m es mayor.

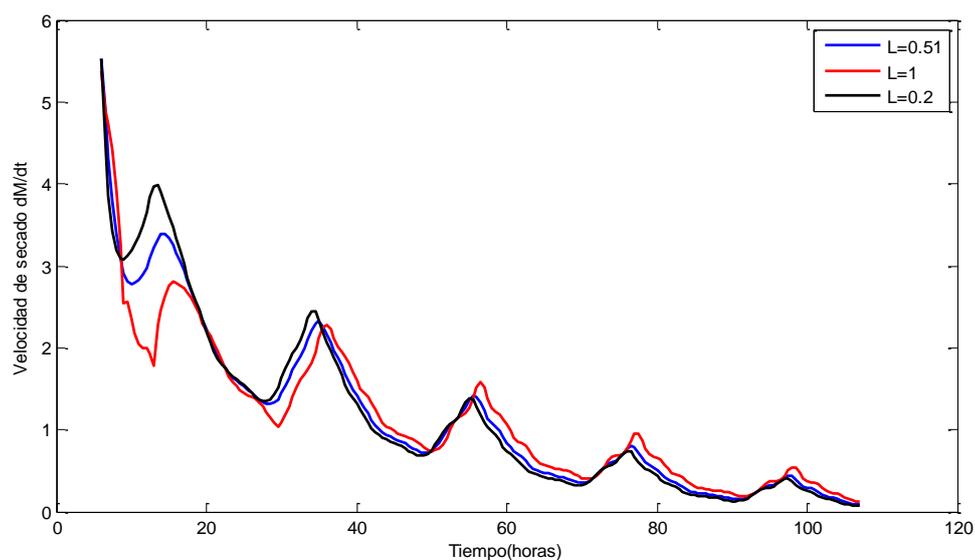


Figura 72. Comparación de la velocidad de secado de cacao variando la altura de la cámara de secado

Fuente: Elaboración propia.

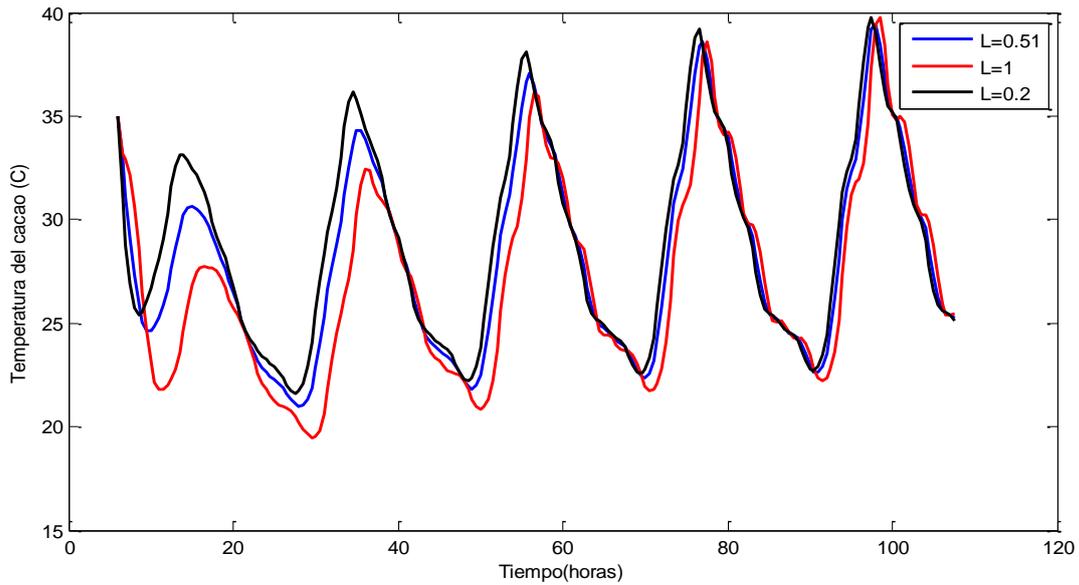


Figura 73. Comparación de la temperatura del cacao variando la altura de la cámara de secado

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 73, se muestra la comparación de la temperatura del cacao cuando se varía la altura de la cámara de secado. La temperatura del cacao es mucho menor cuando la altura de la cámara de secado aumenta.

4.4 Prueba 3: Variando el flujo másico

A continuación, se muestra en las figuras 74, 75 y 76 los resultados para la humedad del cacao, velocidad de secado y la temperatura del cacao en función del tiempo según la variación del flujo másico. Los resultados que se muestran son para la bandeja número 1.

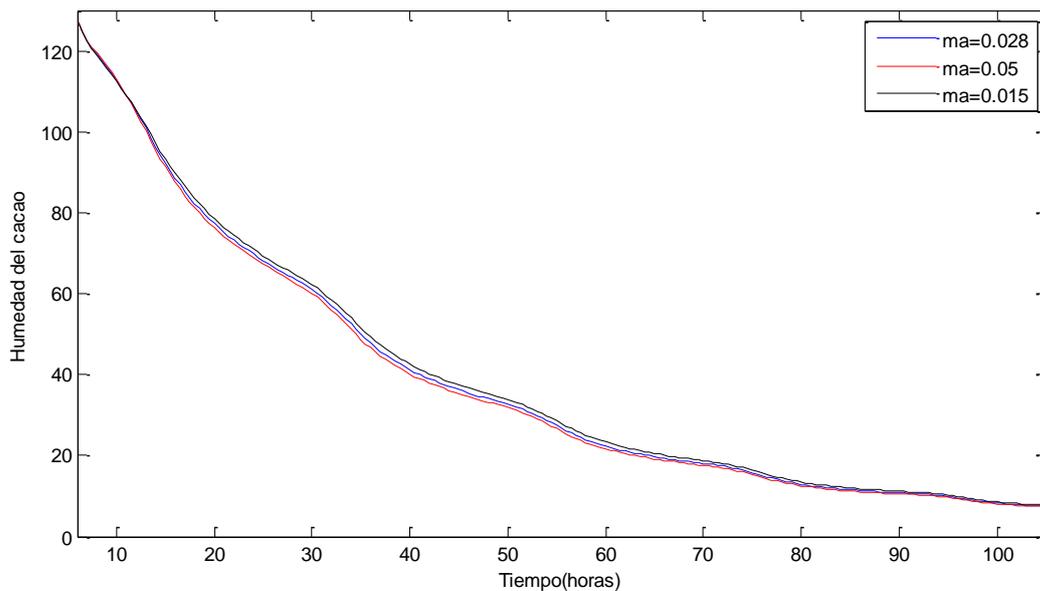


Figura 74. Comparación de la humedad del cacao variando el flujo másico

Fuente: Elaboración propia.

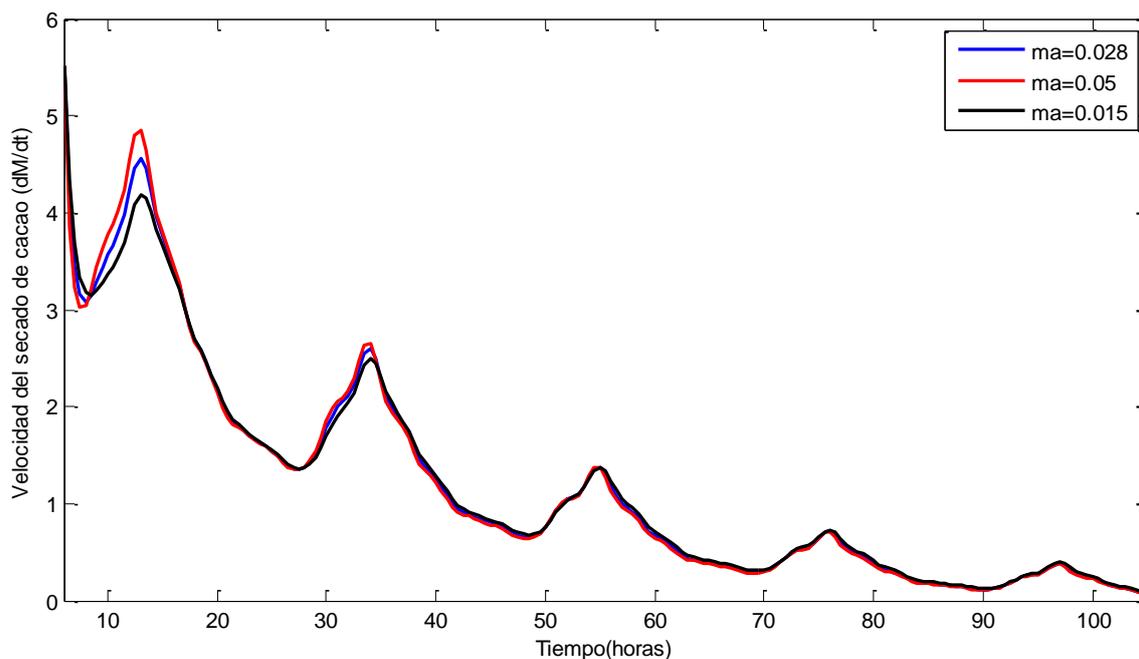


Figura 75. Comparación de la velocidad de secado variando el flujo másico
Fuente: Elaboración propia.

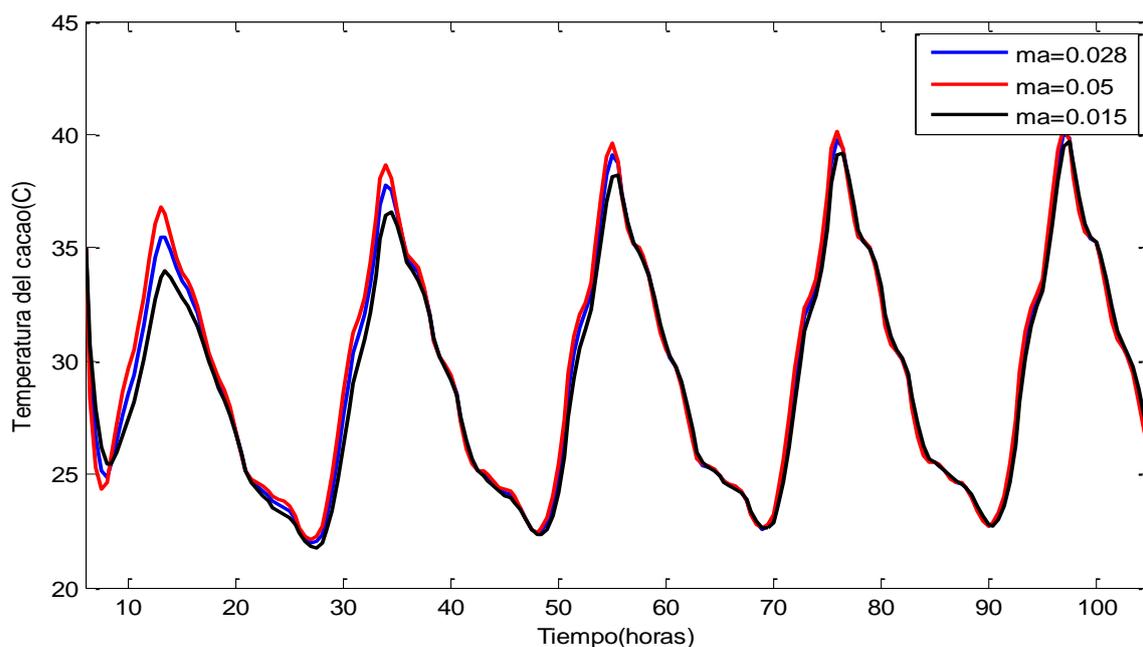


Figura 76. Comparación de la temperatura del cacao variando el flujo másico
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las figuras 74, 75 y 76 la eliminación de la humedad es más rápida cuando el flujo másico es mayor, porque el coeficiente de transferencia de calor entre el cacao y el aire desecante es mayor en comparación con los otros casos. Finalmente, también se puede observar que la temperatura del cacao es mayor cuando el flujo másico aumenta.

4.5 Prueba 4: Variando el diámetro promedio del cacao

A continuación, se muestra en las figuras 77, 78 y 79 los resultados para la humedad del cacao, la velocidad de secado y la temperatura del cacao en función del tiempo según la variación del diámetro promedio de los granos de cacao. Los resultados que se muestran son para la bandeja número 1.

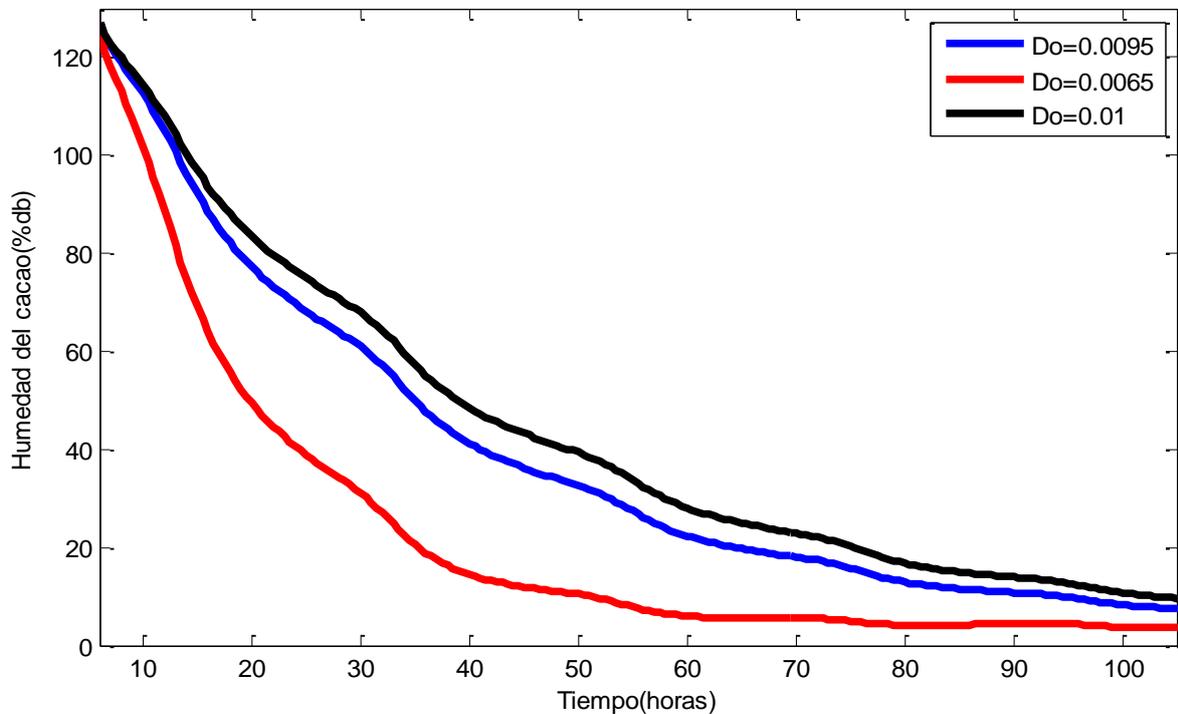


Figura 77. Comparación de la humedad del cacao variando el diámetro de difusión
Fuente: Elaboración propia

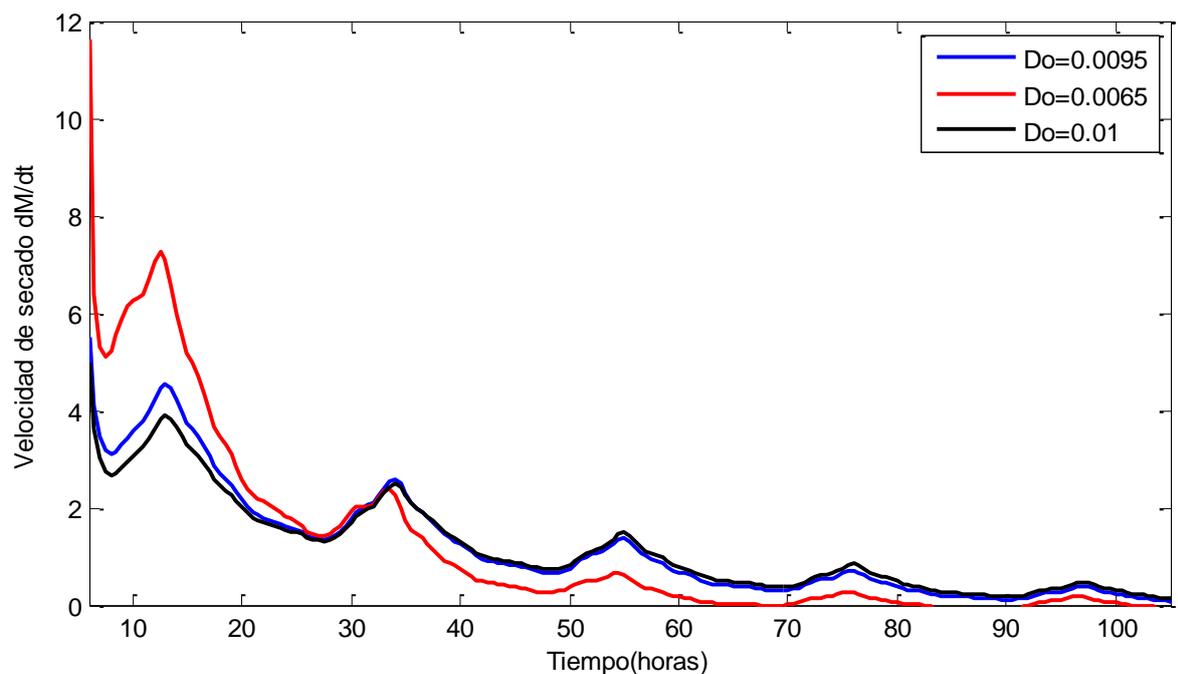


Figura 78. Comparación de la velocidad de secado variando el diámetro de difusión
Fuente: Elaboración propia.

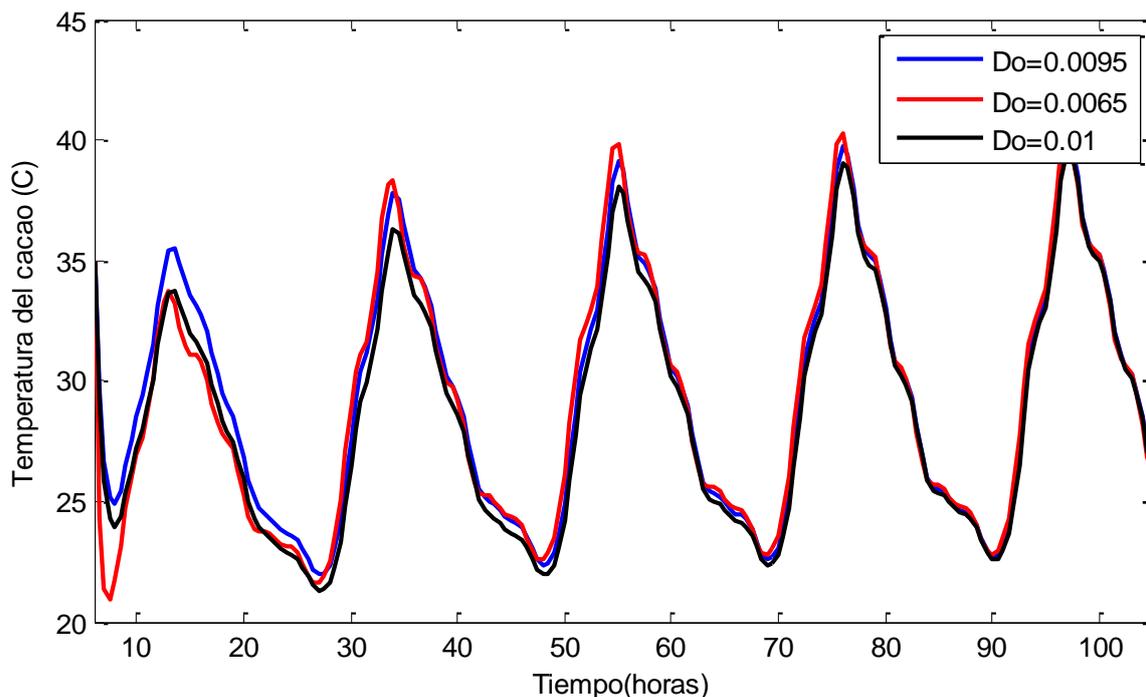


Figura 79. Comparación de la temperatura del cacao variando el diámetro de difusión
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las figuras 77, 78 y 79 la velocidad de secado del cacao aumenta cuando el diámetro de difusión disminuye, porque la temperatura del cacao aumenta. Cuando el diámetro promedio del cacao aumenta, el radio de difusión de la humedad sería mayor, esto ocasiona la disminución de la temperatura del cacao y un aumento en la temperatura del aire desecante y también ocasiona que la humedad específica del aire sea mayor y una disminución de la velocidad de secado. Puede darse el caso que algunos granos de cacao con unas ciertas dimensiones se deshidratan en aproximadamente 3 días, mientras que los granos más grandes, se deshidratarán en más tiempo.

4.6 Prueba 5: Variando la temperatura del secado

A continuación, se muestra en las figuras 80, 81 y 82 los resultados para la humedad del cacao, la velocidad de secado y la temperatura del cacao en función del tiempo según la variación de la temperatura del aire desecante. Los resultados que se muestran son solo para la bandeja número 1. Se considera que la temperatura de entrada a la cámara de secado es constante con temperaturas de 45°C, 55°C y 65°C.

Como se puede apreciar en las figuras 80 y 81 la velocidad de secado es mayor conforme la temperatura del secado aumenta. Sin embargo, las temperaturas de secado que se han seleccionado no son las adecuadas porque se produce un sobre secado en el cacao (ver figura 80). Probablemente, el cacao al término del proceso de secado sea quebradizo y no cumpla los estándares de calidad. Como se puede observar en la figura 82, la temperatura del cacao es mayor cuando la temperatura del aire desecante es de 65°C.

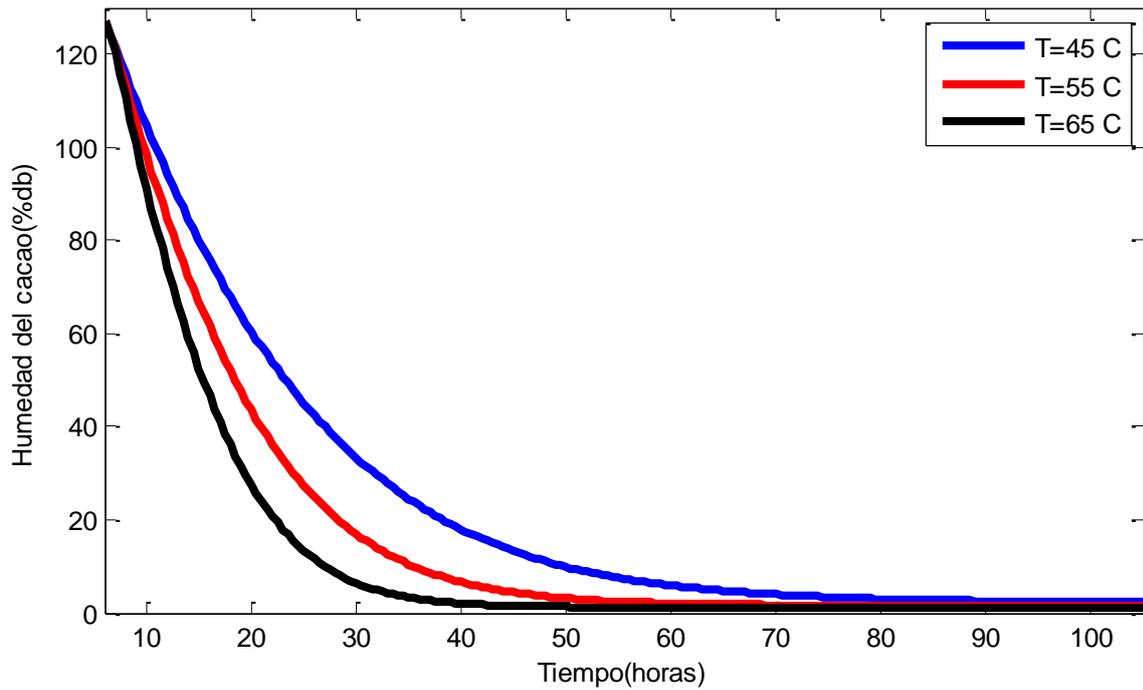


Figura 80. Comparación de la humedad del cacao variando la temperatura de secado
Fuente: Elaboración propia

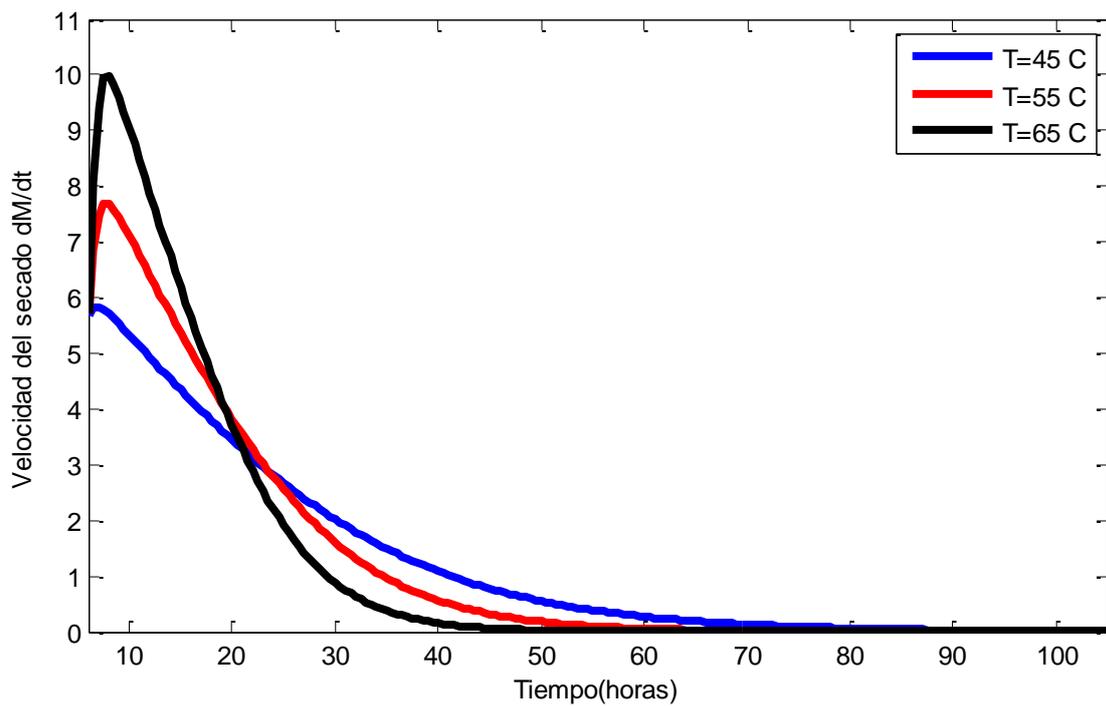


Figura 81. Comparación de la velocidad de secado variando la temperatura de secado
Fuente: Elaboración propia.

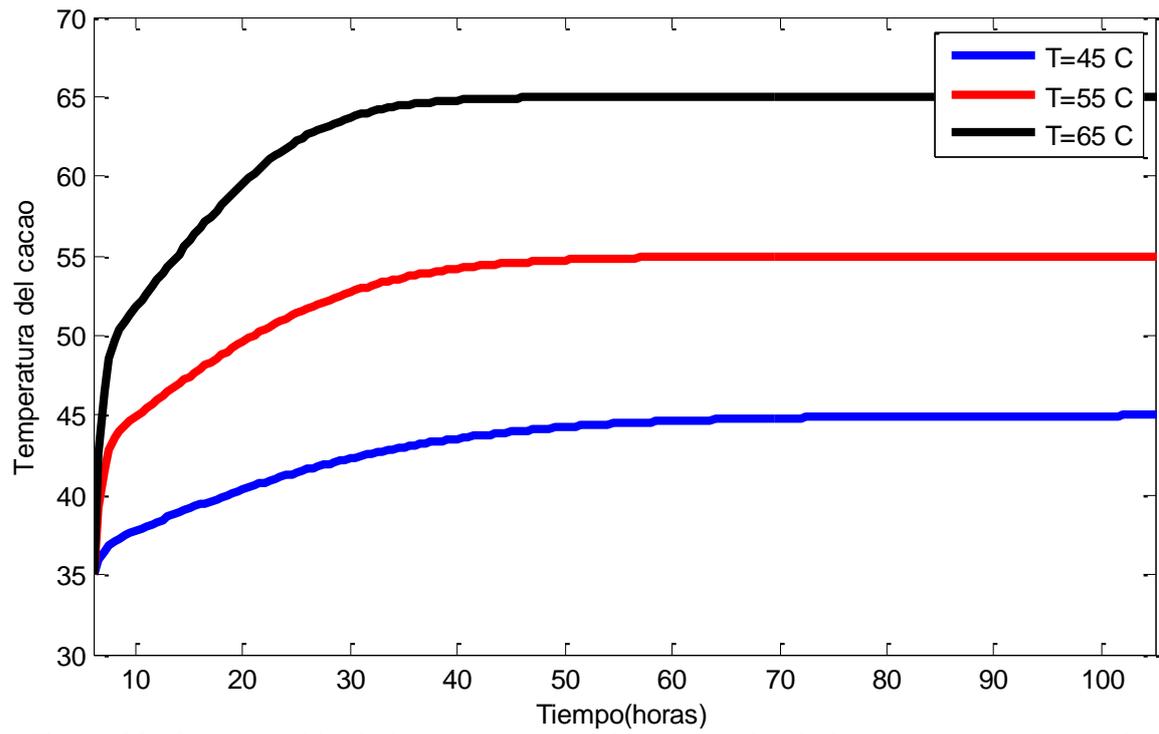


Figura 82. Comparación de la temperatura del cacao variando la temperatura de secado
Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5

Análisis económico de secadores solares

5.1 Introducción

Como se explicó en los capítulos anteriores, los secadores solares son una alternativa muy atractiva para mejorar el proceso de secado de productos agroindustriales. Debido a esto, los secadores solares deben ofrecer beneficios financieros atractivos para mejorar su aceptación en el mercado. Por eso se han diseñado y desarrollado muchos secadores solares teniendo en cuenta tres criterios, que son las características de secado de los productos, capacidad del producto y las consideraciones económicas (Leon et al., 2002).

Estudios realizados por Palaniappan y Subramanian (1998) presentaron un análisis económico de un sistema de secado solar para té con un área de colector de $212 m^2$. Purohit y Kandpal (2005) presentaron un análisis financiero de secadores solares indirectos como alternativa a los secadores convencionales que utilizan energía de combustible fósil. Muchos de estos estudios mostraron que los secadores solares son económicamente más atractivos. Sin embargo, ninguno de estos estudios atiende las cuestiones relacionadas con la cuantificación y la comparación del beneficio y el coste de la sustitución de los secadores solares por el secado al sol.

En este capítulo se presenta un análisis de la viabilidad financiera de los secadores solares frente a los secadores al sol. El análisis tiene en cuenta los parámetros operativos tales como: el contenido de humedad al inicio y final del secado, la temperatura del secado, tiempo de secado, periodo de recolección del producto, etc. También se ha utilizado parámetros financieros tales como: el costo de capital, reparación anual, el costo de mantenimiento, el factor de utilización de la capacidad, tiempo de vida útil, tasa de descuento, precio de venta del producto agrícola, etc.

5.2 Parámetros en el análisis financiero de secadores solares

En la tabla 20 se muestra la nomenclatura que se va a usar en el análisis financiero de secadores solares. Así como también la descripción y las unidades de las variables que se van a utilizar en la simulación financiera.

Tabla 20. Nomenclatura que se va a utilizar en el análisis financiero

Símbolo	Nomenclatura	Unidades
A_c	Área del colector requerida para el secado de una cantidad M_{sd} (%db) del producto	m^2
B_i	Beneficio incremental anual neto por reemplazar el secado al sol por un secador solar	US\$
B_{qi}	Beneficio incremental anual por mejorar la calidad del producto	US\$
B_{rw}	Beneficio incremental anual por reducir que se desperdicie el producto	US\$
C_o	Costo de capital del secador solar	US\$
C_p	Calor específico del producto	MJ/kg°C
CUF	Factor de utilización de la capacidad del secador solar	Fracción
d	Ratio de descuento	Fracción
f	Costo de componentes adicionales del secador solar como una fracción del costo del colector	Fracción
f_1	Fracción del producto seco que se pierde en el secado tradicional al sol	Fracción
f_q	El incremento en el precio de venta del producto debido a la mejora de la calidad del producto en el secado solar como una fracción del precio de venta del producto	Fracción
h_{fg}	Calor latente de vaporización del agua	MJ/kg
I	Radiación solar disponible promedio	MJ/m ²
m	Costo de mantenimiento y operación manual del secador solar como una fracción del costo de capital	Fracción
M_{cf}	Contenido final de humedad del producto	wb
M_{ci}	Contenido inicial de humedad del producto	wb
M_{sd}	Capacidad del producto en el secador solar	kg
p_c	Costo del secador solar por unidad de área	US\$/m ²
$p_{c,b}$	Precio de equilibrio del colector	US\$/m ²
p_{sp}	Precio de venta del producto	US\$/kg
q_{evap}	Energía requerida útil para la evaporación de la humedad del producto	MJ
q_{sens}	Energía requerida útil para el calentamiento del producto	MJ
t	Tiempo de vida útil del secador solar	años
T_a	Temperatura del ambiente	°C
T_d	Temperatura de secado	°C
$U_{c,d}$	Costo unitario del secador solar del producto	US\$/kg
UE_d	Energía requerida mínima útil específica	MJ/kg
$U_{u,e}$	Costo unitario de la energía útil	US\$/MJ
τ	Tiempo requerido para el secado del producto	días
n_d	Eficiencia global del secador solar	Fracción
ε	Fracción del calor sensible	Fracción
α_{sd}	Costo de capital del secador solar por unidad de masa	US\$/kg

Fuente: Elaboración propia

5.2.1 Costo de capital de secadores solares

La energía útil mínima requerida para el secado de una cantidad unitaria de un producto se puede estimar como la suma de la energía útil requerida para el calentamiento sensible del producto (q_{sens}) y la energía requerida para la evaporación de la humedad del producto (q_{evap}). La energía útil mínima requerida para el secado se muestra en la ecuación 5.1 (Purohit et al., 2006).

$$UE_d = q_{sens} + q_{evap} \quad (5.1)$$

$$UE_d = \left\{ \left(\frac{1 - M_{cf}}{1 - M_{ci}} \right) C_P (T_d - T_a) \right\} \times \{1 + (\tau - 1)\varepsilon\} + \left\{ \frac{M_{ci} - M_{cf}}{1 - M_{ci}} \right\} h_{fg} \quad (5.2)$$

Donde M_{ci} y M_{cf} son las humedades inicial y final en base húmeda del producto a secar, respectivamente, C_P es el calor específico del producto, y h_{fg} es el calor latente de vaporización del agua, τ es el tiempo requerido en días para el secado de un lote de producto.

Durante las horas de baja radiación solar, la temperatura dentro de la cámara de secado puede disminuir y alcanzar valores muy por debajo de la temperatura de secado del producto. Por lo tanto, se necesitará algo de energía térmica para su calefacción del producto para que pueda llegar a la temperatura de secado requerida. En este capítulo se asume que, en otros días de secado, se requiere una fracción ε de la demanda de calor sensible del producto del primer día que es requerida para elevar la temperatura a la temperatura de secado.

El calor específico del producto C_P en MJ/kg se puede estimar en la ecuación 5.3 (Purohit et al., 2006).

$$C_P = \{0.8M_{ci} + 0.2\} \times 4.1868 \times 10^{-3} \quad (5.3)$$

El área del colector (A_c) requerida para el secado de una cantidad M_{sd} (base seca) de un producto puede ser expresada en la ecuación 5.4 (Purohit et al., 2006).

$$A_c = \left(\frac{M_{sd}}{\tau I n_d} \right) \left[\left\{ \left(\frac{1 - M_{cf}}{1 - M_{ci}} \right) C_P (T_d - T_a) \right\} \times \{1 + (\tau - 1)\varepsilon\} + \left\{ \frac{M_{ci} - M_{cf}}{1 - M_{ci}} \right\} h_{fg} \right] \quad (5.4)$$

Donde I representa la radiación solar promedio disponible durante el periodo de cosecha y n_d es la eficiencia térmica global del secador solar.

El costo de capital (C_o) del secador solar para una capacidad M_{sd} se expresa en la ecuación 5.5 (Purohit et al., 2006).

$$C_o = \left(\frac{M_{sd} p_c (1 + f)}{\tau I n_d} \right) UE_d \quad (5.5)$$

Donde p_c representa el precio del colector por unidad de área en el mercado y f el costo de los componentes restantes del sistema y está representada como una fracción del costo del colector.

El costo de capital del secador solar por unidad de capacidad de secado (α_{sd}) se expresa en la ecuación 5.6 (Purohit et al., 2006).

$$\alpha_{sd} = \frac{C_o}{M_{sd}} = \left(\frac{p_c(1+f)}{\tau \ln d} \right) UE_d \quad (5.6)$$

5.2.2 Costo unitario de secado y costo unitario de energía útil

El costo unitario de secado solar ($U_{c,d}$) puede ser determinado como el ratio del costo anual del secador solar y la cantidad anual de producto a secar. En la ecuación 5.7 se muestra dicha expresión anterior (Purohit et al., 2006).

$$U_{c,d} = \frac{C_o \left(\frac{d(1+d)^t}{(1+d)^t - 1} + m \right)}{\left(\frac{365 CUF}{\tau} \right) M_{sd}} \quad (5.7)$$

Donde CUF representa el factor de utilización de capacidad anual de secado, m el costo anual de reparación y mantenimiento como una fracción del costo de capital del secador, d la tasa de descuento y t el tiempo de vida útil del secador.

El costo unitario de la energía útil ($U_{u,e}$) entregada por el secador se expresa en la ecuación 5.8 (Purohit et al., 2006).

$$U_{u,e} = \left[\frac{C_o \left(\frac{d(1+d)^t}{(1+d)^t - 1} + m \right)}{\left(\frac{365 CUF}{\tau} \right) M_{sd} UE_d} \right] \quad (5.8)$$

5.2.3 Valoración de los beneficios

Las ventajas del secado solar frente al secado al sol son las siguientes: mejora de la calidad del producto, reducción de las pérdidas de productos, reducción del tiempo de secado, etc. Un método para cuantificar el valor monetario de los dos primeros beneficios se presenta en los siguientes puntos.

5.2.3.1 Mejora en la calidad del producto

El beneficio incremental anual (B_{qi}) debido a la mejora de la calidad del producto se puede estimar por la ecuación 5.9 (Purohit et al., 2006).

$$B_{qi} = \frac{365 CUF M_{sd} f_q p_{sp} (1 - f_1)}{\tau} \quad (5.9)$$

Donde f_1 representa la fracción de pérdida en el producto seco en el secado al sol, f_q es el incremento en el precio de venta del producto debido a la mejora de la calidad del producto en el secado solar como una fracción del precio de venta del producto (p_{sp})

5.2.3.2 Reducción del desperdicio en el producto durante el secado

Las estimaciones de los beneficios incrementales anuales B_{rw} debido a la reducción de las pérdidas durante el secado se pueden obtener por la ecuación 5.10 (Purohit et al., 2006).

$$B_{rw} = \frac{365CUFM_{sd}f_1p_{sp}(1 + f_q)}{\tau} \quad (5.10)$$

Por lo tanto, los beneficios incrementales anuales (B_i), debido a la sustitución del secado al sol por un secador solar se pueden estimar por la ecuación 5.11 (Purohit et al., 2006).

$$B_i = (f_q + f_1) \left[\frac{365CUFM_{sd}p_{sd}}{\tau} \right] \quad (5.11)$$

Para la viabilidad financiera del secado solar en comparación con el secado al sol, la proporción de beneficios anuales incrementales con los costos incrementales anuales debe ser mayor que la unidad. Por medio de las ecuaciones anteriores esta condición se puede expresar matemáticamente como (ecuación 5.12) (Purohit et al., 2006):

$$\frac{\left[\left\{ \frac{365CUF}{\tau} \right\} (f_q + f_1)p_{sp} \right]}{\left\{ \left(\frac{d(1+d)^t}{(1+d)^t - 1} \right) + m \right\}} \geq \alpha_{sd} \quad (5.12)$$

5.2.4 Precio de equilibrio del colector

Es útil estimar el precio de equilibrio del colector hasta el cual un secador solar sería económicamente inviable. La ecuación 5.13 se ha obtenido para el precio de equilibrio del colector utilizado en el secador solar (Purohit et al., 2006).

$$p_{c,b} = \frac{365CUFp_{sp}(f_q + f_1)In_d}{(1 + f) \left\{ \frac{d(1+d)^t}{(1+d)^t - 1} + m \right\} UE_d} \quad (5.13)$$

5.3 Análisis financiero de un secador solar indirecto

En la tabla 21 se muestra los parámetros de entrada necesarios para realizar el análisis financiero para un secador solar indirecto para cacao. Adicionalmente, también se muestran las unidades y valores de dichos parámetros.

Tabla 21. Parámetros a utilizar en el análisis financiero

Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor
Masa del cacao en el secador solar	M_{sd}	kg	60
Humedad inicial del cacao	M_{ci}	wb	0.56
Humedad final del cacao	M_{cf}	wb	0.07
Tiempo de secado	τ	días	5
Temperatura de secado	T_d	°C	40
Temperatura del ambiente	T_a	°C	25
Radiación solar promedio	I	kWh/m^2	6.4
Fracción del calor sensible en el primer día que es requerida para elevar la temperatura a la temperatura de secado.	ε	Fracción	0.5
Calor latente de vaporización	h_{fg}	MJ/kg	2.26
Eficiencia térmica global del secador solar	n_d	Fracción	0.4
Precio en el mercado del colector	p_c	US\$/m ²	567
Factor de utilización anual de la capacidad de producto en el secador	CUF	Fracción	0.5
Tiempo de vida útil del secador	t	años	5
Costo de los componentes adicionales del secador como una fracción del costo del colector	f	Fracción	0.1
Costo del mantenimiento como una fracción del costo del secador	m	Fracción	0.05
Tasa de descuento	d	Fracción	0.1

Fuente: Elaboración propia

Utilizando las ecuaciones financieras y los parámetros de la tabla 21 que se mostraron en los apartados anteriores, se hace un análisis de sensibilidad haciendo variar la eficiencia global del secador y la temperatura de secado. Los resultados se muestran en las figuras 83 y 84

En las figuras 83 y 84 se pueden observar que el costo unitario de secado por unidad de kg de producto a secar, disminuye cuando la eficiencia del secador solar aumenta. Al mismo tiempo se puede observar que para elevar la temperatura de secado, el costo del secador aumenta, esto tiene sentido porque se necesitaría por ejemplo aumentar el área del colector, de esta forma obtener mayores temperaturas, generando mayor demanda de materiales.

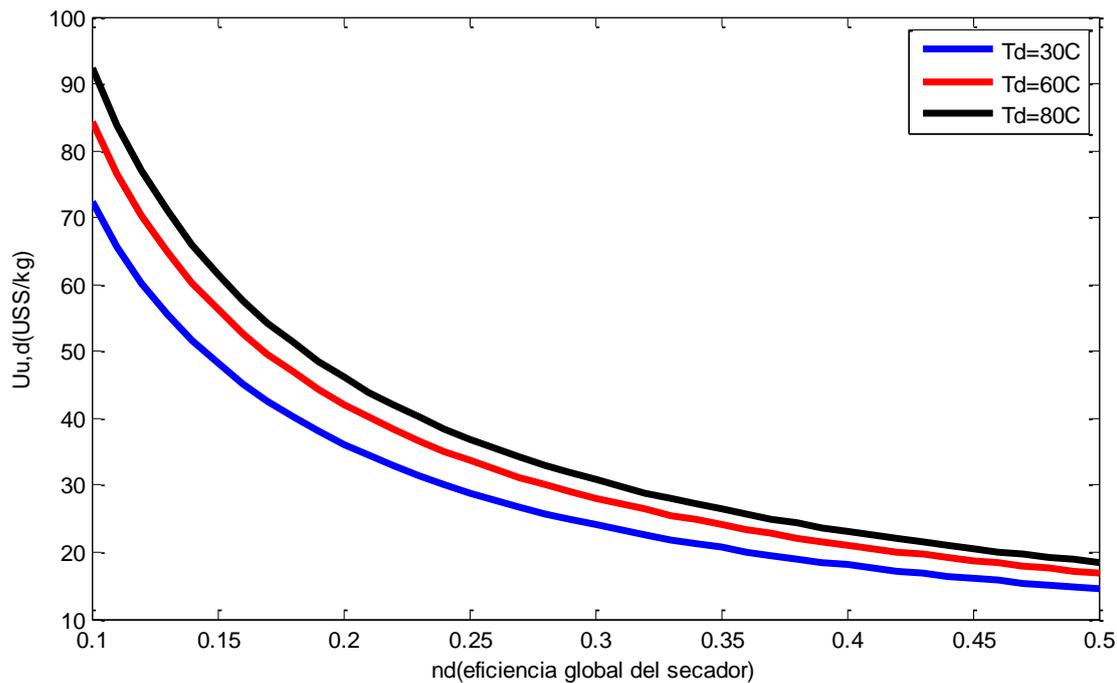


Figura 83. Costo unitario de secado $U_{c,d}$ en función de la eficiencia global
Fuente: Elaboración propia.

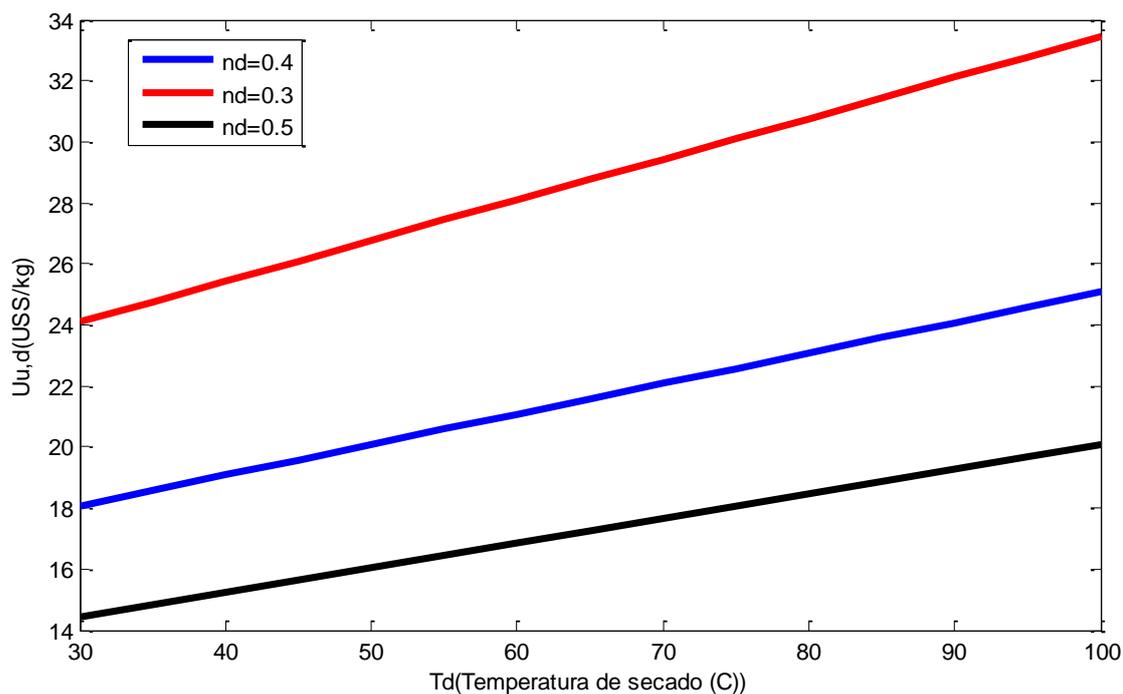


Figura 84. Costo unitario $U_{c,d}$ en función de la temperatura de secado
Fuente: Elaboración propia.

Ahora se procede a calcular los beneficios incrementales anuales que se generan al reemplazar el secador al sol por un secador solar. En la tabla 22 se muestran dichos resultados.

Tabla 22. Beneficios incrementales

Producto	Beneficio incremental anual por mejorar la calidad del producto(US\$)	Beneficio incremental anual por reducir el desperdicio del producto(US\$)	Beneficio neto incremental (US\$)
Cacao	1847.8	1574.1	3421.9

Fuente: Elaboración propia

Luego el precio del colector de equilibrio para el secador solar es de 603.5 US\$. Hasta dicho precio el colector solar sería económicamente viable.

Conclusiones

- El objetivo del proceso de secado es la evaporación de la humedad de un producto hasta un contenido de humedad que garantice una calidad deseada, independientemente de las perturbaciones en la operación de secado y variaciones en el suministro de alimentación. La finalidad de la tesis es proponer un secador solar indirecto, realizar el modelo matemático del mismo y analizar financieramente la viabilidad de su utilización.
- En el presente trabajo se analizó los procesos de transferencia de calor y masa que se lleva a cabo en el cacao durante el proceso de secado en un secador solar indirecto. Las simulaciones del modelo mostraron, razonablemente, las ventajas de utilizar un secador solar indirecto, en el tiempo de secado, la velocidad de secado, la protección contra agentes externos y la humedad final necesaria para mantener al cacao en buenas condiciones durante el almacenamiento.
- La humedad específica del aire en la cámara de secado se determina a partir de la cantidad de vapor evaporado en el cacao. En el modelo se supone que el cacao se seca hasta su humedad de equilibrio (7-8% wb).
- El modelo dinámico de la cámara de secado se ha implementado en MATLAB, en el que las variables de entrada al proceso, las dimensiones de la cámara de secado, y las características del cacao se pueden variar y obtener conclusiones valiosas para comprender de manera muy acertada el proceso de secado.
- La hipótesis de tomar al cacao como una partícula perfectamente esférica es una forma de simplificar la manera que la difusividad de vapor será el mismo desde el núcleo húmedo a la superficie de todo el cacao y por lo tanto, la resistencia en todas las direcciones se simplificará.
- Se ha demostrado mediante el análisis paramétrico que el modelo matemático de la cámara de secado responde a las variaciones de los parámetros ingresados de área de las bandejas, longitud de la cámara de secado, flujo másico, diámetro del cacao y temperatura de entrada a la cámara de secado de forma adecuada.
- Con el modelo matemático desarrollado pueden variarse los coeficientes correspondientes a los materiales para la construcción de la cámara de secado o también los valores

correspondientes a la temperatura ambiente dependiendo del lugar donde se vaya a ubicar la cámara de secado.

- La velocidad de secado depende directamente de la temperatura del cacao, por lo cual se ve la necesidad de controlar la temperatura del cacao, que es posible mediante la manipulación del flujo másico del aire desecante.
- El aumento o la disminución de la altura de la cámara de secado, modifica la distancia del aire desecante y el cacao. Esta variación en la distancia de separación influye de forma inversamente proporcional en la velocidad de secado del cacao, es decir si se aumenta la altura de la cámara de secado, la velocidad del secado disminuye. Adicionalmente, la variación en la altura de la cámara de secado modifica la distancia de separación entre bandejas, ocasionando que el aire desecante aumente o disminuya su humedad específica. Por ejemplo, si se aumenta la altura de la cámara de secado, el aire desecante tendrá más humedad específica esto trae como consecuencia que la velocidad de secado en la bandeja más lejana sea menor.
- La velocidad de secado del cacao varía de forma directa con la temperatura de entrada a la cámara de secado. Cuando la temperatura de entrada aumenta, la velocidad de secado aumenta. Sin embargo, esto presenta muchos inconvenientes porque la humedad puede ser mucho menor o mayor que la humedad requerida para el almacenamiento por largos periodos de tiempo del cacao.
- Se analizó la influencia del tamaño del cacao sobre la pérdida de humedad del mismo. El tiempo de secado se incrementa al aumentar el diámetro de difusión del cacao. Para granos de cacao con un diámetro de 0.02 m se demora 5 días en secar. Esto significa menos vapor de agua en la cámara de secado y da como resultado una temperatura en la cámara mucho mayor debido a la menor energía utilizada en la evaporación. En este caso el modelo dinámico es imperfecto.
- La difusividad efectiva tiene un gran efecto en el proceso de secado, porque describe la velocidad de la masa líquida que se puede transportar en el cacao. Esto significa que para un valor inferior de la D_e da un tiempo de secado más largo porque tomara más tiempo para que el vapor de agua se difunda a través del cacao.
- El contenido de humedad crítica también influye en el tiempo de secado. Los tiempos de secado se incrementan para los granos de cacao con un mayor contenido de humedad crítica.
- El secado solar indirecto de cacao parece ser bastante atractivo económicamente. Esto se refleja en los beneficios incrementales anuales en la calidad del producto y en la disminución del desperdicio en el proceso de secado.
- Las dimensiones en el colector y la cámara de secado, la humedad de entrada del cacao, el flujo másico, la temperatura de entrada a la cámara de secado, y el número de horas de operación diarias de la cámara de secado influyen en el costo útil de energía. Debido a esto, se puede obtener las dimensiones de colector y cámara de secado y parámetros de operación que podrían conducir a la minimización del costo y de esta forma poder obtener mayores beneficios del proceso de secad

Bibliografía

- Amoa-Awua, W., M. Madsen, J.F., Takramah, A., Olaiya, L., Ban Koffi & Jakobsen, M. (2007), Quality manual for production and primary processing of cocoa. Department of food science, University of Copenhagen.
- Aregba, A.W., Sebastian, P., & Nadeau, J.P. (2006), Stationary deep bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non equilibrium model. *Journal of food engineering*, 77, 27-40.
- Bal, L.M., Satya, S., & Naik, S.N. (2010), Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2298-2314.
- Bart-Plange, A., & Baryeh, E.A. (2003), The physical properties of Category B cocoa beans. *Journal of food engineering*, 60, 219-227.
- Bejar, A.K., Mihoubi, N.B., & Kechaou, N. (2012), Moisture sorption isotherms- Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves. *Food Chemistry*, 132, 1728-1735.
- Bennett, A.B. (2003). Out of the Amazon: *Theobroma cacao* enters the genomic era. *Trends in Plant Science*, 8, 561-563.
- Belessiotis, V., Delyannis, E.(2011), Solar drying. *Solar Energy*, 85, 1665-1691.
- Bharath, S., & Bowen-O'Connor, C. (2007), Assessing drying rates of cocoa beans using small samples. Annual report Cocoa research Unit. U.W.I. St. Augustine, Trinidad, pp 52-58.
- Bonaparte, A., Alikhani, Z., Madramootoo, C.A., & Raghavan, V. (1998). Some Quality Characteristics of Solar Dried Cocoa Beans in St Lucia. *Journal Science Food Agric*, 76, 553-558.
- Bonazzi, C., Bimbenet, J.J. (2008), Sechage des produits alimentaires. Matériels et applications, in *Techniques de l'ingénieur traite Agroalimentaire F3*, 3002, 1-17.

- Boulton, R. (1980), The relationship between total acidity, titratable acidity and pH in wine. *American Journal of Enology and Viticulture*, 31, 76-80.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., & Hall, C.W. (1974), Drying cereal grains. Westport AVI.
- Brunauer, S., Deming, L.S., Deming, W.E., & Teller, E. (1940), On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal Chem. Soc.*, 62, 1723-1732.
- Chakraverty, A., Mujumdar, A.S., Raghavan, V., & Ramaswamy, H.S. (2003). *Handbook of postharvest technology-cereals, fruits, vegetables, teas and spices.*
- Chinenye N.M., Ogunlowo, A.S., & Olukunle, O.J. (2010), Cocoa bean (*Theobroma cacao* L.) Drying Kinetics.
- Colak, N. & Hepbasli, A. (2009), A review of heat pump drying: part I, systems, models and studies. *Energy Convers*, 50, 2180-2186.
- Crank, J. (1975), *The mathematics of diffusion*, 2nd ed., Oxford University Press, Oxford.
- Ekechukwu, O.V., & Norton, B. (1999), Review of solar energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion & Management*, 40, 593-613.
- Ekechukwu, O.V., & Norton, B. (1999), Review of solar energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion & Management*, 40, 615-655.
- Ertekin, F., & Gedik, A. (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. *Lebensm Wiss U. Technol.*, 37, 429-438.
- Faborode, M.O., Favier, J.F., & Ajayi, O.A. (1995), On the Effects of Forced Air Drying on Cocoa Quality. *Journal of Food Engineering*, 25, 455-472.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M.H., Alghoul, M.A., & Sulaiman, M.Y. (2010), Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14, 1-30.
- Fagunwa, A.O., Koya, O.A. & Faborode, M.O. (2009), Development of an Intermittent Solar Dryer for Cocoa Beans. Department of Agricultural Engineering, University Ile Ife Nigeria.
- Falade, K.O., & Omojola, B.S. (2010). Effect of Processing Methods on Physical, Chemical, Rheological, and Sensory Properties of Okra. *Food Bioprocess Technology*, 3, 387-394.

- Farah, S., Ambarita, H., Napitupulu, F.H., & Kawai, H. (2014), Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. *Case studies in thermal engineering*.
- Ferreira, A.G., Maia, C.B., Cortez, M.F.B., & Valle, R.M. (2008), Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. *Solar Energy*, 82, 198-205.
- Guedhi, S.T., Dabonne, S., Ban-Koffi, L. Kadjebo, D.K., & Zahouli, I.B. (2010), Effect of turning beans and fermentation method on the acidity and physical quality of raw cocoa beans. *Advance Journal of food science and technology*, 2, 163-171.
- Hii, C.L., Rahman, R.A., Jinap, S., & Che Man, Y.B. (2006), Quality of cocoa beans dried using a direct solar dryer at different loadings. *Journal of the science of Food and Agriculture*, 86, 1237-1243.
- Hii, C.L., Law, C.L., & Cloke, M. (2008). Modelling of thin layer drying kinetics of cocoa beans during artificial and natural drying. *Journal of Engineering Science and Technology*, 1, 1-10.
- Hii, C.L., Law, C.L., Suzannah, S., Misnawi, & Cloke, M. (2009), Polyphenols in cocoa (*Theobroma cacao* L.). *Asian journal of food and Agro industry*, 2, 702-722.
- Hii, C.L. (2010), Investigation of drying and quality changes of cocoa beans under conditions in a heat pump dryer, PhD thesis, University of Nottingham, Malaysia Campus.
- Hii, C.L., Law, C.L., & Law, M.C. (2013), Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. *Applied Thermal Engineering*, 54, 264-271.
- Hughes, B.R., & Oates, M. (2011), Performance investigation of a passive solar assisted kiln in the United Kingdom.
- Irie, G., Zahouli, B., Guehi, S.T., Fae, M.A., Ban-Koffi, L., & Nemlin, J.G. (2010), Effects of drying methods on the chemical quality traits of cocoa raw material. *Advance journal of food science and technology*, 2, 184-190.
- Jain, D., & Tiwari, G.N. (2003), Thermal aspects of open sun drying of various crops. *Energy*, 28, 37-54.
- Jiang, H., Zhang, M., Fang, Z., Mujumdar, A.S., & Xu, B. (2015), Effect of different dielectric drying methods on the physic chemical properties of a starch water model system. *Food Hydrocolloids*, 52, 192-200.
- Jinap, S., & Dimick, P.S. (1990), Acidic characteristics of fermented cocoa beans from different countries of origin. *Journal of food science*, 55, 547-550.
- Jinap, S. & Thien, J. (1994). Effect of drying on acidity and volatile Fatty Acids Content of Cocoa Beans. *Journal Science Food Agric*, 65, 67-75.

- Johnfiah-Essien, W.A., & Navarro, S. (2010), Effect of storage management on free fatty acid in dry cocoa beans. 10 th International Working Conference on stored product protection. Estoril Congress Centre, Portugal. 27 th June to 2 nd July.
- Kanmogne, A., Jannot, Y., Lips, B., & Nganhou, J. (2012), Sorption isotherms and drying characteristic curve of fermented cocoa. *International Journal of science and Technology*.
- Kiranoudis, C.T., Maroulis, S.B., & Marinos-Jouris, D. (1992), Drying kinetics of onion and green pepper. *Drying Technology*, 10, 995-1011.
- Komolafe, C.A., Adejumo, A.O.D, Awogbemi, O., & Adeyeye, A.D. (2014), Development of a cocoa beans batch dryer. *American Journal of Engineering Research*, 9, 171-176.
- Kyi, T.M., Daud, W.R., Mohammed, A.B., Samsudin, M.W., Kadhum, A.A.A., & Talib, M.Z.M. (2003), The kinetics of polyphenol degradation during the drying of Malaysian cocoa beans. *International journal of food science and technology*, 40, 323-331.
- Leon, M.A., Kumar, S., & Bhattacharya, S.C. (2002), A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 367-393.
- Lewis, W.K. (1921), The rate of drying of solid materials. *Indus. Eng. Chem-Sympos. Drying*, 3, 427-432.
- Liu, Z., Wu, Z., Wang, X., Song, X., Song, J., & Wu, W. (2015), Numerical simulation and experimental study of deep bed corn drying based on water potential.
- Lopez, J., Uribe, E., Vega, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E. & Di Scala, K. (2010). Effect of Air Temperature on Drying Kinetics, Vitamin C, Antioxidant Activity, Total Phenolic Content, Non enzymatic Browning and Firmness of Blueberries Variety O'Neil. *Food Bioprocess Technology*, 3, 772-777.
- Luz, G.R., Santos W.A., Matos, L.M., Paraiso, P.R., & Andrade, C.M.G. (2010), Dynamic modeling and control of soybean meal drying in a direct rotary dryer. *Food and bioproducts processing*, 88, 90-98.
- Mabrouk, S.B., Khiari, B., & Sassi, M. (2006), Modelling of heat and mass transfer in a tunnel dryer. *Applied Thermal Engineering*, 26, 2110-2118.
- Moreira, R., Chenlo, F., & Torres, M.D. (2009), Simplified algorithm for the prediction of water sorption isotherms of fruits, vegetables and legumes based upon chemical composition. *Journal of food engineering*, 94, 334-343.
- Mujumdar, A.S. (2007). An overview of innovation in industrial drying: Current status and R&D needs. *Transport in Porous Media*, 66, 3-18.

- Mujumdar, A.S., & Law, C.L. (2010), *Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing*. *Food Bioprocess Technology*, 3, 843-852.
- Murphy, R., & Food, J. (2004), *Cocoa quality, a Chocolate Manufacturer's perspective*. *Global research on cocoa (GRO-Cocoa)*, USDA, CABI Bioscience, Issue 5, June 2004.
- Nicholas, A.M. (2012), *Drying characteristics of cocoa beans using an artificial dryer*. *Journal of engineering and applied sciences*, 7, 194-197.
- Nikolopoulos, N., Violidakis, I., Karampinis, E., Agraniotis, M.M Bergins, C., Grammelis, P., & Kakaras, E. (2015), *Report on comparison among current industrial scale lignite drying technologies (A critical review of current technologies)*. *Fuel*, 155, 86-114.
- Ndukwu, M.C., Ogunlowo, A.S., & Olukunle, O.J. (2010), *Cocoa bean (Theobroma cacao L.) drying kinetics*. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70, 633-639.
- Oke, D.O., & Omotayo, K.F. (2012). *Effect of forced air artificial intermittent drying on cocoa beans in South Western Nigeria*. *Journal of Cereals and Oil seeds*, 3, 1-5.
- Opoku- Ameyaw, K., Baah, F., Gyedu-Akoto, E., Anchirinah, V., Dzahini-Obiatey, H.K., Cudjoe, A.R., Acquay, S., & Opoku, S.Y. (2010), *Cocoa Manual; A source book for sustainable cocoa production*. *Cocoa research institute of Ghana*.
- Palaniappan, C., & Subramanian, S.V. (1998), *Economic of solar aire pre heating in south Indian tea factories: a case study*. *Solar Energy*, 63, 31-37.
- Pakowski, Z., & Mujumbar, A.S. (1987), *Basic process calculations in drying*, in *Handbook of industrial Drying*. 1 st ed, A. Mujumbar (Ed), Marcel Dekker, New York, 82-129.
- Patera, A., Derome, D., Griffa, M., & Carmeliet, J. (2013), *Hysteresis in swelling and in sorption of wood tissue*. *Journal of Structural Biology*, 182, 226-234.
- Perera, C.O., & Rahman, M.S. (1997), *Heat pump deshumidifier drying of food*. *Trends food Sci. Technol*, 8, 75-79.
- Perry, J.H. (2007), *Chemical Engineering Handbook*, 8 th ed., McGraw-Hill, New York, pp.28.
- Prabhakaran, K.P. (2010). *The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World*.
- Purohit, P., & Kandpal, T.C. (2005), *Solar crop dryer for saving commercial fuels: a techno economic evaluation*. *International Journal of Ambien Energy*, 26, 3-12.
- Purohit, P., Kumar, A., & Kandpal, T.C. (2006), *Solar drying vs. open sun drying: A framework for financial evaluation*. *Solar energy*, 80, 1568-1579.

- Radajewski, W., Gaydon, D., & McGahan, E.J. (1990), Optimization of solar hay drying in a step flow dryer.
- Raman, S.V., Iniyar, S., & Goic, R. (2012), A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2652-2670.
- Roca, E., Guillard, V., Guilbert, S., & Gontard, N. (2006). Moisture migration in a cereal composite food at high water activity: Effects of initial porosity and fat content. *Journal of cereal science*, 43, 144-151.
- Rondon, J.B., & Cumana, J.J. (2005). Revisión taxonómica de género *Theobroma* (Sterculiaceae) en Venezuela. *Acta Bot. Venezuel*, 28, 113-133.
- Sandoval, A.J., & Barreiro, J.A. (2002), Water sorption isotherms of non fermented cocoa beans (*Theobroma cacao*). *Journal of food engineering*, 51, 119-123.
- Sharma, A., Chen, C.R., & Lan, N.V. (2009), Solar energy drying systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13, 1185-1210.
- Strumillo, C., & Kudra, T. (1986), *Drying: Principles, Applications and design*. Gordon and Breach, New York.
- Vega, R.A., & Martinez, W.A. (2015), Diseño e implementación de un sistema rotatorio de flujo constante para secado de cacao utilizando transferencia de calor por convección y control predictivo basado en el modelo. Tesis para obtener el título de ingeniero electrónico y eléctrico, Universidad Politecnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.
- Vijaya, S., Iniyar, S., & Goic, R. (2012), A review of solar drying technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16, 2652-2670.
- Westerman, P.W., White, G.M., & Ross, I.J. (1973), Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. *Trans. ASAE*, 16, 1136-1139.
- Wood, G.A.R., & Lass, R.A. (1987), *Cocoa*. John Wiley and Sons Inc. New York. 4th Edition.
- Xie, W.T., Dai, Y.J., Wang, R.Z., & Sumathy, K. (2011), Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2588-2606.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J., & Oliveira, F.A.R. (2008). Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis is intermediate moisture content banana. *Journal of food Engineering*, 86, 342-348.
- Yanniotis, S., & Blahovec, J. (2009), Model analysis of sorption isotherms. *Food science and technology*, 42, 1688-1695.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. & Marinos Jouris, D. (1994). Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology*, 12, 1653-1666.

ANEXOS

ANEXO A

Ajuste de los datos experimentales de la Temperatura del aire desecante en la entrada de la cámara de secado y de la Temperatura ambiente mediante series de Fourier.

Una función periódica $f(t)$, se puede descomponer en una serie infinita de senos y cosenos, tal como se muestra en la siguiente ecuación.

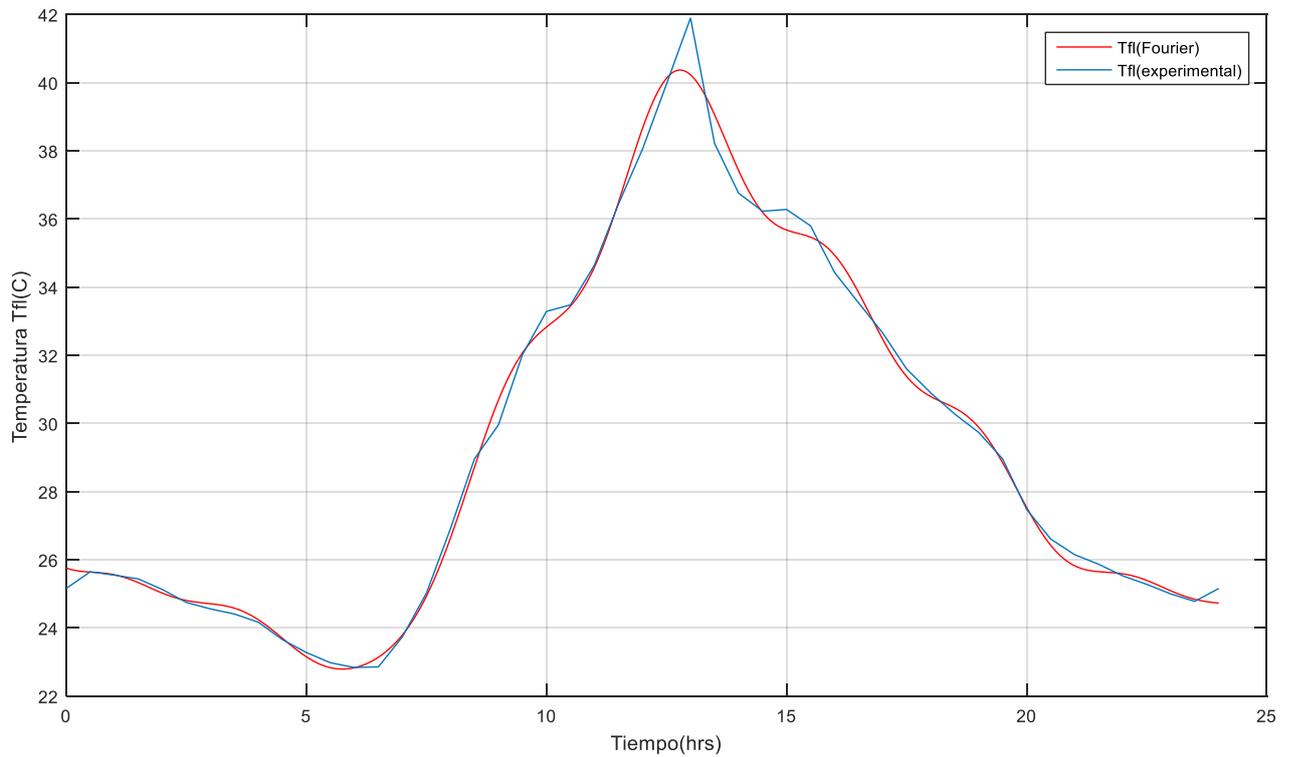
$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos n\omega t + a_2 \cos n\omega t + \dots + b_1 \sin n\omega t + b_2 \sin n\omega t + \dots$$

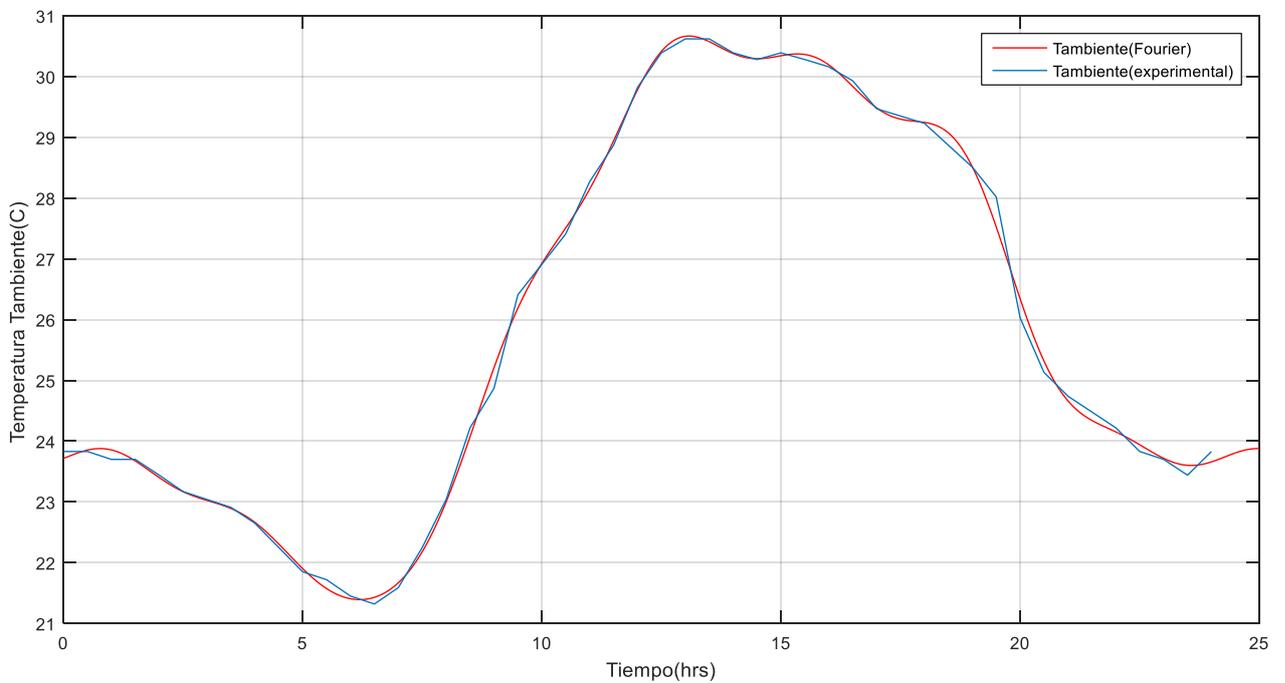
Donde $f(t)$ representa la temperatura del aire desecante en la entrada de la cámara de secado (°C) y temperatura del ambiente (°C); n representa el número de armónicos, t el tiempo en horas, ω representa la frecuencia angular fundamental, y a_0, a_1, \dots y b_1, b_2, \dots son los coeficientes de Fourier que se muestran en la siguiente tabla:

Coeficientes de Fourier	Temperatura del aire desecante (°C)	Temperatura del ambiente (°C)
a_0	29.86	25.91
a_1	-2.997	-2.422
b_1	-6.595	-3.467
a_2	0.2317	0.4955
b_2	1.949	1.07
a_3	-0.2656	-0.4853
b_3	-0.4193	0.4878
a_4	-0.3443	0.1001
b_4	-0.3929	0.07658
a_5	0.2462	0.2295
b_5	0.3422	-0.04174
a_6	-0.1787	-0.0225
b_6	-0.4957	0.02728
a_7	-0.3067	-0.07581
b_7	0.2473	-0.1319
a_8	--	-0.1274
b_8	--	0.1078
ω	0.1488	0.1298

Gráfica comparativa entre los datos de la temperatura del aire desecante ($^{\circ}\text{C}$) en la entrada de la cámara de secado y su aproximación con series de Fourier.



Gráfica comparativa entre los datos de la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) y su aproximación con series de Fourier.



ANEXO - B

Código en Matlab del modelo matemático del secador solar.

```
clc
close all
clear all

%----Modelación numérica del secado en lecho profundo basado
%---- en el potencial de agua

%% PARAMETROS DE ENTRADA AL MODELO

a=0.2755; b=-0.34; D0=0.008 ;r0=D0/2; as=3/r0;

%Cálculo del flujo másico de aire
l1=0.53;
l2=0.51;
A=l1*l2;
L1=100/100;
V=A*L1;
v=4; %Velocidad del aire
ma=0.028;
Ga=(ma/A)*3600;
N=4;
L=0.5;
x=L/N;
h=0.5;
tfinal=24*4.5;
Mi=0.2409
v=1;

Sp=0.685*0.51;

%Coeficientes de transferencia de calor por conducción

lamb_madera=0.13;
lamb_vidrio=0.05;
lamb_yeso=0.35;

em=2.5/100;
ev=6/100;
ey=1.5/100;

hcp=(lamb_madera/em)+(lamb_vidrio/ev)+(lamb_yeso/ey);
hvv=(5.67+3.86*v);
hvfpi=4.1;

%Coeficiente de Fourier

a0=29.86
a11=-2.997
b1 =-6.595
a22 =0.2317
b2 =1.949
a33 =-0.2656
b3 =-0.4193
a4 =-0.3443
b4 =-0.3929
```

```

a5 =0.2462
b5 =0.3422
a6 =-0.1787
b6 =-0.4957
a7 =-0.3067
b7 =0.2473
w =0.1488

```

```
%Temperatura de ambiente
```

```

a0a=25.91
a1a=-2.422
b1a =-3.467
a2a =0.4955
b2a =1.07
a3a =-0.4853
b3a =0.4878
a4a =0.1001
b4a =0.07658
a5a =0.2295
b5a =-0.04174
a6a =-0.0225
b6a =0.02728
a7a =-0.07581
b7a =-0.1319
a8a =-0.1274
b8a =0.1078
wa =0.1298

```

```
%% DETERMINACION DEL NUMERO DE NODOS PARA LA SIMULACION
```

```

N=L/x;
N=ceil(N);

```

```

X=tfinal/h;
X=ceil(X);

```

```
%% CONDICIONES INICIALES
```

```
M0=56;
```

```
M0=100*M0/(100-M0);
```

```

for n=2:N
    M(n,13)=M0;
    Tg(n,13)=20;
end

```

```
% load('Tf0.mat');
```

```

for i=14:X
    H(1,i)=0.01;
end

```

```
for ia=14:(X)
```

```

T(1,ia)=a0+a11*cos(ia*w)+b1*sin(ia*w)+a22*cos(2*ia*w)+b2*sin(2*ia*w)+a33*
cos(3*ia*w)+b3*sin(3*ia*w)+a4*cos(4*ia*w)+b4*sin(4*ia*w)+a5*cos(5*ia*w)+b
5*sin(5*ia*w)+a6*cos(6*ia*w)+b6*sin(6*ia*w)+a7*cos(7*ia*w)+b7*sin(7*ia*w)
;

```

```
Ta(1,ia)=a0a+a1a*cos(ia*wa)+b1a*sin(ia*wa)+a2a*cos(2*ia*wa)+b2a*sin(2*ia*
wa)+a3a*cos(3*ia*wa)+b3a*sin(3*ia*wa)+a4a*cos(4*ia*wa)+b4a*sin(4*ia*wa)+a
5a*cos(5*ia*wa)+b5a*sin(5*ia*wa)+a6a*cos(6*ia*wa)+b6a*sin(6*ia*wa)+a7a*co
s(7*ia*wa)+b7a*sin(7*ia*wa)+a8a*cos(8*ia*wa)+b8a*sin(8*ia*wa);
Tsky(1,ia)=Ta(1,ia)-6;
```

```
End
```

```
%% CALCULO DE LOS PARAMETROS INTERMEDIOS y H, M,T,Tg
```

```
for j=14:X
for n=2:N
```

```
    %Calculo de M(n,j)
```

```
    RH(n-1,j)=1.626*H(n-1,j)*(10^5)/((1+1.608*H(n-
1,j))*6892.4*exp(54.633-12301.69/(1.8*T(n-1,j)+492)-5.169*log(1.8*T(n-
1,j)+492)));
    RH(n-1,j)=abs(RH(n-1,j));
    Me(n-1,j)=100*(0.01087324+0.23758842*RH(n-1,j)-0.63848052*(RH(n-
1,j)^2)+0.56197989*(RH(n-1,j)^3))*exp((0.02965424-0.33506858*RH(n-
1,j)+0.95779665*(RH(n-1,j)^2)-1.27182954*(RH(n-1,j)^3)+0.573953345*(RH(n-
1,j)^4))*(T(n-1,j)-57.2913401));
    Me(n-1,j)=abs(Me(n-1,j));
```

```
    K(n-1,j)=(pi*pi/(9))*as*as*3600*8.64*(10^-4)*exp(-
39.94*1000/(8.314*(Tg(n,j-1)+273)));
    K(n-1,j)=abs(K(n-1,j));
```

```
    k1(n-1,j)=-K(n-1,j)*(M(n,j-1)-Me(n-1,j));
    k2(n-1,j)=-K(n-1,j)*((M(n,j-1)+0.05*k1(n-1,j))-Me(n-1,j));
    k3(n-1,j)=-K(n-1,j)*((M(n,j-1)+0.05*k2(n-1,j))-Me(n-1,j));
    k4(n-1,j)=-K(n-1,j)*((M(n,j-1)+0.1*k3(n-1,j))-Me(n-1,j));
    M(n,j)=M(n,j-1)+0.0167*(k1(n-1,j)+2*k2(n-1,j)+2*k3(n-1,j)+k4(n-1,j));
    dM(n,j)=0.0167*(k1(n-1,j)+2*k2(n-1,j)+2*k3(n-1,j)+k4(n-1,j));
```

```
    %Calculo de H(n,j)
```

```
    rhop(n,j-1)=726.4-4.135*-4.135*(M(n,j-1)/(100+M(n,j-1)));
    rhop(n,j-1)=abs(rhop(n,j-1));
```

```
    H(n,j)=H(n-1,j)-0.01*(rhop(n,j-1)*x/(Ga*2*h))*(M(n,j)-M(n,j-1));
```

```
    %Calculo de T(n,j)
```

```
    Ca(n-1,j)=1003.4+0.178*T(n-1,j);
    Ca(n-1,j)=abs(Ca(n-1,j));
```

```
    Cv(n-1,j)=1859+0.236*T(n-1,j);
    Cv(n-1,j)=abs(Cv(n-1,j));
```

```
    ua(n-1,j)=(1.691*(10^-5)+4.987*(10^-8)*T(n-1,j)-3.187*(10^-11)*(T(n-
1,j)^2)+1.319*(10^-14)*(T(n-1,j)^3));
    ua(n-1,j)=abs(ua(n-1,j));
```

```
    ha(n-1,j)=172.2*(Ga^0.5)*as;
    ha(n-1,j)=abs(ha(n-1,j));
```

```

    hrc(1,j)=0.93*(5.670373*(10^-8))*(T(n-1,j)+Tsky(1,j))*((T(n-
1,j)^2)+(Tsky(1,j)^2));
    Tap(1,j)=(Ta(1,j)*hvv+Tsky(1,j)*hrc)/(hvv+hrc);
    Tpi(1,j)=(hvfpi*(hcp+hrc(1,j)+hvv)*T(n-
1,j)+(hcp*(hrc(1,j)+hvv)*Tap(1,j)))/((hcp*(hrc(1,j)+hvv)+(hvfpi*(hcp+hr
c(1,j)+hvv)));

    per=x*3600*(hvfpi*Sp*(T(n-1,j)-Tpi(1,j)))/(Ga*Ca(n-
1,j)+Ga*H(n,j)*Cv(n-1,j));
    T(n,j)=T(n-1,j)-(ha(n-1,j)*x/(Ga*Ca(n-1,j)+Ga*H(n,j)*Cv(n-
1,j)))*(T(n-1,j)-Tg(n,j-1));

    %Calculo de Tg(n,j)

    Cp(n,j-1)=1755+23.45*0.01*M(n,j-1);
    Cp(n,j-1)=abs(Cp(n,j-1));

    hfg(n,j-1)=2501.6+(1840-4180)*(Tg(n,j-1)+273);
    hfg(n,j-1)=abs(hfg(n,j-1));

    Cw=4200;

    Tg(n,j)=Tg(n,j-1)+(10/6)*(h*ha(n-1,j)/(rhop(n,j-1)*Cp(n,j-
1)+rhop(n,j-1)*Cw*0.01*M(n,j-1)))*(T(n-1,j)-Tg(n,j-1))-
(10/6)*Ga*h*(hfg(n,j-1)+(T(n,j)-Tg(n,j-1))*Cv(n-1,j))*(H(n,j)-H(n-
1,j))/(x*(rhop(n,j-1)*Cp(n,j-1)+rhop(n,j-1)*Cw*0.01*M(n,j-1)));
    LV(n,j)=hfg(n,j-1)+(T(n,j)-Tg(n,j-1))*Cv(n-1,j);
    end

end
t=6:h:(tfinal-0.5);
t1=6:h:(tfinal-1);

M4=M(4,:);
M4=M4(13:1:X);
M3=M(3,:);
M3=M3(13:1:X);
M2=M(2,:);
M2=M2(13:1:X);

plot(t,M4,'b','linewidth',3)
hold on
plot(t,M3,'r','linewidth',3)
plot(t,M2,'k','linewidth',3)

legend('Bandeja 3','Bandeja 2','Bandeja 1')
xlabel('tiempo(hrs del dia)')
ylabel('Humedad del cacao(%db)')
grid on

figure(2)
dM1=dM(2,:);
dM1=dM1(2:1:X);
divM=M/M0;
divM1=divM(2,:);
divM1=divM1(1:1:X-1);
plot(divM1(13:1:X-1),-dM1(13:1:X-1)/0.5,'k','linewidth',3)

```

```

hold on

dM2=dM(3,:);
dM2=dM2(2:1:X);
divM2=M/M0;
divM2=divM2(3,:);
divM2=divM2(1:1:X-1);
plot(divM2(13:1:X-1),-dM2(13:1:X-1)/0.5,'r','linewidth',3)

dM3=dM(4,:);
dM3=dM3(2:1:X);
divM3=M/M0;
divM3=divM3(4,:);
divM3=divM3(1:1:X-1);
plot(divM3(13:1:X-1),-dM3(13:1:X-1)/0.5,'b','linewidth',3)
legend('Bandeja 1','Bandeja 2','Bandeja 3')
xlabel('M/M0 (db)')
ylabel('-dM/dt (kg de agua/kg de cacao *h^-1)')
grid on

figure(3)
dM11=dM(2,:);
dM11=dM11(14:1:X);

dM22=dM(3,:);
dM22=dM22(14:1:X);

dM33=dM(4,:);
dM33=dM33(14:1:X);
plot(t1,-dM11/0.5,'k','linewidth',3)
hold on
plot(t1,-dM22/0.5,'r','linewidth',3)
plot(t1,-dM33/0.5,'b','linewidth',3)
legend('Bandeja 1','Bandeja 2','Bandeja 3')
xlabel('tiempo(hrs del dia)')
ylabel('-dM/dt (kg de agua/kg de cacao *h^-1)')
grid on

figure(4)

plot(H(2,:),'.k')
hold on
plot(H(3,:),'.r')
plot(H(4,:),'.b')
legend('layer 1','layer 2','layer 3','layer 4')
xlabel('tiempo(hrs)')
ylabel('Humedad especifica del aire(kg/kg)')
grid on

figure(5)
Tent=T(1,:);
Tent=Tent(14:1:X)

T1=T(2,:);
T1=T1(14:1:X);

T2=T(3,:);
T2=T2(14:1:X);

```

```

T3=T(4,:);
T3=T3(14:1:X);

plot(t1,Tent,'g','linewidth',2)
hold on
plot(t1,T1,'k','linewidth',2)
plot(t1,T2,'r','linewidth',2)
plot(t1,T3,'b','linewidth',2)
legend('Entrada a la camara','Bandeja 1','Bandeja 2','Bandeja 3')
xlabel('tiempo(hrs)')
ylabel('Temperatura del aire desecante (C)')
grid on

figure(6)
Tg1=Tg(2,:);
Tg1=Tg1(13:1:X)

Tg2=Tg(3,:);
Tg2=Tg2(13:1:X)

Tg3=Tg(4,:);
Tg3=Tg3(13:1:X)

plot(t,Tg1,'k','linewidth',3)
hold on
plot(t,Tg2,'r','linewidth',3)
plot(t,Tg3,'b','linewidth',3)

legend('Bandeja 1','Bandeja 2','Bandeja 3')
xlabel('tiempo(hrs)')
ylabel('Temperatura del cacao (C)')
grid on

figure(7)

H1=H(2,:);
H1=H1(14:1:X);

H2=H(3,:);
H2=H2(14:1:X);

H3=H(4,:);
H3=H3(14:1:X);

plot(t1,H1,'k','linewidth',3)
hold on
plot(t1,H2,'r','linewidth',3)
plot(t1,H3,'b','linewidth',3)

legend('Bandeja 1','Bandeja 2','Bandeja 3')
xlabel('tiempo(hrs)')
ylabel('Humedad especifica del aire desecante')
grid on
axis([6 75 0.005 0.035])

```