

Universidad de Cuenca
Facultad de Ciencias Químicas
Escuela de Ingeniería Química



**Estudio económico-técnico y optimización del proceso
de secado del cacao en grano**

Tesis previa a la obtención de título de Ingeniero Químico

Autor: Pablo André Arias Mora

Director: Ing. Edgar Gustavo Cardoso Martínez

Cuenca – Ecuador

2015



Resumen

Esta tesis inicia abordando las falencias del estado actual de la producción de cacao en grano seco. Basándose en las normas técnicas nacionales, se plantean los criterios pertinentes a considerarse en la operación del secado del cacao en grano fermentado y a continuación se realiza un estudio económico-técnico de la operación del secado del cacao en grano, con el propósito de optimizar el proceso y proponer soluciones y mejoras que tengan aplicación inmediata y sostenible en la práctica.

Los estudios económico y técnico de la operación del secado implican un balance de materia en el procesamiento y un balance económico. Las soluciones propuestas parten de los estudios realizados y del análisis y determinación de propiedades para el secado, tales como: la determinación del contenido de humedad, la determinación del precio de venta, la superficie específica para el proceso de secado, el tanto por uno de masa que se obtiene luego de la fermentación, la relación entre el contenido de humedad del cacao en grano fermentado y su actividad acuosa, y los puntos óptimos de secado del cacao en grano.

Dentro de las soluciones y mejoras, se tiene la propuesta de implementación de un equipo de secado por lotes, de energía solar; su diseño se basa en los estudios realizados y las propiedades determinadas; además, para su dimensionamiento, se determinó el tamaño del lote de producción y sus proyecciones, basándose en el historial de datos facilitados por el productor de cacao en grano, quién representa la parte interesada en el estudio.

Palabras clave:

cacao en grano, secado de cacao en grano, cacao en grano fermentado, actividad acuosa del cacao en grano, contenido de humedad del cacao en grano, secador de cacao en grano, energía solar térmica.



Abstract

This thesis begins by addressing the shortcomings of the current state of the production of dried cocoa beans. Based on national standards, the criteria to be considered in the fermented cocoa beans drying operation is given and then an economic-technical study of cocoa beans drying operation is conducted, with the purpose so as to optimize the process and to propose solutions and improvements that have immediate and sustainable implementation in practice.

The economic and technical studies of the drying operation involve a material balance in processing and an economic balance. The proposed solutions are based on the studies and the analysis and determination of properties for the drying process, such as the determination of moisture content, the determination of the selling price, the specific surface area for drying, parts per unit of mass obtained after the fermentation, the relationship between the moisture content of fermented cocoa beans and the water activity, and optimum points of cocoa beans drying process.

Among the solutions and improvements, there is the proposal of implementing a solar energy, batch drying equipment; its design is based on the studies conducted and the determined properties; also for its design, the size of the production batch and projections were determined, based on record data provided by the producer of cocoa beans, who represents the stakeholder in the study.

Keywords:

cocoa beans, cocoa beans drying, fermented cocoa beans, water activity of cocoa beans, moisture content of cocoa beans, cocoa beans dryer.



Índice

Contenido	Página
Resumen	2
<i>Abstract</i>	3
Índice	4
Cláusula de derechos de autor	10
Cláusula de propiedad intelectual	11
Dedicatoria	12
Agradecimientos	13
Capítulo 1: Antecedentes de la producción del cacao en grano en el cantón Naranjal	14
1.1 Introducción	14
1.2 Proceso de producción del cacao en grano seco	14
1.3 Métodos en uso para el secado del cacao en grano en el cantón Naranjal	15
1.3.1 Secado del cacao en grano en tendales	15
1.3.2 Secado del cacao en grano, mediante el uso de un secador a GLP	16
1.3.3 Secado del cacao en grano, mediante el uso de un secador industrial	17
Capítulo 2: Criterios técnicos de proceso de secado del cacao en grano	18
2.1 Criterios de la fermentación previa al secado	18
2.2 Criterios del secado	20



Capítulo 3:	Estudio técnico de la producción de cacao en grano	21
3.1	Balance de materia del procesamiento del cacao en baba	21
3.1.1	Balance de materia de la fermentación del cacao en baba	21
3.1.2	Balance de materia del secado del cacao en grano fermentado	22
3.1.3	Balance general de materia del procesamiento del cacao en grano	23
3.2	Determinación del contenido de humedad del cacao en grano	24
3.2.1	Determinación del contenido de humedad del cacao en grano fermentado	24
3.2.2	Determinación del contenido de humedad del cacao en grano seco	25
3.3	Ecuación general del balance de materia del procesamiento del cacao en grano	25
Capítulo 4:	Estudio económico de la producción de cacao en grano	26
4.1	Determinación del precio de venta del cacao fermentado	26
4.2	Determinación del precio de venta del cacao en grano seco	26
Capítulo 5:	Determinación de la producción de cacao en grano	30
5.1	Producción de cacao en grano clasificado y no clasificado	30
5.2	Proyecciones de la producción de cacao en grano	34



5.2.1	Proyección realista de la producción de cacao en grano	34
5.2.2	Proyección optimista de la producción de cacao en grano	35
Capítulo 6:	Determinación de las propiedades del cacao en grano para el secado	37
6.1	Propiedades del cacao en grano para el secado	37
6.1.2	Materiales y Métodos	37
6.1.3	Determinación de la superficie específica del cacao en grano para el secado	38
6.1.4	Determinación de la superficie total del cacao en grano para el secado, en base a la producción	41
6.1.5	Determinación del tanto por uno de masa que se obtiene luego del proceso de fermentación, siendo el total la masa del cacao en baba	41
6.1.6	Determinación de la actividad acuosa del cacao en grano fermentado en relación con su contenido de humedad	42
6.1.7	Determinación del volumen específico aparente del cacao en grano	44
Capítulo 7:	Determinación de los puntos óptimos de secado del cacao en grano	46
7.1	Determinación del punto óptimo de secado en base al aspecto económico.	47
7.2	Determinación del punto óptimo de secado en base al aspecto técnico.	48



7.3	Determinación del punto óptimo de secado en base a la conservación de sus propiedades.	49
7.3.1	Traducción del mapa de estabilidad de los alimentos como función de su actividad acuosa	51
7.4	Determinación del punto óptimo de secado del cacao en grano en base a los aspectos económico, técnico y la conservación de sus propiedades	52
7.4.1	Humedad de monocapa y transición vítrea	52
7.4.2	Determinación del punto óptimo, definitivo, del secado del cacao en grano	53
Capítulo 8:	Estudio y condiciones del proceso de secado del cacao en grano	54
8.1	Método de operación	54
8.2	Método de suministro de la energía necesaria para el secado	54
8.3	Condiciones del secado	54
8.4	Datos del proceso de secado del cacao en grano	55
8.4.1	Aire en el inicio del proceso de secado	56
8.4.2	Aire al final del proceso de secado	57
Capítulo 9:	Diseño del equipo de secado	59
9.1	Diseño de la cámara de secado	59
9.1.1	Cálculo de las dimensiones óptimas de la cámara de secado	63
9.1.2	Cálculo de la mínima superficie de materiales necesaria para construir la cámara de secado	63
9.2	Esquema del secado del cacao en grano	66



9.3	Balance general de materia para el secado del cacao en grano	67
9.4	Balance general de energía para el de secado del cacao en grano	69
9.4.1	Balance de energía del aire para el secado	70
9.4.2	Balance de energía del cacao en grano	72
9.5	Balance general de materia y energía para el proceso de secado	75
9.6	Cálculo de la temperatura del aire al inicio del secado	76
9.7	Suministro de energía para el proceso de secado	80
9.7.1	Selección de la tecnología para el suministro de energía para el proceso de secado	80
9.7.2	Materiales del equipo de secado	81
9.8	Irradiancia solar térmica en el cantón Naranjal	82
9.9	Cálculo de la temperatura máxima permisible del colector solar térmico	83
9.10	Balance de energía del colector de energía solar térmica	85
9.11	Cálculo de la velocidad del aire para el secado del cacao en grano	90
9.11.1	Cálculo del diferencial de presión del aire	91
9.11.2	Cálculo del peso específico medio logarítmico del aire	91
9.12	Cálculo de la velocidad de secado del cacao en grano	93



9.13	Cálculo del tiempo de secado	95
9.14	Inclinación del colector de energía solar térmica	96
9.15	Cálculo de la potencia necesaria para el colector de energía solar térmica	96
9.16	Cálculo de las pérdidas de calor en el equipo	98
9.16.1	Cálculo de las pérdidas de calor en colector de energía solar térmica	99
9.16.2	Cálculo de las pérdidas de calor en la cámara de secado	100
9.17	Cálculo del área de ingreso del aire en la cámara de secado	102
9.18	Aislamientos térmicos de los colectores de energía solar térmica	104
9.19	Diagrama del equipo de secado	104
9.19.1	Vista del interior del equipo de secado	105
9.19.2	Vista superior del equipo de secado	107
9.19.2	Vista frontal del equipo de secado	108
	Conclusiones	109
	Recomendaciones	113
	Bibliografía	114



Cláusula de derechos de autor

Yo, **Pablo André Arias Mora**, autor de la tesis "Estudio económico-técnico y optimización del proceso de secado del cacao en grano", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5, literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este, requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Químico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 29 de Junio del 2015

Pablo André Arias Mora

C.I: 0104382916



Cláusula de propiedad intelectual

Yo, **Pablo André Arias Mora**, autor de la tesis “Estudio económico-técnico y optimización del proceso de secado del cacao en grano”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 29 de Junio del 2015

Pablo André Arias Mora

C.I: 0104382916



Dedicatoria:

Esta obra va dedicada a mis vecinos, por estar siempre a mi lado (de manera humorística). De manera formal y respetuosa; este aporte, expresa mi simpatía a todas aquellas personas que mejoran el mundo en el que existimos, a todos esos altruistas y filántropos; ahora estamos en el proceso de poder disfrutar de un mejor chocolate.



Agradecimientos:

Estoy muy agradecido con las personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo de esta tesis; agradezco a todos los investigadores que han compartido su trabajo, agradezco a la Universidad de Cuenca por concederme gratuitamente educación de la más alta excelencia; agradezco a todos los profesores, autoridades y funcionarios de la Universidad de Cuenca, por todo el tiempo que me han dedicado; agradezco a mi tutor de tesis por esencial asistencia, agradezco al tribunal de sustentación por sus sugerencias y contribuciones; agradezco a mi familia y amigos por el apoyo brindado, agradezco al personal de la oficina de límites de la Prefectura del Azuay por su interés en mi investigación y agradezco a los productores de cacao en grano por permitirme la oportunidad de realizar este estudio.



Capítulo 1

Antecedentes de la producción del cacao en grano en el cantón Naranjal

1.1 Introducción

Este trabajo de tesis sostiene que la ingeniería es innovación, por lo que su objetivo es realizar un estudio económico-técnico del secado del cacao en grano, con el propósito de optimizar el proceso y proponer soluciones y mejoras en la práctica. También sostiene que la ciencia no es totalitaria, sino emergente, está en evolución; por lo que el estudio y resultado de ésta tesis están sujetos a mejora continua.

Además éste trabajo de tesis defiende que la ingeniería se aplica a la resolución de problemas que afectan la actividad cotidiana de la sociedad; por lo que proyecta tener aplicación inmediata en nuestro medio y de manera específica en la producción de cacao en grano del cantón Naranjal; sin embargo, este estudio y sus resultados pueden extenderse a cualquier sector productor de cacao en grano, de acuerdo a sus propias condiciones del medio.

El cantón Naranjal es una entidad territorial subnacional ecuatoriana, en la región costa; sus condiciones climáticas hacen posible el cultivo de la planta de cacao. *Theobroma cacao* es el nombre científico del árbol de cacao. *Theobroma* quiere decir alimento de los dioses en griego y *cacao* hace referencia al verbo comprar en las lenguas mesoamericanas nativas. Según sus características, el cacao del Ecuador se clasifica en ARRIBA y CCN51 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).

1.2 Proceso de producción del cacao en grano seco

La producción del cacao en grano empieza por la cosecha de los frutos del árbol de cacao, luego se extraen granos, recubiertos por una capa de pulpa mucilaginosa; se denominan cacao en baba. (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).



El cacao en baba pasa por un proceso de fermentación, donde ocurre la muerte del embrión, se elimina la pulpa que rodea a los granos y se da lugar al proceso bioquímico que le confiere sus propiedades organolépticas características (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006). A continuación, el cacao fermentado pasa a un proceso de secado. Se denomina grano seco cuando este no supera el 7% de humedad (base húmeda). Cabe aquí señalar que esta tesis profundizará únicamente en los aspectos concernientes al secado del cacao en grano.

1.3 Métodos en uso para el secado del cacao en grano en el cantón Naranjal

Primero se discutirá sobre el uso de los métodos actuales para el secado del cacao en grano; dichos métodos son usados por los productores agrícolas y comerciantes de cacao en grano y no sólo en nuestro medio, sino en varios otros lugares del mundo. El estado actual del secado del cacao en grano se puede evidenciar rápidamente mediante la visita a dichos lugares o a través de documentos de internet, tales como el blog de internet “*On the cocoa trail*” de Juliet Bray, URL: www.onthecocoatrail.com (Bray, 2015); no obstante, en éste estudio se expondrán fotografías del secado del cacao en grano en el cantón Naranjal para exponer tales métodos en uso.

1.3.1 Secado del cacao en grano en tendales

El secado del cacao en grano en tendales consiste en esparcir los granos sobre la superficie de una losa de cemento o una lámina de plástico flexible y barato, para luego dejar que el cacao en grano se seque con las condiciones del ambiente, revolviendo varias veces al día.

Este método sencillo y barato es ampliamente utilizado por los productores de cacao en grano, pero tiene muchas deficiencias: se necesita mano de obra para su vigilancia y manipulación, lo cual implica costos; además está expuesto a contaminación, a la lluvia y a la delincuencia; también requiere espacio y tiempo.



Figura 1. Secado del cacao en grano, en tendales. Ciudad de Naranjal. 2014. Fuente propia.

1.3.2 Secado del cacao en grano, mediante el uso de un secador a GLP

El secado del cacao en grano mediante el uso de un secador a gas consiste en esparcir los granos sobre la superficie de una plancha perforada de acero inoxidable, por la cual atraviesa una corriente de aire caliente, producto de la combustión del GLP, que a su vez es impulsado por el trabajo que ejerce un ventilador alimentado por energía eléctrica. Cabe mencionar que el aire caliente va mezclado con los gases producto de la combustión del GLP. La contaminación por humo o grano ahumado es un criterio de producto defectuoso (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).



Figura 2. Secado del cacao en grano, en secador a GLP. Ciudad de Naranjal. 2014. Fuente propia.

Este método no está disponible para la mayoría de productores agrícolas y comerciantes de cacao en grano; ya que no es sencillo ni es barato y requiere de un diseño especializado de equipos; el costo de los equipos y su funcionamiento es elevado, además de que también supone mayores costos por mantenimiento y mano de obra. Se tiene previsto que el precio del GLP industrial se incrementará en los próximos años (Diario El Tiempo, 2013).

Además de las desventajas económicas que implica éste método, también se tienen desventajas técnicas: el cacao en baba o fermentado tiene un alto contenido de humedad y de grasas en forma de manteca de cacao; sometido a la humedad del ambiente, las altas temperaturas de la plancha perforada de acero y el contacto directo con el aire caliente, está sujeto a reacciones de enranciamiento por oxidación e hidrólisis enzimática, ya que también intervienen las enzimas que producen los microorganismos durante la fermentación. El enranciamiento ocasiona pérdida de las propiedades organolépticas y ocasiona olores objetables. El olor a ácido butírico es un criterio de producto defectuoso (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).

1.3.3 Secado del cacao en grano, mediante el uso de un secador industrial

El uso de equipos industriales para el secado del cacao en grano ha sido ampliamente estudiado por pocos autores, tales como Nicholas Musa (Musa, 2012), quien además cita otros autores en su estudio, el cual recomienda éste tipo de secadores y realiza un estudio en el cual determina las características del secado del cacao en grano mediante el uso de secadores artificiales, llegando a la conclusión que altas velocidades de secado son obtenidas al incrementar la temperatura y velocidad del aire de secado (Musa, 2012). El uso de secadores industriales es ampliamente recomendado por investigadores, debido a que se pueden controlar los parámetros que intervienen en el secado, tales como: velocidad y temperatura del aire de secado. También se ha encontrado que, al contrastar con los métodos de secado expuestos anteriormente, que este tipo de secadores no están expuestos o se relacionan con las condiciones del ambiente, tales como la luz solar y la humedad.



El inconveniente de los secadores industriales radica principalmente en los costos elevados que implica el uso de éstos equipos: su costo de adquisición, operación y mantenimiento, el cuál no está disponible económicamente para la mayoría de productores de cacao en grano; además de que se requiere mano de obra capacitada para su operación, lo cual también representa en costo.

Estos equipos requieren de instalaciones apropiadas para su funcionamiento, tales como edificaciones industriales y laboratorios, además requieren de dispositivos adicionales para su funcionamiento, tales como equipos auxiliares, instalaciones eléctricas, etc. El uso de estos equipos está generalizado a los fabricantes que utilizan cacao en grano seco como materia prima para la elaboración de otros productos.

Capítulo 2

Criterios técnicos de proceso de secado del cacao en grano

2.1 Criterios de la fermentación previa al secado

Las principales razones para fermentar el cacao en baba según varios investigadores son que la acción de los microorganismos licúa la pulpa del cacao en baba, permitiendo un mejor drenado del contenido de agua (Musa, 2012). Además se puede deducir una disminución en el pH del cacao en grano debido a los subproductos de la fermentación como ácidos y alcoholes, que a su vez también disminuyen la actividad acuosa del producto, impidiendo la proliferación de microorganismos cuya acción pueda ocasionar cambios indeseables en este. Una buena fermentación ayuda a la conservación del cacao en baba antes del secado. Los problemas de contaminación con microorganismos en el cacao en grano ocurren debido al manejo y tiempos excesivos en la manipulación y transporte del cacao en baba o fermentado, teniendo en cuenta dos factores que intervienen en el desarrollo de los microorganismos: pH y actividad acuosa.



Figura 3. Cacao en grano secado en tendal. Ciudad de Naranjal. 2014. Fuente propia.



Figura 4. Cacao en grano secado mediante un secador. Ciudad de Naranjal. 2014. Fuente propia.



El cacao en grano fermentado previo al secado no debe contener moho; ya que tales microorganismos pueden penetrar en la estructura interna del grano y deteriorarlo, siendo este otro criterio de producto defectuoso según la NTE 0176 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).

2.2 Criterios del secado

El secado del cacao fermentado consiste en llegar desde el contenido de humedad inicial hasta un 7% (base húmeda), requisito de la NTE 0176 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006). Sin embargo, puede secarse hasta otros diferentes valores de contenido de humedad; este tema se abordará en el capítulo 7.

El secado del cacao en grano consiste en poner en contacto aire, con un bajo contenido de humedad relativa, con la superficie de los granos de cacao, con el objetivo de que este caudal de aire retire humedad del cacao en grano y por tanto disminuya su contenido de agua. El incremento de la temperatura no es de interés; salvo que sea para disminuir la actividad acuosa del aire, la temperatura debe mantenerse lo más baja posible para no acelerar las reacciones de enranciamiento e hidrólisis enzimática descritas en el proceso de secado mediante el uso de un secador a GLP, las cuales pueden provocar olor a ácido butírico (podrido), un criterio de producto defectuoso (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).

El proceso de secado requiere que el contenido de humedad del aire sea bajo, para que su actividad acuosa sea menor que la del producto y por lo tanto exista la fuerza impulsora para el secado, las condiciones del aire ambiental deben reunir este requisito de actividad acuosa baja. Además la cámara de secado debe estar aislada de la entrada de aire húmedo del ambiente, con el fin de evitar que el producto recupere su contenido de humedad durante o después del secado. El secador de cacao en grano debe situarse en un lugar que cumpla las condiciones antedichas.

Se colocará una sola capa de granos de cacao, con el objetivo de que no se formen granos múltiples, que es la unión de dos o más granos por restos de mucílago.



Los granos múltiples o pelota se consideran defectuosos según NTE 0176. El producto a obtenerse, luego del proceso de secado, se denomina cacao beneficiado y según la NTE 0176, se define como cacao beneficiado al cacao en grano fermentado, seco y limpio, no defectuoso, que cumpla con los requerimientos que se aplican en la misma norma para fines de comercialización (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).

Capítulo 3

Estudio técnico de la producción de cacao en grano

3.1 Balance de materia del procesamiento del cacao en baba

Se realizará un balance de materia, aplicable para un lote de producción de cualquier tamaño, considerando la pérdida de masa que se tiene durante la fermentación y durante el proceso de secado.

3.1.1 Balance de materia de la fermentación del cacao en baba

La masa del cacao en grano que se obtiene luego de la fermentación puede expresarse como relación en tanto por uno de la masa del cacao en baba:

$$F = \frac{M_F}{M_B} \quad (1)$$

Donde:

F : Tanto por uno de masa que se obtiene luego del proceso de fermentación, siendo el total la masa del cacao en baba.

M_F : Masa del cacao en grano fermentado.

M_B : Masa del cacao en baba.



Partiendo de la ecuación (1), la masa del cacao en grano fermentado se obtiene mediante la expresión:

$$M_F = F * M_B \quad (2)$$

La masa que se pierde durante la fermentación depende no sólo de las reacciones químicas que ocurren durante el proceso, sino también del contenido de humedad del cacao en baba y su disminución debida el drenado del líquido. Como se indicó previamente en el capítulo 2, la acción de los microorganismos licúa la pulpa del cacao en baba, permitiendo un mejor drenado del contenido de agua (Musa, 2012). La pérdida de masa durante el proceso de fermentación dependerá también del tipo de microorganismos y del método de fermentación empleado.

3.1.2 Balance de materia del secado del cacao en grano fermentado

La masa que se pierde durante el proceso de secado puede calcularse restando la masa del cacao en grano fermentado menos la masa del cacao en grano seco (incluyendo el contenido de humedad que tenga el cacao en grano seco).

$$m_a = M_F - M_S \quad (3)$$

Donde:

m_a : Masa que se pierde durante el proceso de secado.

M_S : Masa del cacao en grano seco (incluyendo el contenido final de humedad).

La masa total que puede retirarse mediante el proceso de secado corresponde a la masa que se pierde durante el proceso de secado más la masa de humedad que permanece en el cacao en grano seco.

$$m_c = m_a + m_b \quad (4)$$

Donde:

m_c : Masa que puede retirarse mediante el proceso de secado del cacao en grano.

m_b : Masa de humedad que permanece en el cacao en grano seco.



De la ecuación (4), se obtiene:

$$m_a = m_c - m_b \quad (5)$$

3.1.3 Balance general de materia del procesamiento del cacao en grano

Reemplazando la ecuación (5) en la ecuación (3) se obtiene:

$$m_c - m_b = M_F - M_S$$

$$M_S = M_F + m_b - m_c \quad (6)$$

Reemplazando la ecuación (2) en la ecuación (6) se obtiene:

$$M_S = F * M_B + m_b - m_c \quad (7)$$

Se divide la ecuación (7) para el factor $F * M_B$:

$$\frac{M_S}{F * M_B} = \frac{F * M_B + m_b - m_c}{F * M_B}$$

$$\frac{M_S}{F * M_B} = 1 + \frac{m_b}{F * M_B} - \frac{m_c}{F * M_B} \quad (8)$$

La masa del cacao en grano seco (incluyendo la masa del contenido de humedad) es igual a la masa del cacao en grano totalmente seco más la masa de humedad que permanece en el cacao en grano seco:

$$M_S = m_s + m_b \quad (9)$$

Donde:

m_s : Masa del cacao en grano totalmente seco.

La ecuación (9) se introduce en la ecuación (8):

$$\frac{M_S}{F * M_B} = 1 + \frac{m_b}{F * M_B} * \frac{M_S}{m_s + m_b} - \frac{m_c}{F * M_B}$$

Reordenando se obtiene:

$$\frac{M_S}{F * M_B} - \frac{m_b}{F * M_B} * \frac{M_S}{m_s + m_b} = 1 - \frac{m_c}{F * M_B}$$

Se simplifica por factor común a:



$$\frac{M_S}{F * M_B} \left(1 - \frac{m_b}{m_s + m_b}\right) = 1 - \frac{m_c}{F * M_B}$$

Se obtiene la masa del cacao en grano seco:

$$M_S = \frac{\left(1 - \frac{m_c}{F * M_B}\right) * F * M_B}{\left(1 - \frac{m_b}{m_s + m_b}\right)} \quad (10)$$

3.2 Determinación del contenido de humedad del cacao en grano

La masa que se pierde durante el proceso de secado corresponde no solamente a agua sino también a sustancias volátiles y de bajo punto de ebullición, propias del cacao en grano o producto del proceso de fermentación. De ahí que se insiste en la importancia de secar a bajas temperaturas, descrita en los criterios de secado, en el capítulo 2. La cantidad de sustancias volátiles y de bajo punto de ebullición que se pierden en el proceso de secado es o debe ser despreciable, pudiendo ser considerada como parte del contenido de humedad ya que es muy pequeña comparada con la cantidad de agua que se pierde en el secado y además debido al uso de cualquier método de ensayo para la determinación de humedad que requiera temperaturas superiores al punto de ebullición del agua. El método para la determinación de la humedad del cacao en grano establecido por la NTE 0173 requiere una temperatura de $103^\circ \pm 2^\circ \text{ C}$ (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 1975).

La masa que se pierde en la determinación de la humedad de una muestra de cacao en grano es igual a la masa que se puede retirar mediante el proceso de secado.



3.2.1 Determinación del contenido de humedad del cacao en grano fermentado

$$X = \frac{m_c}{M_F} = \frac{m_c}{F * M_B} \quad (11)$$

Donde:

X: Contenido de humedad del cacao en grano fermentado, expresado en tanto por uno.

3.2.2 Determinación del contenido de humedad del cacao en grano seco

$$x = \frac{m_b}{M_S} = \frac{m_b}{m_s + m_b} \quad (12)$$

Donde:

x: Contenido de humedad del cacao en grano seco, expresado en tanto por uno.

3.3 Ecuación general del balance de materia del procesamiento del cacao en grano

Substituyendo las ecuaciones (11) y (12) en la ecuación 10 se obtiene:

$$M_S = \frac{(1 - X) * F * M_B}{(1 - x)} \quad (13)$$

Se puede obtener la cantidad de cacao en grano seco conociendo el tanto por uno de masa que se obtiene luego de la fermentación y el contenido de humedad del grano de cacao fermentado, determinado mediante ensayo (en base húmeda); el valor del contenido de humedad del cacao en grano seco se establece según el contenido de humedad que se va a obtener por el proceso de secado.



Capítulo 4

Estudio económico de la producción de cacao en grano

4.1 Determinación del precio de venta del cacao fermentado

El precio del cacao en grano fermentado se determina en función del precio establecido del cacao en baba más el costo total del proceso de fermentado, más un margen de beneficio o ganancia, de cualquier lote de producción.

$$P_F = P_B + C_F + U_F \quad (14)$$

P_F : Precio de venta del cacao fermentado.

P_B : Precio de venta del cacao en baba.

C_F : Costo total del proceso de fermentado.

U_F : Beneficio obtenido de la venta del cacao en grano fermentado.

El precio del cacao en baba es igual al precio por unidad de masa del cacao en baba, multiplicado por la masa del cacao en baba.

$$P_B = P_b * M_B \quad (15)$$

Donde:

P_b : Precio del cacao en baba en el mercado, por unidad de masa.

4.2 Determinación del precio de venta del cacao en grano seco

El precio del cacao en grano seco se determina en función del precio establecido del cacao en grano fermentado, más el costo total del procesamiento de secado, más un margen de beneficio o ganancia.

$$P_S = P_F + C_S + U_S \quad (16)$$



Donde:

P_S : Precio de cacao seco para la venta.

C_S : Costo total del proceso de secado.

U_S : Beneficio obtenido de la venta del cacao en grano seco.

Reemplazando la ecuación (14) en la ecuación (16) se obtiene:

$$P_S = P_B + C_F + U_F + C_S + U_S$$

$$P_S = P_B + C_F + C_S + U_F + U_S \quad (17)$$

Reemplazando la ecuación (15) en la ecuación (17) se obtiene:

$$P_S = P_b * M_B + C_F + C_S + U_F + U_S \quad (18)$$

De la ecuación (13) se obtiene:

$$M_B = \frac{(1-x)*M_S}{(1-X)*F} \quad (19)$$

Reemplazando la ecuación (19) en la ecuación (18) se obtiene:

$$P_S = P_b * \frac{(1-x)*M_S}{(1-X)*F} + C_F + C_S + U_F + U_S$$

$$P_S = \frac{P_b * (1-x)}{F * (1-X)} M_S + (C_F + C_S) + (U_F + U_S)$$

$$(20)$$

Los costos de fermentación y secado se pueden agrupar como costo de procesamiento y los beneficios se suman en uno solo:

$$C_F + C_S = C \quad (21)$$

Donde:

C : Costo de producción del cacao en grano seco.

$$U_F + U_S = U \quad (22)$$



Donde:

U : Utilidad o beneficio de la venta del cacao en grano seco.

Reemplazando (21) y (22) en la ecuación (20):

$$P_S = \frac{P_b * (1 - x)}{F * (1 - X)} M_S + C + U \quad (23)$$

Con esta ecuación se calcula el precio de venta de un lote de producción de cacao en grano seco. Al comparar el precio del cacao en grano seco con el de la competencia; la utilidad o beneficio se incrementa al reducir los costos de producción.

El precio del cacao en baba se establece en función del mercado. El tanto por uno de masa que se obtiene luego del proceso de fermentación y el contenido de humedad del cacao en grano fermentado no varían significativamente de un lote a otro, siendo propiedades del cacao en grano que se pueden controlar y establecer como constantes. El costo de procesamiento y el beneficio o ganancia son datos del proceso productivo y también se establecen como constantes según el tamaño del lote de producción. El único parámetro que puede variar en la ecuación es el contenido de humedad del cacao en grano seco, el cual depende del grado de secado; sin embargo, el contenido de humedad del cacao en grano seco es un valor establecido en el 7% de humedad en base húmeda, como requisito de la NTE 0176 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).



La ecuación (23) representa una función lineal:

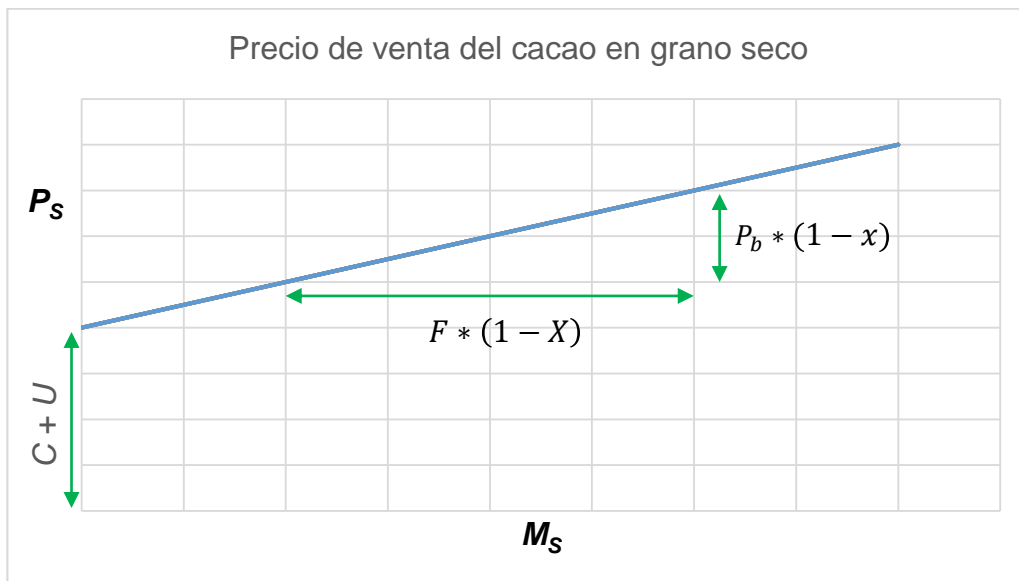


Figura 5: Precio de venta del cacao en grano seco. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente propia.

El precio del cacao en grano seco, los costos de procesamiento y el beneficio o ganancia deben ser transformados en propiedades específicas del producto, para lo cual se expresan por unidad de masa de cacao en grano seco; se divide la ecuación para la masa del cacao en grano seco:

$$\frac{P_S}{M_S} = \frac{P_b * (1 - x)M_S}{F * (1 - X)M_S} + \frac{C}{M_S} + \frac{U}{M_S}$$

$$\frac{P_S}{M_S} = \frac{P_b * (1 - x)}{F * (1 - X)} + \left(\frac{C}{M_S} + \frac{U}{M_S} \right)$$

(24)

Se determina una base de cálculo para M_S , la cual puede ser la masa de un lote de producción de cacao en grano seco; el cual se puede obtener directamente midiendo la masa del mismo o mediante la ecuación (13), en función del lote de producción del cacao en grano en baba.



Capítulo 5

Determinación de la producción de cacao en grano

5.1 Producción de cacao en grano clasificado y no clasificado

El cacao en grano que se produce en el sector agrícola no siempre cumple todos los requisitos para fines de comercialización interna o externa expuestos en la NTE 0176; cierta cantidad de la producción de cacao en grano puede considerarse defectuosa debido a varios criterios considerados expuestos en la norma. Los requisitos del cacao en grano consideran muchas enfermedades que puede tener el árbol de cacao. Cuando el fruto del cacao está enfermo, el cacao en grano, frecuentemente exhibe una coloración negra; el cacao en grano enfermo se considera defectuoso y se denomina grano negro (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).

Si una muestra de cacao, tomada de acuerdo a la NTE 0177, no cumple con los requisitos establecidos en la NTE 0176, se considera no clasificada (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).

Las propiedades químicas y organolépticas del cacao en grano sufren cambios desfavorables debido a las enfermedades que se pueden dar en el fruto del cacao. El grano negro es considerado cacao en grano de inferior calidad y no se desecha, sino que tiene un menor valor comercial.

Las enfermedades de la planta de cacao que se pueden dar lugar en una plantación son la principal causa de producción de cacao en grano defectuoso, ya que éstos deben controlarse durante su producción agrícola; todos los otros criterios de grano defectuoso pueden ser controlados en la cosecha y luego de esta.

Para la determinación de la producción de cacao en grano se tomará en cuenta el historial de producción de los últimos años, según los datos proporcionados por el productor de cacao en grano (parte interesada). A continuación se tienen los datos de la producción de cacao en grano en baba, durante los últimos tres años:



Fecha	Cacao en grano clasificado	Cacao en grano no clasificado	Total de Cacao en grano
enero-2012	255,000 kg	0,000 kg	255,00 kg
mayo-2012	340,000 kg	0,000 kg	340,00 kg
julio-2012	53,333 kg	105,000 kg	158,33 kg
agosto-2012	140,000 kg	60,000 kg	200,00 kg
noviembre-2012	240,000 kg	80,000 kg	320,00 kg
diciembre-2012	200,000 kg	0,000 kg	200,00 kg
enero-2013	240,000 kg	40,000 kg	280,00 kg
marzo-2013	585,000 kg	140,000 kg	725,00 kg
junio-2013	210,000 kg	60,000 kg	270,00 kg
agosto-2013	190,000 kg	190,000 kg	380,00 kg
septiembre-2013	235,000 kg	55,000 kg	290,00 kg
septiembre-2013	170,000 kg	60,000 kg	230,00 kg
octubre-2013	200,000 kg	60,000 kg	260,00 kg
diciembre-2013	200,000 kg	50,000 kg	250,00 kg
enero-2014	80,000 kg	15,000 kg	95,00 kg
marzo-2014	180,000 kg	90,000 kg	270,00 kg
abril-2014	250,000 kg	75,000 kg	325,00 kg
mayo-2014	420,000 kg	180,000 kg	600,00 kg
junio-2014	220,000 kg	190,000 kg	410,00 kg
julio-2014	220,000 kg	140,000 kg	360,00 kg
agosto-2014	180,000 kg	100,000 kg	280,00 kg
septiembre-2014	80,000 kg	60,000 kg	140,00 kg
octubre-2014	160,000 kg	70,000 kg	230,00 kg
noviembre-2014	320,000 kg	65,000 kg	385,00 kg
diciembre-2014	160,000 kg	60,000 kg	220,00 kg

Tabla 1: Producción de cacao en grano. Ciudad de Naranjal. 2015. Fuente: Investigación propia.

Los datos de la producción de cacao en grano se representan en una gráfica:

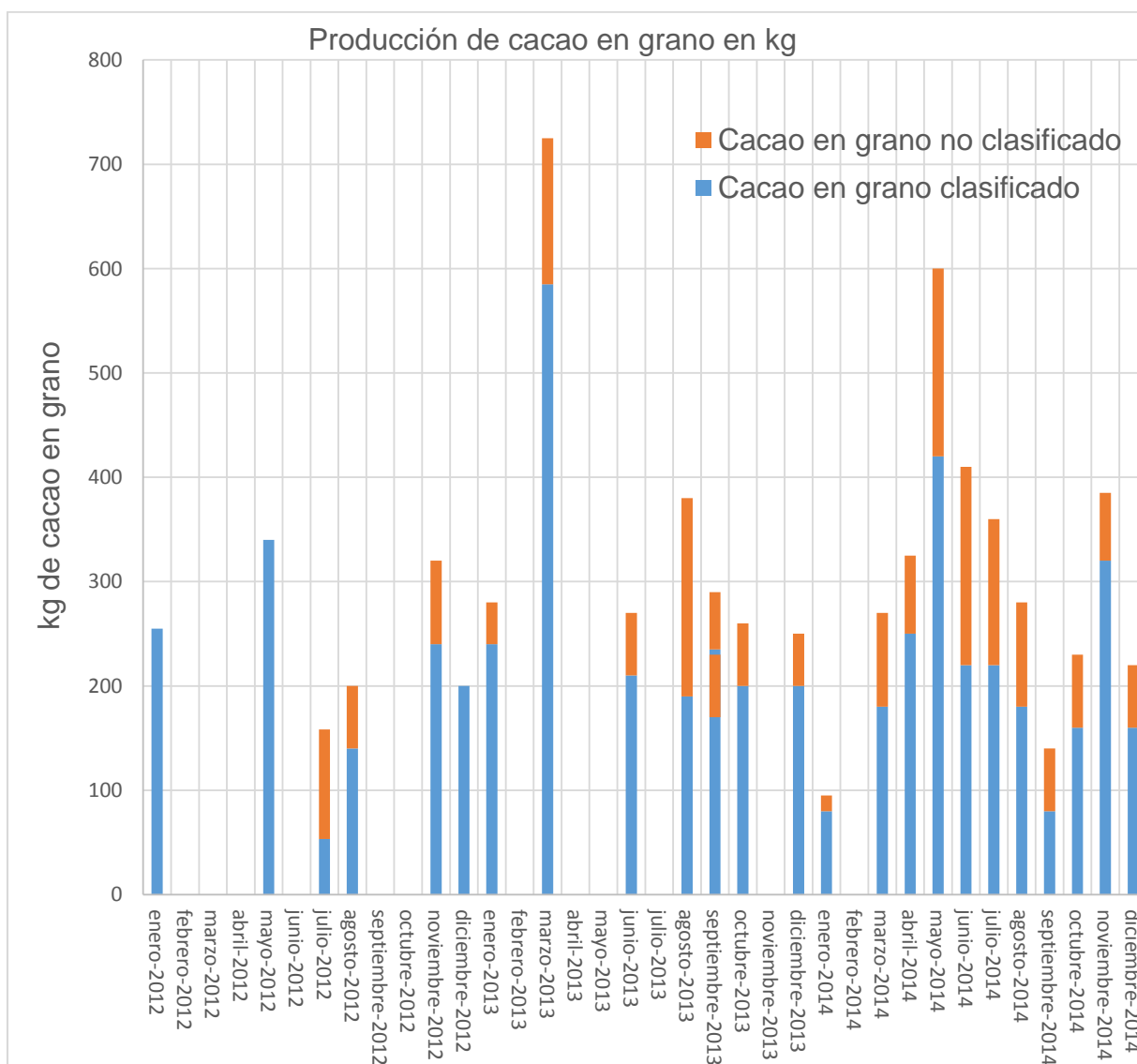


Figura 6: Histograma de la producción de cacao en grano en base a la Tabla 1. Ciudad de Cuenca 2015. Fuente propia.

Como se puede observar en la figura 6, la producción de cacao en grano, en baba, no muestra ninguna tendencia; debido principalmente a que los lotes de producción varían, debido a su vez a que la cosecha no se ha venido realizando en intervalos regulares de tiempo.



Para determinar el tamaño del lote de producción, los datos del total de cacao en grano se deben representar frente a intervalos regulares de tiempo en un histograma de frecuencias de datos agrupados.

Se determina el número de intervalos regulares de tiempo o clases del histograma, según la regla de Rice (Lane, 2007):

$$C \approx 2n^{\frac{1}{3}} \quad (25)$$

Donde:

C: Número de clases que se recomienda para el histograma.

n: Tamaño de la muestra o número de datos que se tiene.

El número de datos de la producción total de cacao en grano es de 25:

$$n = 25$$

Se substituyen estos datos en la ecuación (25):

$$C \approx 2 * 25^{\frac{1}{3}}$$

$$C \approx 5,848$$

El número de intervalos de tiempo recomendados se aproxima a seis; además, el rango de los datos de la producción del cacao en grano es de tres años, por lo que conviene establecer seis semestres; es decir el número de intervalos de tiempo y por tanto el número de clases para el histograma es igual a seis.

$$C = 6$$

En el histograma de la producción de cacao en grano, sin hacer distinción, se considerará la producción de cacao en grano clasificado y no clasificado, como el total de cacao en grano producido; ya que al implementar un programa de mejoras productivas se proyectará únicamente a obtener cacao en grano clasificado.

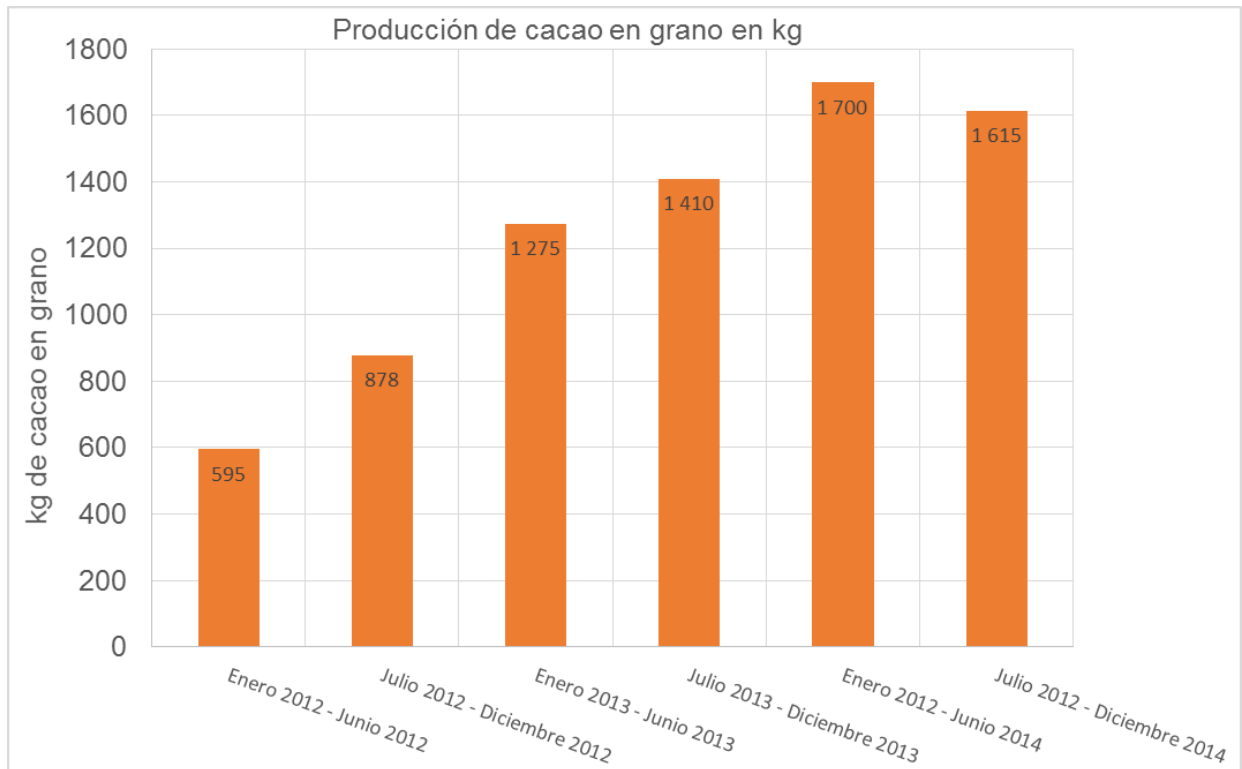


Figura 7: Histograma de datos agrupados de la producción de cacao en grano en base a la Tabla 1. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente propia.

5.2 Proyecciones de la producción de cacao en grano

Con el objetivo de dimensionar óptimamente el equipo de secado, se hace una proyección realista de la producción y debido a que al aplicar los conocimientos establecidos en esta tesis, la producción y la economía del cacao en grano están sujetas a mejoras continuas; se debe hacer también una proyección optimista, con el fin de prever y cubrir incrementos significativos en la producción.

5.2.1 Proyección realista de la producción de cacao en grano

Con los datos del punto anterior se hará una proyección de la producción de cacao en grano, basándose en un escenario realista:

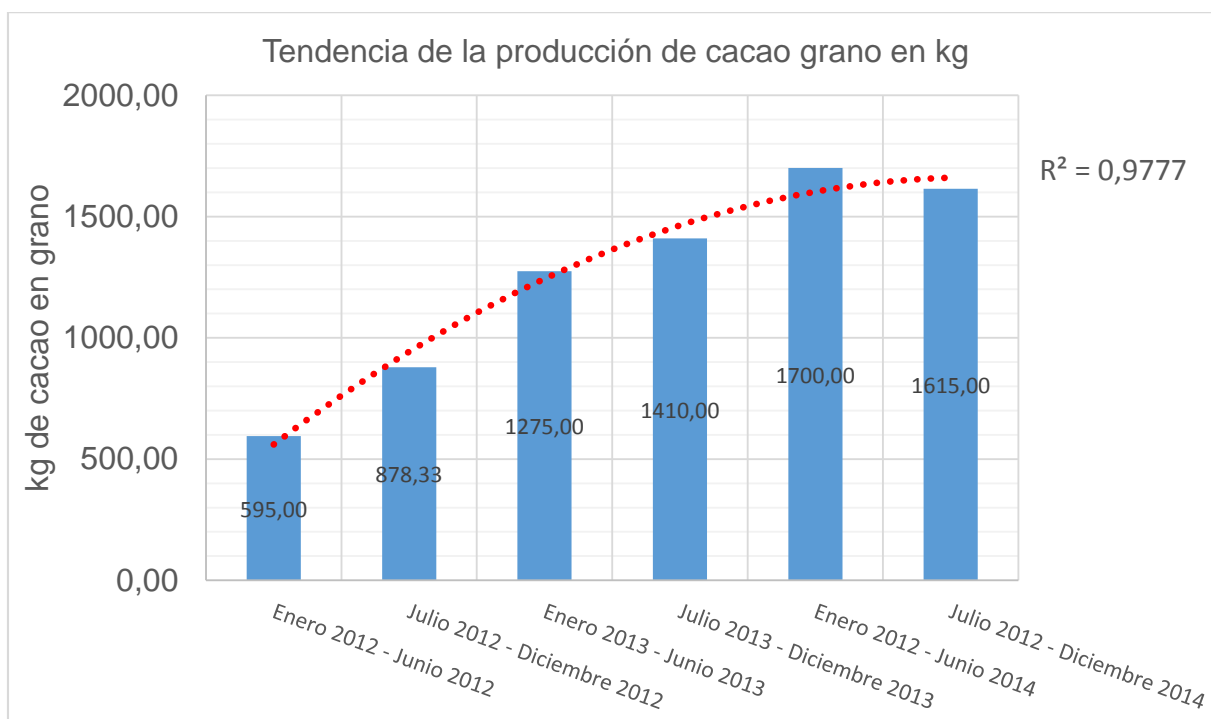


Figura 8: Proyección realista de la producción de cacao en grano en base a la Tabla 1. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente propia.

La producción del cacao en grano tiene una tendencia creciente; sin embargo en el último período disminuye, lo cual indica que la producción ha alcanzado su punto máximo en las condiciones actuales.

El punto máximo corresponde al valor de 1700 kg como el tamaño del lote producido en un semestre.

5.2.2 Proyección optimista de la producción de cacao en grano

Considerando todos los aspectos que se pueden mejorar en la producción agrícola de cacao en grano e incrementado la producción según la capacidad de la plantación cacaotera, se tiene un escenario optimista de producción; en el cual se estima la producción semestral del lote de cacao en grano, según la tendencia lineal del crecimiento de la producción respecto a los años anteriores.

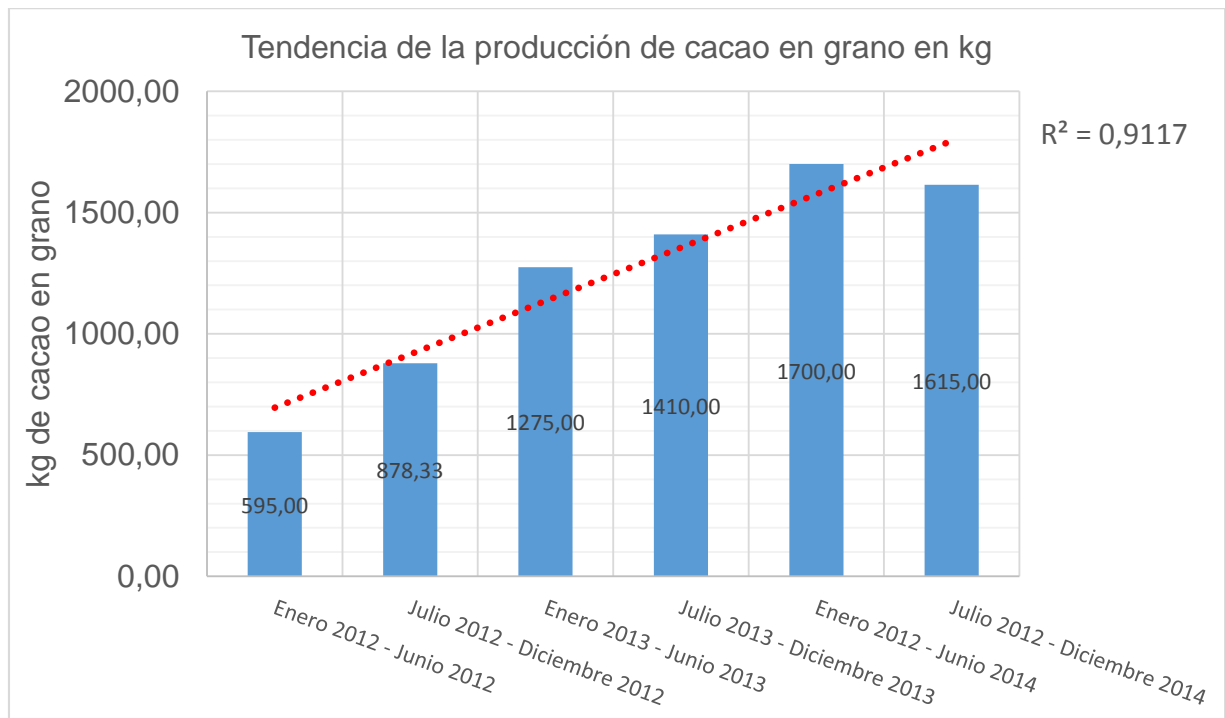


Figura 9: Proyección optimista de la producción de cacao en grano en base a la Tabla 1. Ciudad de Cuenca 2015. Fuente propia.

La tendencia indica que el punto máximo corresponde al valor de 1800 kg como el tamaño del lote producido en un semestre:

$$M_{B6} = 1800 \text{ kg}$$

Según los datos proporcionados por el productor de cacao en grano, la cosecha se realiza cada mes; entonces el lote de producción mensual sería:

$$M_{B1} = 300 \text{ kg}$$

Los equipos no se diseñan ajustadamente sino que siempre se permite cierta holgura, en el caso de que se requiera que trabajen a mayor capacidad. La recomendación es hacer un diseñar un tercio más grande que la producción real.

$$M_B = M_{B1} * \left(1 + \frac{1}{3}\right) \quad (26)$$

Reemplazando valores en la ecuación (26) se obtiene:



$$M_B = 300 \text{ kg} * \left(\frac{4}{3}\right)$$

$$M_B = 400 \text{ kg}$$

Con este lote de producción se dimensionarán los equipos; en caso de requerirse mayor capacidad puede incrementarse la frecuencia con que se realiza la cosecha, es decir acortar los intervalos de tiempo según la ocupación de los equipos.

Capítulo 6

Determinación de las propiedades del cacao en grano para el secado

6.1 Propiedades del cacao en grano para el secado

Se tomarán en cuenta algunas propiedades del cacao en grano que serán la base para cálculos posteriores, previos al dimensionamiento de equipos y para la determinación del punto óptimo de secado.

6.1.2 Materiales y Métodos

El muestro se realiza según la según la NTE 0177. De acuerdo al tamaño del lote, se recomienda un número mínimo de tres muestras elementales de 100g a 1000g; sin embargo, se han tomado más muestras elementales aleatorias del fruto del árbol de cacao. Las muestras fueron extraídas *in situ* para verificar las disposiciones generales. Se descartaron los frutos defectuosos; con el propósito de obtener el máximo nivel de calidad aceptable (AQL). Las muestras elementales se juntan, se mezclan y se reduce por cuarteo a una sola muestra de 1500 g, que luego se divide en tres partes iguales. La muestra es perecible, por lo tanto se transportan los frutos del cacao al laboratorio para luego extraer el cacao en baba e iniciar el análisis en la brevedad posible. (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 1995).



Figura 10. Muestreo del fruto de cacao. Ciudad de Naranjal. 2014. Fuente propia.

6.1.3 Determinación de la superficie específica del cacao en grano para el secado

La velocidad de secado es directamente proporcional a la superficie de secado del producto, mientras más superficie se tenga, más rápido ocurrirá el proceso. Con el objetivo de facilitar la operación; la superficie específica para el secado debe ser la mayor posible; esto se logra al tener capas más finas (Musa, 2012). El cacao en grano debe permanecer entero según los requisitos de la NTE 0176 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006), consecuentemente la capa más fina, y por tanto la superficie óptima de secado, corresponde a una sola capa de cacao en grano.

Además una sola capa de cacao en grano facilitará e incrementará la velocidad de circulación del aire para el secado a través del producto, en el equipo de secado.

Asimismo una sola capa de cacao previene la formación de granos múltiples, que es otro criterio de grano defectuoso según la NTE 0176 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).

Si bien la NTE 0177 exige trabajar con una muestra de 500 g (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 1995); se trabajará con una muestra mayor con el propósito de minimizar errores de medición. Se establece una superficie rectangular que abarque una sola capa de cacao en grano, luego se mide la masa de la muestra. Se expresa la superficie del cacao en grano por unidad de masa.



Figura 11. Determinación de la superficie específica del cacao en grano para el secado. Ciudad de Cuenca. 2014. Fuente propia.

Pese a que la masa del cacao en grano disminuye durante el proceso de fermentación, la masa del cacao en grano no presenta disminución considerable en su volumen y por consiguiente tampoco presenta disminución considerable en su superficie; la disminución de volumen o superficie aunque varía de un lote de producción a otro, puede despreciarse.



La superficie específica para el secado del cacao en grano fermentado viene dada por:

$$\check{s} = \frac{s}{M_B} \quad (27)$$

Donde:

š: Superficie específica para el secado del cacao en grano fermentado.

s: Superficie de una sola capa de cacao en grano fermentado o en baba.

La superficie para el secado del cacao en grano fermentado es:

$$s = 50cm * 30cm$$

$$s = 1500 \text{ cm}^2$$

$$s = 1500 \text{ cm}^2 * \frac{(1m)^2}{(100cm)^2}$$

$$s = 0,15 \text{ m}^2$$

La masa del cacao que ocupa dicha superficie es:

$$M_B = 1310 \text{ g}$$

$$M_B = 1,310 \text{ kg}$$

Reemplazando los datos obtenidos, en la ecuación (27):

$$\check{s} = \frac{0,15 \text{ m}^2}{1,310 \text{ kg}}$$

$$\check{s} = 0,115 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$$



6.1.4 Determinación de la superficie total del cacao en grano para el secado, en base a la producción

La superficie total del cacao en grano para el secado, en base a un lote de producción viene dada por:

$$S = \check{s} * M_B \quad (28)$$

Reemplazando en la ecuación (28) los valores obtenidos anteriormente:

$$S = 0,115 \frac{m^2}{kg} * 400 kg$$

$$S = 46 m^2$$

Este valor se utilizará para el dimensionamiento de equipos.

6.1.5 Determinación del tanto por uno de masa que se obtiene luego del proceso de fermentación, siendo el total la masa del cacao en baba

Pese a que se tienen varios y diferentes métodos de fermentación; al seleccionar un método, se tiene que: La cantidad de masa de cacao en grano respecto a la masa del cacao en baba, obtenida luego del proceso de fermentación, será diferente para cada lote de producción; sin embargo, cada productor de cacao en grano puede controlar su proceso productivo y por lo tanto disminuir la variación del tanto por uno de masa de cacao en grano fermentado que se obtiene en el proceso de producción de sus propios lotes. El objetivo es obtener un promedio para establecer un valor constante que sea representativo.



6.1.6 Determinación de la actividad acuosa del cacao en grano fermentado en relación con su contenido de humedad

Para relacionar la actividad acuosa del cacao en grano fermentado con su contenido de humedad; se obtienen muestras de cacao en grano seco mediante el método de la NTE 0177 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 1995) y se determina el contenido de humedad según la NTE 0173 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 1975); conjuntamente se mide la actividad acuosa de la muestra, con el objetivo de relacionar los dos parámetros. Se obtienen los siguientes resultados experimentales:

Muestra		Número de muestra	m ₀ (masa de la cápsula vacía y su tapa en gramos)	m ₁ (masa de la cápsula con la muestra húmeda y la tapa en gramos)	m ₂ (masa de la cápsula con la muestra seca y la tapa en gramos)	aw Actividad Acuosa	t temperatura
Lote 1	Grano entero	1	1,0636 g	6,0636 g	5,8902 g	0,375	19,5 °C
		2	1,0675 g	6,0675 g	5,8801 g		
	Cotiledones	3	1,0052 g	6,0052 g	5,8433 g	0,390	19,5 °C
		4	1,0059 g	6,0059 g	5,8532 g		
	Cascarilla	5	1,1098 g	2,6098 g	2,4817 g	0,458	19,5 °C
		6	1,1098 g	2,6098 g	2,4815 g		
Lote 2	Grano entero	7	0,9977 g	5,9977 g	5,8014 g	0,290	19,6 °C
		8	1,0582 g	6,0582 g	5,8512 g		
	Cotiledones	9	1,0801 g	6,0801 g	5,9173 g	0,313	19,5 °C
		10	1,0071 g	6,0071 g	5,8369 g		
	Cascarilla	11	0,9412 g	2,4312 g	2,3111 g	0,380	19,3 °C
		12	1,0983 g	2,3983 g	2,2910 g		

Tabla 2. Resultados experimentales de la determinación del contenido de humedad de una muestra de cacao en grano seco, mediante la NTE 0173 y resultados de la determinación de su actividad acuosa. Ciudad de Cuenca. 2014. Fuente propia.

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} * 100\%$$



Con la fórmula anterior, se calcula el contenido de humedad por duplicado, los errores del método y la media aritmética de los resultados obtenidos, todo según la NTE 0173 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 1975); se obtienen los siguientes resultados:

Muestra		Número de muestra	Contenido de humedad (En base húmeda)	Errores de Método	Contenido de humedad promedio	aw	T
Lote 1	Grano entero	1	3,5%	0,3%	3,6%	0,375	19,5 °C
		2	3,7%				
	Cotiledones	3	3,2%	0,2%	3,1%	0,390	19,5 °C
		4	3,1%				
	Cascarilla	5	8,5%	0,0%	8,5%	0,458	19,5 °C
		6	8,6%				
Lote 2	Grano entero	7	3,9%	0,2%	4,0%	0,290	19,6 °C
		8	4,1%				
	Cotiledones	9	3,3%	0,1%	3,3%	0,313	19,5 °C
		10	3,4%				
	Cascarilla	11	8,1%	0,2%	8,2%	0,380	19,3 °C
		12	8,3%				

Tabla 3. Informe de resultados experimentales de la determinación del contenido de humedad del cacao en grano seco, mediante la NTE 0173 y resultados de la determinación de su actividad acuosa. Ciudad de Cuenca. 2014. Fuente propia.

A partir del análisis se concluye que el contenido de humedad es mayor en la cascarilla que en los cotiledones y debido a que la masa de la cascarilla del cacao en grano seco se encuentra en mínima proporción con respecto a la masa de sus cotiledones, el contenido de humedad para el cacao grano seco es aproximadamente el mismo que para el grano de cacao seco descascarado. La actividad acuosa del cacao en grano fermentado depende fundamentalmente de su contenido de humedad, ya que la composición química del cacao en grano no varía significativamente de un lote a otro.



La composición química viene dada de acuerdo a las variedades taxonómicas del árbol de cacao y esta se altera debido al proceso de fermentación.

6.1.7 Determinación del volumen específico aparente del cacao en grano

El cacao en grano en baba y el cacao en grano seco no presentan una diferencia significativa en cuanto a la reducción del volumen aparente que ocupan los granos, debido al proceso de secado. El volumen específico aparente del cacao en baba es de interés al momento de diseñar los fermentadores de cacao en baba; a su vez, el volumen específico aparente del cacao en grano seco es de interés al momento de dimensionar el espacio destinado para el almacenamiento del cacao en grano seco o para diseñar de los equipos que continúan, posteriormente, el proceso de elaboración de los diversos productos que tienen como materia prima el cacao en grano beneficiado.

Experimentalmente se ha obtenido que 0,527 kg de cacao en grano seco ocupan un volumen de $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Entonces el volumen específico aparente del cacao en grano seco se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{AS} &= \frac{1 * 10^{-3} \text{ m}^3}{0,527 \text{ kg de cacao en grano seco}} \\ \tilde{V}_{AS} &= 190 * 10^{-3} \frac{\text{ m}^3}{\text{ kg de cacao en grano seco}} \end{aligned} \quad (29)$$

En donde:

\tilde{V}_{AS} : Volumen específico aparente del cacao en grano seco.

Para obtener el volumen aparente que ocupa un lote de producción o cualquier masa de cacao en grano seco, se multiplicará el volumen específico aparente del cacao en grano seco por la masa de cacao en grano seco, obtenido luego del procesamiento.



La ecuación (29) se multiplica por la masa del cacao en grano seco:

$$v_{AS} = 190 * 10^{-3} \frac{m^3}{kg \text{ de cacao en grano seco}} * M_S$$

(30)

Substituyendo la ecuación (13), se obtiene:

$$v_{AS} = 190 * 10^{-3} \frac{m^3}{kg \text{ de cacao en grano seco}} * \frac{(1 - X) * F * M_B}{(1 - x)}$$

(31)

En donde:

v_{AS} : Volumen aparente de un lote de producción de cacao en grano seco en m^3 .

El volumen específico aparente del cacao en grano seco no varía significativamente de un lote de producción a otro, ya que sólo se tiene el grano cubierto con la cascarilla, pudiendo, sin embargo, variar escasamente debido a la diferencia de la forma y tamaño del grano, de acuerdo a las variedades taxonómicas del árbol de cacao.

El volumen específico aparente del cacao en baba si varía de un lote de producción a otro, debido a que la masa del mismo varía de acuerdo al contenido de humedad que se tiene para un lote de producción. Se puede calcular el volumen específico aparente del cacao en baba, expresando la masa de un kilogramo de cacao en grano seco en función de la masa de un kilogramo de cacao en baba de donde proviene el lote de producción. Para calcular el volumen específico aparente se substituye la ecuación (13) en la ecuación (29) y se obtiene la siguiente expresión:

$$\tilde{v}_{AB} = 190 * 10^{-3} \frac{m^3}{\frac{(1 - X) * F * M_B}{(1 - x)}}$$
$$\tilde{v}_{AB} = 190 * 10^{-3} \frac{(1 - x) * m^3}{(1 - X) * F * M_B}$$



Como se indicó previamente, la masa del cacao en baba es de un kilogramo, entonces se obtiene:

$$\tilde{v}_{AB} = 190 * 10^{-3} \frac{(1 - x) * m^3}{(1 - X) * F * kg \text{ de cacao en baba}}$$

(32)

En donde:

\tilde{v}_{AB} : Volumen específico aparente del cacao en baba.

Para obtener el volumen aparente que ocupa un lote de producción o cualquier masa de cacao en baba, se multiplicará el volumen específico aparente del cacao en baba por la masa de cacao en baba.

La ecuación (31) se multiplica por la masa del cacao en baba:

$$v_{AB} = 190 * 10^{-3} \frac{(1 - x) * m^3}{(1 - X) * kg \text{ de cacao en baba}} * M_B$$

(33)

En donde:

v_{AB} : Volumen aparente de un lote de producción de cacao en baba en m^3 .

Capítulo 7

Determinación de los puntos óptimos de secado del cacao en grano

En los criterios del secado, expuestos en el capítulo 2, se indicó que pueden obtenerse diferentes valores del contenido final de humedad del cacao en grano seco; estos valores vienen dados de acuerdo a normas técnicas y puntos óptimos de contenido de humedad, que a su vez se relacionan con diversos parámetros que serán estudiados en éste capítulo.



7.1 Determinación del punto óptimo de secado del cacao en grano, en base al aspecto económico

La NTE 0176, oficializada como obligatoria, establece los requisitos de calidad que debe cumplir el cacao en grano beneficiado y los criterios que deben aplicarse para su clasificación, destinada para fines de comercialización interna y externa. Según ésta norma el contenido de humedad máximo será de 7,0% (base húmeda), el cual será determinado mediante lo establecido en la NTE INEN 0173 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).

Regirse a la NTE 0176 determina un lote de producción clasificado, por lo tanto será cualitativamente más apreciado y a su vez, tendrá un mayor valor comercial.

Dado que los compradores de cacao en grano pagarán el mismo precio por cantidad de cacao en grano beneficiado que cumpla con los requisitos establecidos en la NTE 0176, independientemente de su contenido de humedad; se recomienda que éste sea el máximo posible.

Debido a que la NTE 0173 indica que la media aritmética de los dos resultados experimentales, de la determinación del contenido de humedad del cacao en grano, obtenidos debe ser aproximada a 0,1 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 1975); el valor máximo del contenido de humedad, en base al aspecto económico es 6,9%, correspondiente a un valor, expresando en tanto por uno, de 0,069. El contenido de humedad de 0,069 corresponde al punto óptimo de secado en base al aspecto económico. Substituyendo este punto óptimo en la ecuación (13) se obtiene:

$$M_S = \frac{(1 - X) * F * M_B}{(1 - 0,069)}$$

$$M_S = \frac{(1 - X) * F * M_B}{0,931}$$

(34)

La ecuación anterior muestra la máxima cantidad posible de masa de cacao en grano beneficiado, clasificado según la NTE 0176, que se puede obtener luego del proceso de secado.



Substituyendo el punto óptimo en la ecuación (24) se obtiene:

$$\frac{P_S}{M_S} = \frac{P_b * (1 - 0,069)}{F * (1 - X)} + \left(\frac{C}{M_S} + \frac{U}{M_S} \right)$$
$$\frac{P_S}{M_S} = \frac{0,931 * P_b}{F * (1 - X)} + \left(\frac{C}{M_S} + \frac{U}{M_S} \right)$$

(35)

Al secar hasta este punto óptimo de secado se obtiene el precio más bajo posible, lo cual a su vez representa mayor competitividad en el mercado. Secar el producto hasta un contenido de humedad superior al 7% no cumpliría con la NTE 0176 y al secar hasta un contenido de humedad inferior al 6,9% la masa del producto se reduce y el precio de venta se incrementa debido a que un menor contenido de humedad requiere un mayor procesamiento.

7.2 Determinación del punto óptimo de secado del cacao en grano, en base al aspecto técnico

El cacao en grano seco es la materia prima para la elaboración de la pasta de cacao, que a su vez es la materia prima para la elaboración de otros diversos productos.

La NTE INEN 0623 indica que el cacao en grano seco, luego de ser sometido a limpieza, descascarado, tostación desintegración mecánica y prácticamente exento de toda clase de impurezas, se denomina pasta de cacao (masa de cacao, licor de cacao, chocolate no edulcorado o chocolate amargo). La pasta de cacao sometida a ensayo, de acuerdo a la NTE INEN 1676, deberá tener un contenido de humedad máximo del 3% (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 1988).

Si el cacao en grano producido no está destinado a la venta, sino a la elaboración de pasta de cacao, conviene que este tenga un contenido de humedad entre 2,5% y 3,49%, que por redondeo sería el 3%.



La razón de que el valor del contenido de humedad esté dentro de un intervalo y su valor pueda ser redondeado es que, a la fecha de consulta, la NTE INEN 1676, de carácter voluntario, no especifica la aproximación de los resultados en su informe (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 1988).

Substituyendo este punto óptimo de secado, correspondiente a un valor del 3% del contenido de humedad, que a su vez corresponde a 0,03 expresado en tanto por uno, en la ecuación (13) se obtiene:

$$M_S = \frac{(1 - X) * F * M_B}{(1 - 0,03)}$$

$$M_S = \frac{(1 - X) * F * M_B}{0,97}$$

(36)

Con ésta ecuación se determina la masa de cacao en grano seco previa a la formación de pasta de cacao que cumple con el requisito de contenido de humedad máxima expuesto en la NTE INEN 0623.

Cabe mencionar que, en el proceso de descascarado, el contenido de humedad del cacao en grano seco disminuirá; debido a que la cascarilla tiene mayor contenido de humedad que los cotiledones, tal como se demostró previamente en los ensayos de determinación del contenido de humedad del cacao en grano seco, expuestos en el capítulo 6. En el proceso de tostado también se tienen pérdidas de humedad.

7.3 Determinación del punto óptimo de secado del cacao en grano en base a la conservación de sus propiedades

El cacao fermentado se puede secar hasta un contenido de humedad que corresponda con un valor de actividad acuosa, donde se tenga la mínima velocidad de las reacciones de deterioro para optimizar la conservación del cacao en grano seco durante el almacenado y transporte.

Debido a que la actividad acuosa, en correspondencia con el contenido de humedad, varía de una sustancia a otra, de un alimento a otro y en este caso de una muestra de cacao en grano seco a otra; adicionalmente, la relación de la humedad con la actividad acuosa tiene un gran intervalo de valores de actividad acuosa para un corto intervalo de valores de contenido de humedad; es conveniente relacionar el punto óptimo de secado, en base la conservación de las propiedades del cacao en grano seco, con su actividad acuosa más no con su contenido de humedad.

El mapa de estabilidad de los alimentos como función de su actividad acuosa, descrito por Theodore Labuza en 1971, nos muestra la velocidad relativa de reacciones de deterioro de alimentos; tales como oxidación lipídica, pardeamiento no enzimático, actividad enzimática y crecimiento microbiano. (Labuza, McNally, Gallagher, Hawkes, & Hurtado, 1972). Este mapa se muestra a continuación:

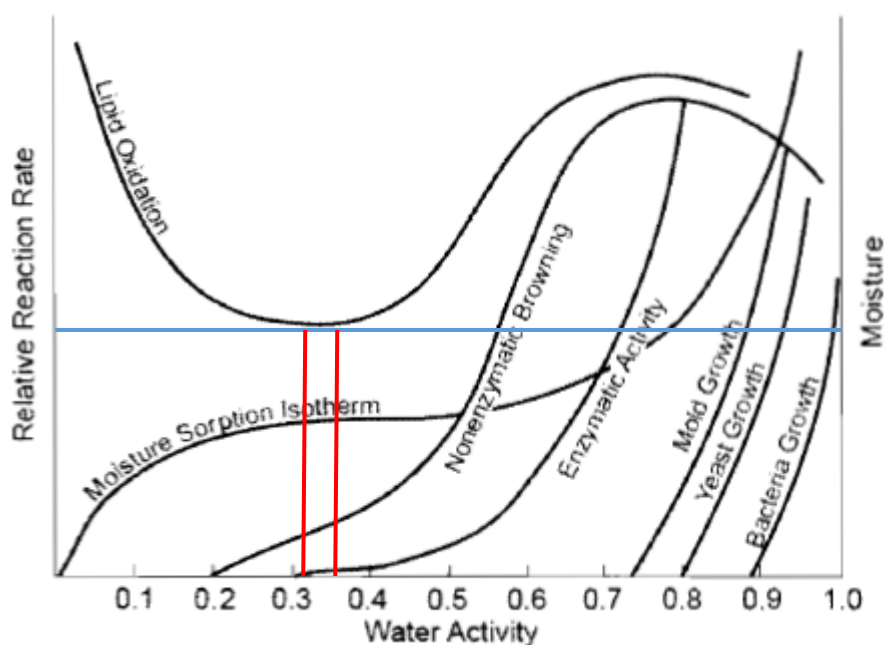


Figura 12. Stability map of foods as a function of water activity. 2014. Fuente: (PEDIANOW, 2014).



7.3.1 Traducción del mapa de estabilidad de los alimentos como función de su actividad acuosa

Figura 12. Mapa de la estabilidad de los alimentos como una función de la actividad acuosa.

<i>Reactive Reaction Rate:</i>	Velocidad relativa de reacción.
<i>Lipid Oxidation:</i>	Oxidación de lípidos.
<i>Moisture Sorption Isotherm:</i>	Isoterma de sorción de humedad.
<i>Non Enzymatic Browning:</i>	Pardeamiento no enzimático.
<i>Enzymatic Activity:</i>	Actividad enzimática.
<i>Mold Growth:</i>	Crecimiento de hongos.
<i>Yeast Growth:</i>	Crecimiento de levaduras.
<i>Bacteria Growth:</i>	Crecimiento de bacterias.
<i>Moisture:</i>	Humedad.
<i>Water Activity:</i>	Actividad acuosa.

En los criterios de la fermentación previa al secado del cacao en grano, del capítulo 2, en base a la NTE INEN 0176, se indicó que el cacao en grano debe estar exento de moho. Según el diagrama de Labuza, un valor de actividad acuosa inferior a 0,7 impide el crecimiento microbiano. La velocidad de reacciones de actividad enzimática y pardeamiento no enzimático (reacciones de *Maillard*) disminuyen al disminuir la actividad acuosa se suprimen al llegar a un valor igual o inferior a 0,3 y 0,2 respectivamente. La velocidad mínima de reacción de oxidación de lípidos, rancidez o enranciamiento, se encuentra en un intervalo de actividad acuosa entre 0,31 y 0,35.



El intervalo óptimo de secado en base a la conservación de las propiedades del cacao en grano se encuentra entre los valores de actividad acuosa de 0,31 y 0,35; en éste intervalo las bacterias, levaduras y hongos no pueden desarrollarse, la actividad enzimática es prácticamente nula, la velocidad de reacción de enranciamiento es mínima y la velocidad de reacción de pardeamiento no enzimático es baja; sin embargo, para que las reacciones de pardeamiento no enzimático tengan lugar se requieren azúcares reductores, los cuales, en su mayoría o total, fueron transformados en otros compuestos como ácidos y alcoholes, durante el proceso de fermentación.

7.4 Determinación del punto óptimo de secado del cacao en grano en base a los aspectos económico, técnico y la conservación de sus propiedades

Para determinar el punto óptimo de secado del cacao en grano en base a los varios aspectos mencionados, a continuación se explicarán primero los conceptos de contenido de humedad de monocapa y transición vítrea.

7.4.1 Humedad de monocapa y transición vítrea

La teoría de estabilidad de los alimentos en función de su actividad acuosa, referente al contenido de humedad de monocapa o teoría de monocapa *BET*, fue desarrollada por los investigadores Brunauer, Emmett, y Teller e indica que los productos alimenticios tienen su máxima estabilidad relativa cuando su actividad acuosa se corresponde con el contenido de humedad de monocapa. Así mismo, los productos alimenticios son inestables para valores por encima o por debajo de la actividad acuosa de monocapa; sin embargo, la evidencia experimental muestra que el contenido óptimo de humedad para la estabilidad relativa de los alimentos está en la región de adsorción de multicapa. Se ha mostrado que el contenido de humedad óptimo para la estabilidad relativa de los alimentos no es exactamente el concepto de actividad acuosa *BET* y su función en la preservación de los productos alimenticios (Rahman, 2009), (Sandulachi, 2012).



Esta variación se debe al hecho de que la teoría *BET* para la adsorción fue desarrollada en base a muchas suposiciones simplificadas, que no son realistas cuando se considera un producto alimenticio (Rahman, 2009), (Sandulachi, 2012).

Los productos alimenticios que están en un estado amorfo o no cristalino, por debajo de su temperatura de transición vítrea, son frágiles y quebradizos. El estado vítreo no es cristalino, tiene estructura regular, pero mantiene el desorden del estado líquido. Los productos alimenticios son estables en el estado vítreo; ya que, por debajo de la temperatura de transición vítrea, compuestos involucrados en las reacciones de deterioro toman meses o incluso años en propagarse y reaccionar. El agua se vuelve cinéticamente inmóvil y no permite las reacciones de deterioro. El movimiento molecular de traslación se detiene y las reacciones químicas se vuelven muy lentas. El producto alimenticio es estable en el estado vítreo y por debajo de ésta transición y mientras más alta es la temperatura de transición vítrea, más altas son las velocidades de reacciones de deterioro. La actividad acuosa y la transición vítrea deben interrelacionarse para explicar la conservación de los productos alimenticios (Rahman, 2009).

7.4.2 Determinación del punto óptimo, definitivo, del secado del cacao

El punto óptimo de secado del cacao en grano, en base al aspecto técnico, está dentro del intervalo de valores de actividad acuosa correspondientes al punto óptimo de secado en base a la conservación de sus propiedades. Si el cacao en grano seco no será comercializado inmediatamente luego del secado, sino que estará destinado al almacenamiento o transporte; se recomienda secar hasta un contenido de humedad alrededor del 3%, el cual está dentro de un intervalo de actividad acuosa entre 0,31 y 0,35. Se tienen dos razones por las cuales se debe secar hasta este punto. La primera razón es garantizar la conservación de las propiedades del cacao en grano. La segunda razón es que el cacao en grano puede rehidratarse durante el manejo, almacenado o transporte del mismo, y si la humedad recuperada excediere el contenido máximo del 7% (base húmeda), requisito de la NTE 0176, el lote será reclasificado. (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006).



Debido a que el cacao en grano empieza a recuperar humedad del ambiente, luego del proceso de secado; para efectos de cálculo, se tomará un valor de actividad acuosa ligeramente inferior, de 0,3.

Capítulo 8

Estudio y condiciones del proceso de secado del cacao en grano

8.1 Método de operación

La operación se realiza por lotes; un lote de cacao en grano fermentado se colocará dentro del equipo de secado y su superficie, como se expuso en los criterios del secado del capítulo 2, se pondrá en contacto con una corriente continua de aire, con un bajo contenido de humedad relativa.

8.2 Método de suministro de la energía necesaria para el secado

La energía necesaria para llevar a cabo la operación se suministrará de manera indirecta e directa. Se utilizará una fuente primaria de energía para proporcionar la energía necesaria al sistema de calefacción, que a su vez transmitirá energía en forma de calor al aire que transmitirá directamente, al cacao en grano, el calor necesario para el proceso.

8.3 Condiciones del secado

La superficie específica para el secado se mantiene constante, pero las demás condiciones del secado como, temperatura, humedad relativa del aire ambiental, caudal de aire para el secado y velocidad del aire no son constantes. Por lo tanto la velocidad del secado no puede ser expresada como constante de la variación del contenido de humedad en función del tiempo y el coeficiente de transferencia de masa para el secado no será constante para estas condiciones, se tiene un valor promedio.



El contenido de humedad inicial del cacao en grano fermentado disminuirá hasta un contenido de humedad en equilibrio, este será el contenido final de humedad y el secado tendrá lugar hasta este punto.

8.4 Datos del proceso de secado del cacao en grano

Para los cálculos previos al diseño del equipo es necesario conocer algunos datos de las condiciones medioambientales del lugar donde se colocará el equipo.

Según datos de la prefectura del Guayas, el cantón Naranjal se asienta a 17 m.s.n.m. y su temperatura promedio de 25°C. La temperatura del cantón puede estar en un mínimo de 14°C hasta un máximo de 36°C. (Gobierno Provincial del Guayas, 2015) (Briones García, Proaño, & Medina, 2011) (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2015). El valor promedio de los valores medios mensuales de humedad relativa para el cantón Naranjal es del 85% (Briones García, Proaño, & Medina, 2011); sin embargo, la humedad relativa del cantón, durante el transcurso de un día, está dentro de un intervalo de 60% a 100% (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2015) y este valor puede variar de un lugar a otro, dentro del mismo cantón, dependiendo de las características del lugar donde se mida, como la presencia de vegetación y otras fuentes hídricas.

Según datos de investigadores de la Universidad Politécnica Salesiana y la Universidad de Piura, en Perú, el calor específico del cacao fermentado tiene un valor constante de 3,715392 kJ/kg°C, tomando de referencia cacao fermentado con un contenido de humedad del 56% (Parra Rosero, Saavedra, & Inapaqué, 2012).

El valor del tanto por uno de masa que se obtiene luego del proceso de fermentación varía según del contenido de humedad del cacao en baba y el contenido de humedad que tiene el producto, luego del proceso de fermentación. Debido a que el contenido de humedad del cacao en baba es diferente para cada lote de producción, el valor de F también será diferente para cada lote de producción, pudiendo tomar un valor máximo de 1, que equivale al 100%. Para efectos de cálculo se utiliza este valor máximo.



Reemplazando este valor de F en la ecuación (2), se tiene:

$$M_F = 1 * M_B \quad (37)$$

Substituyendo el valor de un lote de producción, determinado en el capítulo cinco, en la ecuación (37), se tiene:

$$M_F = 1 * 400 \text{ kg}$$

$$M_F = 400 \text{ kg} \quad (38)$$

8.4.1 Aire en el inicio del proceso de secado

El aire del medio ambiente, que se utilizará para el proceso de secado, se toma en cuenta en un escenario donde las condiciones no sean favorables para llevar a cabo el proceso, esto es donde el porcentaje humedad relativa y la temperatura tengan sus valores máximos posibles, a una temperatura máxima de 36°C y aire saturado (100% de humedad relativa). De acuerdo al diagrama psicrométrico del manual del ingeniero químico de Perry (Perry & Green, 2008), el aire en estas condiciones tiene un contenido de humedad absoluta de 0,039 kg de vapor por cada kilogramo de aire seco.

Entonces se tiene que:

$$Y_0 = 0,039 \frac{\text{kg de vapor}}{\text{kg de aire seco}} \quad (39)$$

Donde:

Y_0 : humedad absoluta inicial del aire (antes del secado).

Al calentar este aire, con contenido de humedad Y_0 , aumenta la presión de saturación de vapor de agua en la mezcla con aire y por consiguiente disminuye su humedad relativa, permitiendo que este aire sea capaz de captar más vapor de agua.



8.4.2 Aire al final del proceso de secado

El aire para el secado deberá salir con un contenido de humedad que se encuentre en equilibrio con el contenido de humedad del cacao en grano seco. Según los datos obtenidos en el la determinación de la actividad acuosa del cacao en grano fermentado en relación con su contenido de humedad, en el capítulo seis; el contenido de humedad del cacao en grano seco, con un contenido de humedad del 3% tiene una actividad acuosa de 0,3.

La actividad acuosa se define como:

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (40)$$

En donde:

p : Presión de vapor de agua en la sustancia.

p_0 : Presión de vapor de agua a la misma temperatura.

La humedad relativa se define como:

$$HR = \frac{p}{p^*} \quad (41)$$

p : Presión parcial de vapor de agua en la mezcla con aire.

p^* : Presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura, en la mezcla con aire.

Cuando la presión del contenido de humedad del cacao en grano seco es igual a la presión de vapor de agua en el aire, se tienen las condiciones de equilibrio; esto deberá darse en el proceso cuando la actividad acuosa del cacao en grano seco es de 0,3; que corresponde con el 3% de contenido de humedad).

Entonces el valor de la humedad absoluta del aire, a la salida del equipo, se obtiene en función de su temperatura, cuando se tiene un 0,3 de saturación y por tanto un 30% de humedad relativa.



Los datos determinados en este capítulo se resumen en la siguiente tabla:

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Observaciones
Lote de producción	M_F	400	kg	-
Contenido de humedad del cacao fermentado	X	56%	-	En base húmeda
Calor específico del cacao fermentado	C_c	3,71539	kJ / kg °C	Con el 56% de humedad en base húmeda
Temperatura ambiental (Temperatura del cacao en grano al inicio del secado)	t_i	36	°C	-
Humedad relativa ambiental y a la entrada del equipo	$\%HR_i$	100%	-	-
Humedad absoluta ambiental	Y_0	0,039	kg de vapor / kg de aire seco	Obtenido del diagrama psicrométrico.
Contenido de humedad del cacao en grano seco	x	3%	-	En base húmeda
Actividad acuosa del cacao en grano seco	a_w	0,3	-	-
Humedad relativa del aire a la salida del equipo	$\%HR_f$	30%	-	-

Tabla 4. Datos del proceso de secado del cacao en grano en el cantón Naranjal. Ciudad de Cuenca. 2014. Fuente propia.



Capítulo 9

Diseño del equipo de secado

9.1 Diseño de la cámara de secado

Se dispondrá un número de bandejas N , que contendrán el cacao en grano, colocadas horizontalmente una sobre otra, con una distancia de separación d entre cada una de ellas. El área de cada bandeja A_B multiplicada por el número total de bandejas deberá ser igual o mayor a la superficie total del cacao en grano para el secado, en base a un lote de producción, determinada en el capítulo seis.

$$A_B * N \geq S \quad (42)$$

En donde:

A_B : Área de cada bandeja.

N : Número de bandejas.

Teniendo en cuenta que la capacidad de la cámara de secado es para un lote de producción, se tiene:

$$\begin{aligned} A_B * N &= S \\ N &= \frac{S}{A_B} \end{aligned} \quad (43)$$

La altura del interior de la cámara de secado viene dada por:

$$\begin{aligned} c &= (N + 1) * d + N * e \\ c &= N * d + d + N * e \\ c &= N * (d + e) + d \end{aligned} \quad (44)$$

En donde:

c : Altura del interior de la cámara de secado.



d : Distancia entre bandejas.

e : Espesor de cada bandeja.

Reemplazando la ecuación (43) en la ecuación (44) se tiene:

$$c = \frac{S}{A_B} * (d + e) + d \quad (45)$$

El área de cada bandeja corresponde a las dimensiones de la base de la cámara de secado:

$$A_B = a * b \quad (46)$$

En donde:

a : largo del interior de la cámara de secado.

b : ancho de la cámara de secado.

Las bandejas deberán tener la máxima superficie en el mínimo contorno de las mismas, debido a que un mínimo contorno admite menos materiales de construcción en las paredes de la cámara de secado y por, implica un menor costo de construcción de la cámara de secado. Esta condición se cumple cuando las bandejas son cuadradas, a continuación se demuestra:

$$P_B = a + a + b + b$$

$$P_B = 2a + 2b$$

En donde:

P_B : Perímetro o contorno de cada bandeja, es igual a la suma de sus lados.

Se le asigna cualquier valor al contorno de cada bandeja, en este caso el valor de la unidad: $P_B = 1 \quad \therefore \quad 2a + 2b = 1 \quad (47)$

Se despeja cualquier variable:

$$a = \frac{1 - 2b}{2}$$



Se reemplaza en la ecuación (46):

$$A_B = \left(\frac{1 - 2b}{2}\right) * b$$

$$A_B = \left(\frac{b - 2b^2}{2}\right)$$

$$A_B = \frac{b}{2} - \frac{2b^2}{2}$$

$$A_B = \frac{b}{2} - b^2$$

Se obtiene la primera derivada con respecto a b :

$$\frac{\partial A_B}{\partial b} = \frac{1}{2} - 2b$$

El área máxima en el contorno mínimo se obtiene cuando:

$$\frac{\partial A_B}{\partial b} = 0$$

Reemplazando se tiene:

$$\frac{1}{2} - 2b = 0$$

$$2b = \frac{1}{2}$$

$$b = \frac{1}{4}$$

Se reemplaza en (47) y se tiene:

$$2a + 2\left(\frac{1}{4}\right) = 1$$

$$2a + 2\left(\frac{1}{4}\right) = 1$$

$$2a + \frac{1}{2} = 1$$



$$2a = 1 - \frac{1}{2}$$

$$2a = \frac{1}{2}$$

$$a = \frac{1}{4} \quad \therefore \quad a = b$$

Entonces la ecuación (46) queda como:

$$A_B = a^2 \quad (48)$$

Reemplazando la ecuación (48) en la ecuación (45), se tiene:

$$c = \frac{S}{a^2} * (d + e) + d \quad (49)$$

La distancia entre bandejas debe ser mínima para economizar materiales de fabricación, pero a su vez debe permitir la separación entre la superficie del producto que contiene y la bandeja inmediatamente superior. Usualmente los fabricantes utilizan una distancia de separación entre bandejas entre una y tres pulgadas (Hastings, 2009), que sería alrededor de entre tres y ocho centímetros. Para calcular la altura del interior de la cámara de secado, se tomará un valor de 10cm para la separación entre bandejas; sin embargo, se considerará un valor de 15cm como altura total de separación, que incluye el espesor de la bandeja y la altura necesaria para su instalación. Tales valores se transforman a metros y se reemplazan en la ecuación (49) y se obtiene:

$$c = \frac{46 \text{ m}^2}{a^2} * (0,15\text{m}) + 0,10\text{m}$$
$$c = \frac{6,9\text{m}^3}{a^2} + 0,10\text{m} \quad (50)$$

El uso de materiales debe ser el mínimo posible para ahorrar costos, las dimensiones de la cámara de secado deben cumplir este requisito y presentar el mayor volumen posible en la menor superficie externa posible.



9.1.1 Cálculo de las dimensiones óptimas de la cámara de secado

El volumen de la cámara de secado viene dado por:

$$V = a * b * c = a^2 * c \quad (51)$$

Reemplazando la ecuación (51) en la ecuación (50), se obtiene:

$$V = a^2 * \left(\frac{6,9m^3}{a^2} + 0,10m \right)$$

$$V = 6,9m^3 + 0,10m * a^2 \quad (52)$$

9.1.2 Cálculo de la mínima superficie de materiales necesaria para construir la cámara de secado

Se tiene la superficie externa de la cámara de secado más la superficie de las bandejas

$$A = A_E + 46m^2 \quad (53)$$

En donde:

A: Superficie de materiales necesaria para construir la cámara de secado.

A_E: Superficie externa de la cámara de secado.

La superficie externa de la cámara de secado viene dada por:

$$A_E = 2 * (a * b + a * c + b * c) = 2 * (a^2 + a * c + a * c)$$

$$A_E = 2a^2 + 4a * c \quad (54)$$

Reemplazando la ecuación (54) en la ecuación (53), se obtiene:

$$A = 2a^2 + 4a * c + 46m^2 \quad (55)$$



Reemplazando la ecuación (50) en la ecuación (55), se obtiene:

$$A = 2a^2 + 4a * \left(\frac{6,9m^3}{a^2} + 0,10m \right) + 46m^2$$
$$A = 2a^2 + \frac{27,6m^3}{a} + 0,40m * a + 46m^2$$

(56)

Se obtiene la primera derivada de la ecuación (56):

$$\partial A = 2 * 2a * \partial a - \frac{27,6m^3 * \partial a}{a^2} + 0,40m * \partial a + \partial(46m^2)$$
$$\partial A = 4a * \partial a - \frac{27,6m^3 * \partial a}{a^2} + 0,40m * \partial a$$

(57)

Se obtiene la primera derivada de la ecuación (52):

$$\partial V = \partial(6,9m^3) + \partial(0,10m * a^2)$$
$$\partial V = 0,10m * 2a * \partial a$$
$$0,10m * 2a * \partial a = \partial V$$
$$\partial a = \frac{\partial V}{0,10m * 2a}$$
$$\partial a = 20 \frac{\partial V}{m * a}$$

(58)

Se reemplaza la ecuación (58) en la ecuación (57) y se tiene:

$$\partial A = 4a * \left(20 \frac{\partial V}{m * a} \right) - \frac{27,6m^3}{a^2} \left(20 \frac{\partial V}{m * a} \right) + 0,40m * \left(20 \frac{\partial V}{m * a} \right)$$
$$\partial A = 80 \frac{\partial V}{m} - \frac{552m^2 * \partial V}{a^3} + 8 \frac{\partial V}{a}$$
$$\frac{\partial A}{\partial V} = \frac{80}{m} - \frac{552m^2}{a^3} + \frac{8}{a}$$



El área mínima se obtiene cuando:

$$\frac{\partial A}{\partial V} = 0$$

Entonces se tiene:

$$0 = \frac{80}{m} - \frac{552m^2}{a^3} + \frac{8}{a}$$

$$\frac{80}{m} + \frac{8}{a} - \frac{552m^2}{a^3} = 0$$

$$\frac{80a^3}{m} + 8a^2 - 552m^2 = 0$$

$$a = 1,871022 m \quad (59)$$

Reemplazando la ecuación (59) en la ecuación (48), se obtiene:

$$A_B = 3,500 m^2 \quad (60)$$

Reemplazando la ecuación (59) en la ecuación (43), se obtiene:

$$N \sim \frac{46m^2}{3,5m^2}$$

$$N \sim 13,143$$

$$N = 13 \quad (\text{Comprende el 99\% del total})$$

Reemplazando la ecuación (59) en la ecuación (50), se obtiene:

$$c = \frac{6,9m^3}{3,5m^2} + 0,10m$$

$$c = 2,071 m \quad (61)$$

Reemplazando la ecuación (59) en la ecuación (52), se obtiene:

$$V = 6,9m^3 + 0,10m * 3,5m^2$$

$$V = 7,25 m^3$$



9.2 Esquema del secado del cacao en grano

Para dimensionar correctamente los equipos que suministrarán la energía necesaria para el secado, se realizan balances de materia y energía. En el balance de materia, el aire gana humedad que pierde el sólido. La masa de agua ganada por el aire es igual a la masa de aire perdida por el cacao fermentado. En el balance de energía, la energía proporcionada por el aire será igual a la energía necesaria para efectuar el proceso. El proceso de secado se puede esquematizar en el siguiente gráfico, junto con los datos de la Tabla 4, del capítulo ocho:

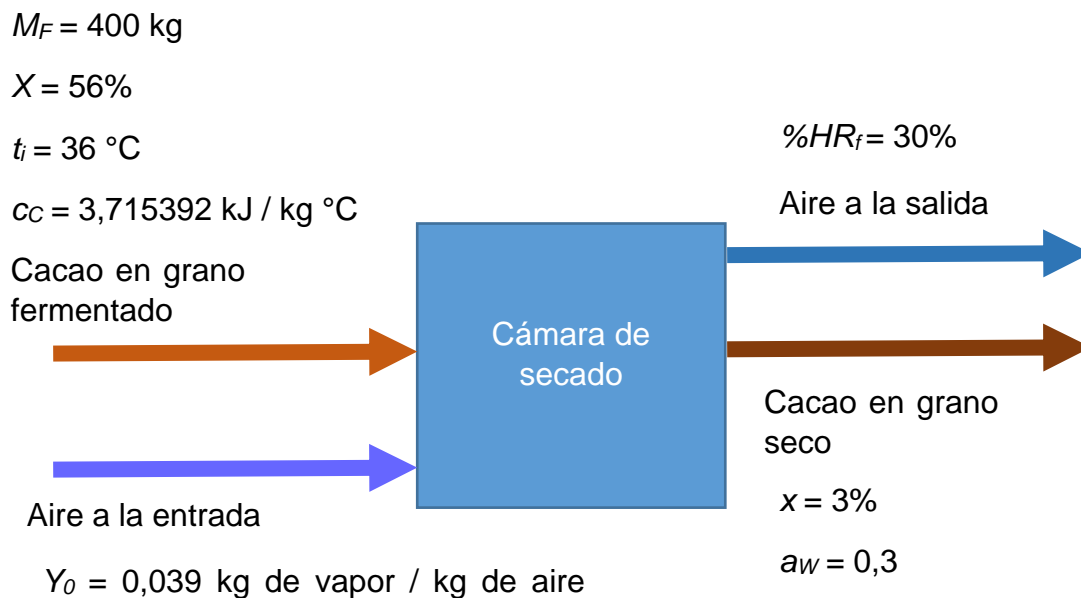


Figura 13. Esquema del proceso de secado del cacao en grano. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente propia.

Para conocer el contenido de humedad del aire a la salida del equipo, se requiere conocer la cantidad de aire que se debe suministrar a la entrada de la cámara de secado y la temperatura del mismo; debido a que, esta cantidad de aire que se debe suministrar al proceso se determina en función de la masa de humedad que el aire sea capaz de retirar del cacao en grano fermentado.



9.3 Balance general de materia para el secado del cacao en grano

El contenido de humedad que obtiene el aire es igual al contenido de humedad que pierde el cacao en el proceso de secado. La cantidad de aire seco a suministrar en el proceso se multiplica por la humedad absoluta final del aire menos su humedad absoluta inicial, ambas se expresan por masa de aire totalmente seco.

$$m_a = A * (Y - Y_0) \quad (62)$$

En donde:

m_a : Masa que se pierde durante el proceso de secado (Véase capítulo tres).

A: masa de aire seco que se pondrá en contacto con el cacao fermentado.

Y: humedad absoluta final del aire (luego del secado).

Substituyendo la ecuación (3) en la ecuación (62), se obtiene:

$$A * (Y - Y_0) = M_F - M_S \quad (63)$$

Substituyendo las ecuaciones (2) y (13) en la ecuación (63), se obtiene:

$$A * (Y - Y_0) = M_F - \frac{(1 - X) * F * M_B}{(1 - x)}$$

$$A * (Y - Y_0) = M_F \left[1 - \frac{(1 - X)}{(1 - x)} \right]$$

$$A * (Y - Y_0) = F * M_B \left[\frac{(X - x)}{(1 - x)} \right]$$

$$A = \frac{M_F}{(Y - Y_0)} \left[\frac{(X - x)}{(1 - x)} \right] \quad (64)$$



Se considera de acuerdo al punto óptimo de secado, con el contenido de humedad más bajo, que el contenido de humedad final será del 3%. Entonces se tiene:

$$A = \frac{M_F}{(Y - Y_0)} \left[\frac{(X - 0,03)}{(1 - 0,03)} \right]$$
$$A = \frac{M_F}{(Y - Y_0)} \left[\frac{(X - 0,03)}{(0,97)} \right]$$

(65)

El contenido de humedad del cacao en baba es una propiedad de tal producto, la cual varía para cada lote de producción; el contenido de humedad del cacao en fermentado también varía de un lote a otro, de acuerdo al proceso de fermentación.

Para efectos de cálculo, se tomará el valor de 56%, referencia de otros investigadores (Parra Rosero, Saavedra, & Inapaqué, 2012).

Se reemplaza éste valor en la ecuación (65) y se obtiene:

$$A = \frac{M_F}{(Y - Y_0)} \left[\frac{(0,56 - 0,03)}{(0,97)} \right]$$
$$A = \frac{M_F}{(Y - Y_0)} \left[\frac{(0,53)}{(0,97)} \right]$$
$$A = \frac{53 * M_F}{97 * (Y - Y_0)}$$

(66)

Se reemplazando el dato del tamaño de un lote de cacao en grano fermentado, de la Tabla 4 en la ecuación anterior, se tiene:

$$A = \frac{53 * 400 \text{ kg}}{97 * (Y - Y_0)}$$
$$A = \frac{21200 \text{ kg}}{97 * (Y - 0,039)}$$

(67)



El valor de Y , la humedad absoluta final del aire, deberá estar en equilibrio con el contenido de humedad final del sólido, entonces se tiene:

$$A = \frac{21200 \text{ kg}}{97 * (Y^* - Y_0)} \quad (68)$$

En donde:

Y^* : Humedad absoluta final del aire (luego del secado), en equilibrio con el contenido final de humedad del cacao en grano (3%).

El contenido de humedad absoluta final del aire está en función de la temperatura del aire a la salida del proceso y esta temperatura es la misma que la del cacao en grano seco, debido a que se encuentran en el estado de equilibrio termodinámico y de transferencia de masa. Para conocer el contenido de humedad absoluta final del aire se debe conocer la temperatura al final del proceso y viceversa; se procede entonces al balance de energía del proceso de secado del cacao en grano.

Substituyendo el dato de la humedad absoluta inicial de la Tabla 4 en la ecuación (68) se obtiene:

$$A = \frac{21200 \text{ kg}}{97 * (Y^* - 0,039)}$$
$$A = 218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} \quad (69)$$

9.4 Balance general de energía para el secado del cacao en grano

El aire al inicio del proceso proveerá la energía necesaria para efectuar el secado; tal energía, en forma de calor, será transmitida desde el aire hacia el cacao en grano.

El calor cedido por el aire más el calor ganado por el cacao en grano más las pérdidas de calor es igual a cero.

$$q_a + q_c + p = 0 \quad (70)$$



En donde:

q_a : Energía en forma de calor, perdido por el aire para efectuar el proceso de secado.

q_c : Energía en forma de calor, ganado por el cacao en grano para efectuar el proceso de secado.

p : Pérdidas de energía en forma de calor en el proceso de secado.

9.4.1 Balance de energía del aire para el secado

Es necesario proporcionar la energía necesaria para elevar la temperatura del cacao fermentado hasta obtener las condiciones de equilibrio para el secado; además se debe proporcionar la energía necesaria para el cambio de fase del agua, el cual se tiene al retirar la humedad del cacao en grano; es decir, se tiene calor sensible y calor latente; los cuales serán proporcionados por el aire para el secado.

La energía necesaria que deberá proporcionar el aire para llevar a cabo el proceso está dada por la siguiente expresión:

$$q_a = A(h_i - h_f) \quad (71)$$

En donde:

h_i : Entalpía del aire a la entrada del equipo (entra a más de 60°C y $a_w < a_{0,3}$)

h_f : Entalpía del aire a la salida del equipo (sale a 60°C y $a_w = 0,3$)

La entalpía del aire viene dada por:

$$h = (c_a + c_v Y) * T + \lambda_v Y \quad (72)$$

Donde:

c_a : Calor específico del aire seco a la temperatura de estudio.



c_v : Calor específico del vapor de agua a la temperatura de estudio.

Y : Humedad absoluta del aire a la temperatura de estudio.

T : Temperatura del aire húmedo.

λ_v : Calor latente de vaporización del agua.

La entalpía del aire a la entrada del equipo viene dada por:

$$h_i = (c_{ai} + c_{vi} * Y_0) * T_{ai} + \lambda_{vi} * Y_0 \quad (73)$$

Donde:

T_{ai} : Temperatura del aire a la entrada del equipo.

La entalpía del aire a la salida del equipo viene dada por:

$$h_f = (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{af} + \lambda_{vf} * Y^* \quad (74)$$

Donde:

T_{af} : Temperatura del aire a la salida del equipo.

El proceso de secado tiene lugar hasta obtener las condiciones de equilibrio entre el cacao en grano seco y el aire a la salida del equipo; por lo tanto, en estas condiciones, la temperatura final del cacao en grano seco será igual a la temperatura del aire a la salida del equipo.

Entonces se tiene que:

$$T_{af} = T_{sf} \quad (75)$$

Reemplazando la ecuación (75) en la ecuación (74), se tiene:

$$h_f = (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} + \lambda_{vf} * Y^* \quad (76)$$



Reemplazando las ecuaciones (73) y (76) en la ecuación (71) se tiene:

$$q_a = A\{[(c_{ai} + c_{vi} * Y_0) * T_{ai} + \lambda_{vi} * Y_0] - [(c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} + \lambda_{vf} * Y^*]\}$$

$$q_a = A[(c_{ai} + c_{vi} * Y_0) * T_{ai} + \lambda_{vi} * Y_0 - (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} - \lambda_{vf} * Y^*]$$

(77)

Reemplazando el dato de la humedad absoluta inicial del aire, de la Tabla 4 en la ecuación (77) se obtiene:

$$q_a = A[(c_{ai} + c_{vi} * 0,039) * T_{ai} + \lambda_{vi} * 0,039 - (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} - \lambda_{vf} * Y^*]$$

$$q_a = A[(c_{ai} + 0,039c_{vi}) * T_{ai} + 0,039\lambda_{vi} - (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} - \lambda_{vf} * Y^*]$$

(78)

9.4.2 Balance de energía del cacao en grano

El cacao en grano ingresa al proceso de secado con un contenido de energía inicial y sale de este con un contenido de energía final, en función de su temperatura.

La energía que requiere el cacao en grano fermentado para disminuir su contenido de humedad, viene dada por:

$$q_c = z(H_f - H_i) \quad (79)$$

En donde:

z : Masa de un lote de cacao en grano seco (totalmente seco).

H_f : Entalpía, específica por unidad de masa del cacao en grano seco, necesaria para disminuir su contenido de humedad.

H_i : Entalpía, específica por unidad de masa del cacao en grano seco, inicial del cacao en grano.

La masa de un lote de cacao en grano totalmente seco viene dada por:

$$z = M_F(1 - X) \quad (80)$$



Substituyendo la ecuación (80) en la ecuación (79):

$$q_c = M_F(1 - X)(H_f - H_i) \quad (81)$$

La entalpía, específica por unidad de masa del cacao en grano seco, inicial del cacao en grano se calcula con la siguiente expresión:

$$H_i = c_c * T_{Si} + H_0 \quad (82)$$

En donde:

H_i : Entalpía, específica por unidad de masa del cacao en grano, inicial del cacao en grano.

c_c : Calor específico del cacao en grano fermentado.

T_{Si} : Temperatura inicial de superficie del cacao en grano.

H_0 : Calor integral de la mezcla que compone el cacao en grano, referido a 0 °C.

La entalpía, específica por unidad de masa del cacao en grano seco, inicial del cacao en grano se calcula con la siguiente expresión:

$$H_f = (c_c - X_{db} * c_L + x_{db} * c_L) * T_{Sf} + H_0$$

$$H_f = [(c_c + c_L(x_{db} - X_{db})) * T_{Sf} + H_0$$

(83)

En donde:

H_f : Entalpía, específica por unidad de masa del cacao en grano.

X_{db} : Contenido inicial de humedad, expresado en base seca, del cacao en grano.

x_{db} : Contenido final de humedad, expresado en base seca, del cacao en grano.

c_L : Calor específico del agua a la temperatura final de superficie.

T_{Sf} : Temperatura final de superficie del cacao en grano.



Substituyendo las ecuaciones (82) y (83) en la ecuación (81), se tiene:

$$\begin{aligned}
 q_c &= M_F(1 - X)\{(c_C + c_L(x_{db} - X_{db})) * T_{Sf} + H_0 - (c_C * T_{Si} + H_0)\} \\
 q_c &= M_F(1 - X)\{(c_C + c_L(x_{db} - X_{db})) * T_{Sf} + H_0 - c_C * T_{Si} - H_0\} \\
 q_c &= M_F(1 - X)\{(c_C + c_L(x_{db} - X_{db})) * T_{Sf} - c_C * T_{Si} + H_0 - H_0\} \\
 q_c &= M_F(1 - X)\{(c_C + c_L(x_{db} - X_{db})) * T_{Sf} - c_C * T_{Si}\}
 \end{aligned}
 \tag{84}$$

Cálculo del contenido final de humedad, expresado en base seca, del cacao en grano:

$$x_{db} = \frac{x}{1 - x}
 \tag{85}$$

Cálculo del contenido final de humedad, expresado en base seca, del cacao en grano:

$$X_{db} = \frac{X}{1 - X}
 \tag{86}$$

Reemplazando las ecuaciones (85) y (86) en la ecuación (84), se obtiene:

$$\begin{aligned}
 q_c &= M_F(1 - X)\left\{\left[c_C + c_L\left(\frac{x}{1 - x} - \frac{X}{1 - X}\right)\right] * T_{Sf} - c_C * T_{Si}\right\} \\
 q_c &= M_F(1 - X)\left\{\left[c_C + c_L\left(\frac{x(1 - X) - X(1 - x)}{(1 - x)(1 - X)}\right)\right] * T_{Sf} - c_C * T_{Si}\right\} \\
 q_c &= M_F(1 - X)\left\{\left[c_C + c_L\left(\frac{x - xX - X + xX}{(1 - x)(1 - X)}\right)\right] * T_{Sf} - c_C * T_{Si}\right\} \\
 q_c &= M_F(1 - X)\left\{\left[c_C + c_L\left(\frac{x - X}{(1 - x)(1 - X)}\right)\right] * T_{Sf} - c_C * T_{Si}\right\}
 \end{aligned}
 \tag{87}$$



Reemplazando de la Tabla 4 en la ecuación (87), se tiene:

$$\begin{aligned}
 q_c &= 400kg(1 \\
 &\quad - 0,56) \left\{ \left[3,715 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + 4,183 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \left(\frac{0,03(1 - 0,56) - 0,56(1 - 0,03)}{(1 - 0,03)(1 - 0,56)} \right) \right] * T_{Sf} - 3,715 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right. \\
 &\quad \left. * 36 \text{ } ^\circ C \right\} \\
 q_c &= 176kg \left\{ \left[3,715 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} + 4,183 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \left(-\frac{1325}{1067} \right) \right] * T_{Sf} - 133,754 \frac{kJ}{kg} \right\} \\
 q_c &= 176kg \left[\left(-1,479 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right) * T_{Sf} - 133,754 \frac{kJ}{kg} \right] \\
 q_c &= -260,304 \frac{kJ}{^\circ C} * T_{Sf} - 23540,723 kJ \\
 &\hspace{15em} (88)
 \end{aligned}$$

9.5 Balance general de materia y energía para el proceso de secado

Las ecuaciones (78) y (88) se reemplazan en la ecuación (70), para obtener el balance general de energía para el secado:

$$\begin{aligned}
 A[(c_{ai} + 0,039c_{Vi}) * T_{ai} + 0,039\lambda_{Vi} - (c_{af} + c_{Vf} * Y^*) * T_{Sf} - \lambda_{Vf} * Y^*] \\
 + \left(-260,304 \frac{kJ}{^\circ C} * T_{Sf} - 23540,723 kJ \right) + p = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A[(c_{ai} + 0,039c_{Vi}) * T_{ai} + 0,039\lambda_{Vi} - (c_{af} + c_{Vf} * Y^*) * T_{Sf} - \lambda_{Vf} * Y^*] \\
 - 260,304 \frac{kJ}{^\circ C} * T_{Sf} - 23540,723 kJ + p = 0
 \end{aligned}$$



Los datos para resolver esta ecuación, como calores específicos, calores latentes, contenidos de humedad absoluta y entalpías de vaporización, son propiedades intensivas de la materia y se pueden encontrar en diversas fuentes bibliográficas, como el manual del ingeniero químico de Perry (Perry & Green, 2008), donde se expresan en *kcal*; por lo que es necesario transformar la ecuación a las unidades correspondientes.

$$A[(c_{ai} + 0,039c_{vi}) * T_{ai} + 0,039\lambda_{vi} - (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} - \lambda_{vf} * Y^*] - 260,304 \frac{kJ}{^{\circ}C} * \frac{1kcal}{4,184kJ} * T_{sf} - 23540,723 kJ * \frac{1kcal}{4,184kJ} + p = 0$$
$$A[(c_{ai} + 0,039c_{vi}) * T_{ai} + 0,039\lambda_{vi} - (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} - \lambda_{vf} * Y^*] - 62,214 \frac{kcal}{^{\circ}C} * T_{sf} - 5626,195 kcal + p = 0$$

(89)

Para obtener el balance general de materia y energía para el secado, se reemplaza la ecuación (69) en la ecuación (89) y se obtiene:

$$218,556 kg * (Y^* - 0,039)^{-1} [(c_{ai} + 0,039c_{vi}) * T_{ai} + 0,039\lambda_{vi} - (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} - \lambda_{vf} * Y^*] - 62,214 \frac{kcal}{^{\circ}C} * T_{sf} - 5626,195 kcal + p = 0$$

(90)

9.6 Cálculo de la temperatura del aire al inicio del secado

La temperatura del aire al inicio del secado se obtiene al suponer que no existen pérdidas de calor en el balance general de materia y energía para el secado. Es decir, se supone que tal valor es igual a cero, debido a que las pérdidas de calor únicamente afectan la temperatura de la película superficial de las paredes de la cámara de secado. Además, con ésta suposición, se calcularán los demás parámetros como la masa de aire para el secado y su humedad absoluta inicial y final del proceso. Ulteriormente se calcularán las pérdidas de calor del proceso, las cuales serán suplidas mediante un aumento de la potencia de la energía requerida en el proceso.



Al tener pérdidas de calor, se puede aumentar la masa de aire para el secado o la temperatura de este. Dicho incremento de temperatura no ganará humedad, sino que cederá su calor sensible para compensar las pérdidas de calor en el equipo. En este caso, de suplir las pérdidas de calor mediante un aumento en la potencia de la energía requerida para efectuar el proceso, las propiedades físicas a considerar (con el incremento de temperatura, que compensará las pérdidas de calor en el equipo) serán las mismas que las obtenidas mediante el cálculo de la temperatura del aire al inicio del secado, considerando que las pérdidas de calor son iguales a cero.

Suponiendo que:

$$p = 0$$

La ecuación (90) queda de la siguiente manera:

$$218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} [(c_{ai} + 0,039c_{vi}) * T_{ai} + 0,039\lambda_{vi} - (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} - \lambda_{vf} * Y^*] - 62,214 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C}} * T_{sf} - 5626,195 \text{ kcal} + 0 = 0$$

$$218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} (c_{ai} + 0,039c_{vi}) * T_{ai} + 218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} * 0,039\lambda_{vi} - 218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} * (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} - 218,556 \text{ kg} * \lambda_{vf} * Y^* * (Y^* - 0,039)^{-1} - 62,214 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C}} * T_{sf} - 5626,195 \text{ kcal} = 0$$

$$218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} (c_{ai} + 0,039c_{vi}) * T_{ai} = -218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} * 0,039\lambda_{vi} + 218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} * (c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} + 218,556 \text{ kg} * \lambda_{vf} * Y^* * (Y^* - 0,039)^{-1} + 62,214 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C}} * T_{sf} + 5626,195 \text{ kcal}$$

$$218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} (c_{ai} + 0,039c_{vi}) * T_{ai} = 218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} * [(c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} + \lambda_{vf} * Y^* - 0,039\lambda_{vi}] + 62,214 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C}} * T_{sf} + 5626,195 \text{ kcal}$$



$$T_{ai} = \frac{218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1} * [(c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} + \lambda_{vf} * Y^* - 0,039\lambda_{vi}]}{218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1}(c_{ai} + 0,039c_{vi})} + \frac{+62,214 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C}} * T_{sf} + 5626,195 \text{ kc}}{218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1}(c_{ai} + 0,039c_{vi})}$$
$$T_{ai} = \frac{[(c_{af} + c_{vf} * Y^*) * T_{sf} + \lambda_{vf} * Y^* - 0,039\lambda_{vi}]}{(c_{ai} + 0,039c_{vi})} + \frac{62,214 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C}} * T_{sf} + 5626,195 \text{ kc}}{218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1}(c_{ai} + 0,039c_{vi})}$$

(91)

Los datos para resolver esta ecuación, como calores específicos, calores latentes, contenidos de humedad absoluta y entalpías de vaporización, son propiedades intensivas de la materia y son a su vez funciones de la temperatura de estudio a ser calculada. Para resolver la ecuación (91), pueden realizarse substituciones de ecuaciones, reemplazando todas las funciones de la temperatura de estudio de cada variable contenida en la ecuación; sin embargo, lo más sencillo es realizar un proceso de ensayo y error, o tanteo, y comprobar los valores supuestos de las temperaturas al inicio del proceso de secado con sus respectivos valores calculados.



Como se indicó antes, los datos necesarios para resolver la ecuación (91) se obtendrán de las tablas de propiedades físicas de la materia, del manual del ingeniero químico de Perry (Perry & Green, 2008). A continuación se tienen las posibles soluciones le la ecuación (91), en función de la temperatura del aire al inicio del proceso, las soluciones se determinaron utilizando la herramienta SOLVER de Microsoft EXCEL (Microsoft Corporation, 2013).

t_{ai} supuesta °C	C_{ai} kcal/kg°C	C_{vi} kcal/kg°C	λ_{vi} kcal/kg	t_{sf} °C	C_{af} kcal/kg°C	C_{vf} kcal/kg°C	λ_{vf} kcal/kg	Y^*	t_{ai} calculada °C	% Error
61,0	0,241	0,448	562,6	60,3	0,241	0,448	563,1	0,039283	61,1	0,11%
62,0	0,241	0,448	562,0	60,5	0,241	0,448	563,0	0,039661	62,3	0,42%
63,0	0,241	0,448	561,4	60,6	0,241	0,448	562,9	0,039851	62,9	0,15%
64,0	0,241	0,448	560,8	60,8	0,241	0,448	562,8	0,040233	64,1	0,18%
65,0	0,241	0,448	560,3	60,9	0,241	0,448	562,7	0,040426	64,8	0,36%
66,0	0,241	0,448	559,7	61,1	0,241	0,448	562,6	0,040814	66,0	0,02%
67,0	0,241	0,448	559,1	61,3	0,241	0,448	562,5	0,041207	67,2	0,33%
68,0	0,241	0,448	558,5	61,4	0,241	0,448	562,4	0,041404	67,9	0,17%
69,0	0,241	0,448	557,9	61,6	0,241	0,448	562,3	0,041802	69,1	0,19%
70,0	0,241	0,448	557,3	61,7	0,241	0,448	562,3	0,042002	69,8	0,29%
71,0	0,241	0,448	556,7	61,9	0,241	0,448	562,1	0,042405	71,1	0,08%
72,0	0,241	0,448	556,1	62,0	0,241	0,448	562,1	0,042609	71,7	0,36%
73,0	0,241	0,449	555,5	62,2	0,241	0,448	562,0	0,043018	73,0	0,02%
74,0	0,241	0,449	554,9	62,4	0,241	0,448	561,8	0,043431	74,3	0,40%
75,0	0,241	0,449	554,3	62,5	0,241	0,448	561,8	0,043639	75,0	0,01%
76,0	0,241	0,449	553,7	62,7	0,241	0,448	561,7	0,044058	76,3	0,38%
77,0	0,241	0,449	553,1	62,8	0,241	0,448	561,6	0,044270	77,0	0,02%
78,0	0,241	0,449	552,5	63,0	0,241	0,448	561,5	0,044695	78,3	0,39%
79,0	0,241	0,449	551,9	63,1	0,241	0,448	561,4	0,044909	79,0	0,01%
80,0	0,241	0,449	551,3	63,2	0,241	0,448	561,4	0,045124	79,7	0,36%

Tabla 5. Datos de las posibles soluciones de la ecuación (91), representan la temperatura del aire que se puede tener al inicio del secado y sus correspondientes propiedades intensivas. Ciudad de Cuenca. 2014. Fuente propia.



9.7 Suministro de energía para el proceso de secado

La energía necesaria para efectuar el proceso de secado puede provenir de diversas fuentes, teniendo en cuenta la factibilidad técnica y económica. El desarrollo emergente de diferentes tecnologías, la de diversidad de mercados y la versatilidad de la economía son aspectos a considerar en cuanto a una solución sostenible.

9.7.1 Selección de la tecnología para el suministro de energía para el proceso de secado

Como se mencionó en el capítulo uno, el inconveniente de los secadores industriales radica principalmente en los costos elevados que implica su uso. Estos equipos no están disponibles económica y técnicamente para la mayoría de productores de cacao en grano y además de que requieren de instalaciones apropiadas y otros equipos adicionales para su funcionamiento.

Varios autores sostienen el hecho de que los secadores industriales no son adecuados para el secado del cacao en grano y además indican la escasez de información que existe sobre este tema: “Los sistemas de secado industrial están sujetos a grandes inversiones, por lo tanto los pequeños productores no tienen acceso a este proceso de secado de forma directa.”, “...la información científica en secadores aplicados a secado de cacao es muy escasa” (Parra Rosero, Saavedra, & Inapaqué, 2012). “En la práctica es imposible predecir el comportamiento de un material húmedo en su proceso de secado. Para algunos tipos de secador, el único método para determinar el tamaño del secador necesario es mediante ensayos del material en un secador a nivel planta piloto.” (Universidad Nacional Abierta y a Distancia Colombia, 2010).

La tecnología a usarse para el proceso de secado del cacao en grano depende del lugar donde se ubicará el equipo. El objetivo principal es reducir costos, manteniendo los criterios para el secado expuestos en el capítulo 2, en los puntos óptimos de secado del capítulo 7 y en la NTE INEN 0176.



Se deberán reducir costos innecesarios. Para minimizar el transporte y movimiento; el equipo debe colocarse en un lugar próximo a la producción del cacao en baba.

Como se mencionó en el capítulo ocho, el tipo de equipo trabaja por lotes. En los últimos años se ha masificado el uso directo de la fuente primaria de energía solar. La fuente de energía para el secado será de este tipo; se utilizará un colector de energía térmica solar y sus materiales de construcción serán de fácil adquisición, tanto en el aspecto técnico como en el aspecto económico.

9.7.2 Selección de materiales de construcción para el equipo de secado

El material a utilizarse para construir la estructura del equipo será madera, indistintamente del tipo, debido a que este material tiene baja conductividad térmica, se considera aislante y por lo tanto no retirará energía del proceso ; las bandejas serán construidas utilizando madera y malla de acero galvanizado o inoxidable, o de preferencia materiales poliméricos usados en alimentos, tales como polipropileno, polietileno, polietilentereftalato u otro; se tendrá una malla más fina en la entrada y salida del aire, en el equipo, para evitar el ingreso de partículas de mayor tamaño u organismos biológicos como mosquitos, entre otros. La cubierta de plástico de la cámara de secado y del colector solar de placa plana será fabricado con un material polimérico translucido que tenga una alta transmisividad de radiación térmica, esto quiere decir que el material permite atravesar un alto porcentaje de radiación infrarroja en el espectro de las ondas de calor; a su vez una baja conductividad térmica para que el calor absorbido no sea significativo en las pérdidas de calor; tal es el caso del polimetacrilato de metilo. La placa del colector solar térmico será fabricada con un material de alta selectividad térmica; esto es que tenga una alta absorptividad y baja emisividad dentro del espectro electromagnético de la radiación solar térmica, tal como el acero galvanizado. Adicionalmente se tienen perforaciones donde se colocarán pernos y clavos que sostendrán la estructura del equipo.

Todos los materiales descritos anteriormente son seguros, asequibles, resistentes, factibles de manipular y de precio módico.



9.8 Irradiancia solar térmica en el cantón Naranjal

Utilizando el *software* CENSOL 5.0 (Censolar ©, 2014), según datos disponibles en el programa, se han determinado la irradiación y las horas de sol útiles para cada mes del año, para el sector del Ingenio San Carlos, el cual se encuentra a una distancia de 30km del cantón Naranjal.

ALEMANIA	FINLANDIA	MOZAMBIQUE	MACAS (-02.3°)
ANGOLA	FRANCIA	NAMIBIA	MACHALA (-03.2°)
ANTÁRTIDA	GHANA	NICARAGUA	MALCHINGUI (+00.0°)
ARGELIA	GRAN CAIMÁN	NIGERIA	MANTA (-00.9°)
ARGENTINA	GRANADA	NUEVA ZELANDA	MILAGRO (-02.1°)
ÁRTICO	GRECIA	PAKISTÁN	MUTILE (+00.0°)
AUSTRALIA	GUATEMALA	PANAMÁ	NAPO-SAN VICENTE (-00.5°)
AUSTRIA	GUINEA	PARAGUAY	NUEVO ROCAFUERTE (-00.9°)
AZORES	GUINEA PORTUGUESA	PERÚ	OLMEDO (+00.1°)
BARBADOS	GUYANA	PORTUGAL	OLMEDO MANABI (-01.3°)
BÉLGICA	HAITI	REPÚBLICA DOMINICANA	PASAJE (-03.3°)
BELIZE	HONDURAS	REUNIÓN	PEDERNALES (+00.0°)
BIRMANIA	HUNGRIA	RUMANÍA	PICHILINGUE (-01.1°)
BOLIVIA	INDIA	RUSIA	PISAYAMBO (-01.0°)
BOTSWANA	IRAK	SANTA LUCÍA	PORTOVIEJO (-01.0°)
BRASIL	IRÁN	SANTO TOMÉ Y PRÍNCIPE	PUERTO BAQUERIZO (-00.9°)
BULGARIA	IRLANDA	SENEGAL	PUERTO BOLIVAR (-03.2°)
CABO VERDE. ISLAS	ISLANDIA	SINGAPUR	PUERTO ILA (-00.4°)
CANADÁ	ISRAEL	SOMOA AMERICANA	PUERTO LOPEZ (-01.5°)
CHAD	ITALIA	SRI LANKA	QUININDE (-00.3°)
CHEQUIA / ESLOVAQUIA	JAMAICA	SUDÁFRICA	QUITO-NAQUITO (-00.1°)
CHILE	JAPÓN	SUDÁN	RIOBAMBA (-01.6°)
CHINA	JORDANIA	SURINAM	RUMIPAMBA (-01.0°)
COLOMBIA	KENIA	TAILANDIA	SALINAS (-02.1°)
CONGO	KUWAIT	TAIWÁN	SALINAS-LA PUNTILLA (-02.2°)
COREA	LÍBANO	TANZANIA	SAN CARLOS (-02.2°)
COSTA RICA	MACAO	TRINIDAD-TOBAGO	SAN CRISTOBAL (-00.9°)
CUBA	MADAGASCAR	TÚNEZ	SAN JUAN-LA MANA (-00.9°)
DOMINICA	MADEIRA. ISLAS	TURQUÍA	SAN LORENZO (+01.2°)
ECUADOR	MALASIA	UGANDA	SAN SIMON (-01.6°)
EGIPTO	MALTA	URUGUAY	SANTA ISABEL (-03.3°)
EL SALVADOR	MALVINAS. ISLAS	VENEZUELA	SANTA ROSA (-03.4°)
ESPAÑA	MARRUECOS	VÍRGENES. ISLAS	SANTO DOMINGO (-00.2°)
ESTADOS UNIDOS	MARTINICA	ZAIRE	TABACUNDO (+00.0°)
ETIOPÍA	MAURITANIA	ZAMBIA	TAURA (-02.3°)
FIJI. ISLAS	MÉXICO	ZIMBAWE	TIPUTINI (-00.7°)
FILIPINAS	MONGOLIA		TULCAN (-00.8°)

© CENSOLAR													
Menu	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
MJ/m²:	12.1	12.4	14.2	13.9	12.4	10.6	10.9	11.6	11.8	11.9	11.7	12.5	12.2
kW-h/m²:	3.4	3.4	3.9	3.9	3.4	2.9	3.0	3.2	3.3	3.3	3.2	3.5	3.4

Tabla 6. Datos de la irradiación para San Carlos. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente CENSOL 5.5 (Censolar ©, 2014).

<horas>: horas diarias de sol útiles												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
horas	8.75	9.25	9.50	9.25	8.75	8.50	8.75	9.25	9.50	9.25	8.75	8.50

Tabla 7. Horas de sol útiles para el Cantón Naranjal. 2015. Ciudad de Cuenca. Fuente CENSOL 5.5 (Censolar ©, 2014).



En base a los datos de las Tablas (6) y (7), se calcula la irradiancia para cada mes del año en el cantón Naranjal. Los datos se tienen en la siguiente tabla:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Irradiación <i>kW*h/m²</i>	3,4	3,4	3,9	3,9	3,4	2,9	3,0	3,2	3,3	3,3	3,2	3,5
Horas útiles diarias	8,75	9,25	9,50	9,25	8,75	8,50	8,75	9,25	9,50	9,25	8,75	8,50
Irradiancia <i>kW/m²</i>	388,57	367,57	410,53	421,62	388,57	341,18	342,86	345,95	347,37	356,76	365,71	411,76

Tabla 8. Irradiancia solar térmica en el Cantón Naranjal. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente propia.

En la Tabla (8) se puede observar que el mes de menor irradiancia solar térmica es Junio. El equipo de secado para el cacao en grano deberá poder realizar el proceso en estas condiciones, por lo tanto este valor se tomará en cuenta para realizar los cálculos posteriores.

9.9 Cálculo de la temperatura máxima permisible del colector solar térmico

En lo que respecta a la transferencia de calor por radiación solar térmica, los factores de absorción están referidos a la absorción dentro de un rango espectral específico en el planeta tierra. Los datos de absorptividad y emisividad de diversos materiales, se obtienen de tablas que proporciona el fabricante. Para el acero galvanizado nuevo (sin oxidarse), según *The Engineering Toolbox* (*The Engineering Toolbox*, 2015), se tiene:

$$\alpha = 0,64$$

$$\epsilon = 0,23$$

En donde:

α : Absortividad del acero galvanizado nuevo.

ϵ : Emisividad del acero galvanizado nuevo.

Para el calentamiento de la lámina de acero galvanizado que compone el colector de energía solar térmica; a partir de la ley de Stefan-Boltzmann se tiene:

$$E = \varepsilon * \sigma * (T_{agfa}^4 - T_{agi}^4)$$

$$E = \varepsilon * \sigma * T_{agfa}^4 - \varepsilon * \sigma * T_{agi}^4$$

$$\varepsilon * \sigma * T_{agfa}^4 = E + \varepsilon * \sigma * T_{agi}^4$$

$$T_{agfa}^4 = \frac{E + \varepsilon * \sigma * T_{agi}^4}{\varepsilon * \sigma}$$

$$T_{agfa}^4 = \frac{E}{\varepsilon * \sigma} + \frac{\varepsilon * \sigma * T_{agi}^4}{\varepsilon * \sigma}$$

$$T_{agfa}^4 = \frac{E}{\varepsilon * \sigma} + T_{agi}^4$$

$$T_{agfa} = \sqrt[4]{\frac{E}{\varepsilon * \sigma} + T_{agi}^4}$$

(92)

En donde:

T_{gafa} : Temperatura absoluta final de la superficie de la lámina de acero galvanizado, en condiciones adiabáticas ideales.

E : Potencia de radiación solar térmica por unidad de área. (Irradiancia).

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

T_{gai} : Temperatura absoluta inicial de la superficie de la lámina de acero galvanizado.

La temperatura inicial de la superficie de la lámina de acero galvanizado es la misma que la temperatura inicial del proceso o temperatura ambiental, debido a que el proceso comienza a partir de las condiciones de equilibrio iniciales.

$$T_{agi} = T_i = 36 \text{ } ^\circ\text{C} = 309 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (93)$$



Substituyendo el valor de la ecuación (93) en la ecuación (92), se obtiene:

$$T_{agfa} = \sqrt[4]{\frac{E}{\varepsilon * \sigma} + (309 \text{ } ^\circ K)^4} \quad (94)$$

La Ley de Kirchhoff de la radiación térmica establece que si un cuerpo (o superficie) está en equilibrio termodinámico con su entorno, su emisividad es igual a su absorptividad (Weisstein, © 1996-2007). Por lo tanto, la lámina de acero galvanizado, en condiciones adiabáticas e ideales, puede llegar a una temperatura T_{gaf} , que se calcula con la ecuación (94) y con los valores señalados de la irradiancia solar térmica de la Tabla 8 y de la absorptividad del acero galvanizado.

$$T_{agfa} = \sqrt[4]{\frac{341,18 \frac{W}{m^2}}{0,64 * 5,67051 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * ^\circ K^4}} + (309 \text{ } ^\circ K)^4}$$
$$T_{agfa} = 368,9 \text{ } ^\circ K = 95,9 \text{ } ^\circ \quad (95)$$

Al obtener este valor de temperatura, mayor que la temperatura final del cacao en grano seco en las condiciones de equilibrio a la salida del equipo, se sabe con certeza que el colector solar térmico propuesto está en la capacidad de proporcionar la energía necesaria para que se lleve a cabo el proceso de secado del cacao en grano.

9.10 Balance de energía del colector de energía solar térmica

La placa que, compone el colector de energía solar térmica, debe estar correctamente aislada para minimizar las pérdidas de transferencia de calor por conducción y que su temperatura no varíe significativamente de la máxima posible adiabáticas ideales. Se tiene que la placa transmitirá su calor al aire por convección natural en flujo laminar; el aire a temperatura ambiente se calentará hasta la temperatura del aire para el secado, llegando al equilibrio termodinámico con la placa del colector solar térmico.



El balance de energía para un colector de energía solar térmica, que intercambia calor por convección con el aire a sus alrededores en estado estacionario, viene dado por la siguiente expresión (Nellis & Klein, 2009):

$$h_c * (T_{agf} - T_i) = \alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{agf}^4 - T_i^4)$$

$$h_c = \frac{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{agf}^4 - T_i^4)}{(T_{agf} - T_i)}$$

(96)

En donde:

T_{gaf} : Temperatura absoluta final de la superficie de la lámina de acero galvanizado.

E : Irradiación solar térmica.

ε : Emisividad del acero galvanizado.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann.

T_i : Temperatura absoluta inicial de la superficie de la lámina de acero galvanizado.

h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

En las condiciones de equilibrio entre el aire y la placa del colector solar térmico, la temperatura final de la placa es la temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado. Por lo tanto:

$$T_{gaf} = T_{ai} \quad (97)$$

Reemplazando la ecuación (97) en la ecuación (96), se tiene:

$$h_c = \frac{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{ai}^4 - T_i^4)}{(T_{ai} - T_i)} \quad (98)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección, para flujo laminar, simplificado para el aire viene dado por la siguiente expresión (Moss, 2007):

$$h_c = 1,4 \left(\frac{T_{gafa} - T_i}{D} \right)^{0,25} \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] \quad (99)$$

En donde:

D : Longitud característica de la placa.

La longitud característica de la superficie de la placa que comprende el colector de energía solar térmica, viene dado por la siguiente expresión:

$$D = \frac{a + l}{2} \quad (100)$$

En donde:

l : Longitud de la placa de acero galvanizado del colector solar térmico.

Se igualan las ecuaciones (98) y (99) y se obtiene:

$$1,4 \left(\frac{T_{gafa} - T_i}{D} \right)^{0,25} * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] = \frac{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{ai}^4 - T_i^4)}{(T_{ai} - T_i)} \quad (101)$$

Se reemplaza la ecuación (100) en la ecuación (101) y se obtiene:

$$1,4 \left(\frac{T_{gafa} - T_i}{\left(\frac{a + l}{2} \right)} \right)^{0,25} * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] = \frac{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{ai}^4 - T_i^4)}{(T_{ai} - T_i)}$$
$$1,4 \frac{(T_{gafa} - T_i)^{0,25}}{\left(\frac{a + l}{2} \right)^{0,25}} * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] = \frac{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{ai}^4 - T_i^4)}{(T_{ai} - T_i)}$$

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{a+l}{2}\right)^{0,25} &= 1,4 \frac{(T_{gafa} - T_i)^{0,25}}{\frac{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{ai}^4 - T_i^4)}{(T_{ai} - T_i)}} * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right] \\
 \frac{a+l}{2} &= \left\{ 1,4 \frac{(T_{gafa} - T_i)^{0,25}}{\frac{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{ai}^4 - T_i^4)}{(T_{ai} - T_i)}} * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right] \right\}^4 \\
 a+l &= 2 \left\{ 1,4 \frac{(T_{gafa} - T_i)^{0,25}}{\frac{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{ai}^4 - T_i^4)}{(T_{ai} - T_i)}} * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right] \right\}^4 \\
 l &= 2 \left\{ 1,4 \frac{(T_{gafa} - T_i)^{0,25}}{\frac{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{ai}^4 - T_i^4)}{(T_{ai} - T_i)}} * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right] \right\}^4 - a \\
 l &= 2 \left\{ \frac{1,4 * (T_{gafa} - T_i)^{0,25} * (T_{ai} - T_i) * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right]}{\alpha * E - \varepsilon * \sigma * (T_{ai}^4 - T_i^4)} \right\}^4 - a
 \end{aligned}$$

(102)

Se reemplazan los datos correspondientes y se tiene:

$$\begin{aligned}
 l &= 2 \left\{ \frac{1,4 * (368^\circ K - 309^\circ K)^{0,25} * (T_{ai} - 309^\circ K) \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right]}{0,64 * 341,18 \frac{W}{m^2} - 0,23 * 5,67051 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * ^\circ K^4} * [T_{ai}^4 - (309^\circ K)^4]} \right\}^4 \\
 &\quad - 1,871022 \text{ m} \\
 l &= 2 \left\{ \frac{3,880083203 * (T_{ai} - 309^\circ K)}{218,355 - 1,3042173 * 10^{-8} * [T_{ai}^4 - (309^\circ K)^4]} \right\}^4 * m - 1,871022 \text{ m}
 \end{aligned}$$

(103)

La solución de la ecuación (103) se presenta a continuación para diferentes valores de temperatura del aire, al ingreso a la cámara de secado:



Temperatura inicial del aire para el secado		Longitud de placa del colector solar térmico
61 °C	334 °K	-1,682 m
62 °C	335 °K	-1,640 m
63 °C	336 °K	-1,589 m
64 °C	337 °K	-1,530 m
65 °C	338 °K	-1,459 m
66 °C	339 °K	-1,376 m
67 °C	340 °K	-1,278 m
68 °C	341 °K	-1,162 m
69 °C	342 °K	-1,026 m
70 °C	343 °K	-0,867 m
71 °C	344 °K	-0,681 m
72 °C	345 °K	-0,463 m
73 °C	346 °K	-0,208 m
74 °C	347 °K	0,090 m
75 °C	348 °K	0,438 m
76 °C	349 °K	0,845 m
77 °C	350 °K	1,320 m
78 °C	351 °K	1,876 m
79 °C	352 °K	2,525 m
80 °C	353 °K	3,283 m

Tabla 9. Longitud de la placa del colector solar térmico, en función de la temperatura del aire, al ingreso a la cámara de secado. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente propia.

Como se puede observar en la Tabla 9, al incrementar la temperatura de ingreso del aire a la cámara de secado, se debe incrementar la longitud de la placa de acero galvanizado del colector solar térmico. Los valores negativos de esta longitud nos indican que la temperatura respectiva no es factible, debido a las propiedades del material. La longitud de la placa deberá seleccionarse según criterios prácticos de construcción; no conviene invertir dinero en una mayor área de material, si solamente se conseguirá elevar 1°C de temperatura. Se elegirá un valor de 76°C o 77°C.

Se selecciona una temperatura inicial del aire para el secado de 77°C.



9.11 Cálculo de la velocidad del aire para el secado del cacao en grano

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre el interior de la cámara de secado y la salida del aire de la cámara de secado al ambiente:

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma_1} = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma_2} + h_f$$

$$\frac{u_2^2}{2g} = z_1 - z_2 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma_2} - \frac{P_2}{\gamma_1} - h_f$$

$$u_2 = \sqrt{2g * \left[(z_1 - z_2) + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma_2} - \frac{P_2}{\gamma_1} - h_f \right]}$$

$$u_2 = \sqrt{2g * \left[(z_1 - z_2) + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{\Delta P}{\gamma_{ml}} - h_f \right]}$$

(104)

En donde:

u_i : Velocidad del aire.

g : Aceleración de la gravedad.

z_i : Altura respecto al nivel de referencia.

P_i : Presión en el punto

ΔP : Diferencial de presión.

γ_{ml} : Peso específico medio logarítmico (valor numérico igual a la densidad media logarítmica).

h_f : Pérdidas de carga totales.



9.11.1 Cálculo del diferencial de presión del aire

A la salida del aire para el secado se tiene un tiro natural, creado por la diferencia de densidades del aire luego del proceso de secado y el aire del ambiente. El diferencial de presión viene dado por:

$$\Delta P = (\rho_i - \rho_{sf}) * g * c \quad (105)$$

En donde:

ρ_{sf} : Densidad del aire luego del proceso de secado.

ρ_{si} : Densidad del aire del ambiente.

Las densidades del aire, en función de su temperatura y saturación de humedad, necesarias para resolver la ecuación (105), se obtendrán de las tablas de propiedades físicas de la materia, del manual del ingeniero químico de Perry (Perry & Green, 2008).

$$\Delta P = \left(1,096270 \frac{kg}{m^3} - 1,081081 \frac{kg}{m^3}\right) * 9,81 \frac{m}{s^2} * 2,071m$$

$$\Delta P = 0,293776 Pa$$

$$\Delta P = 0,293776 Pa * \frac{9,81kg_f}{1N}$$

$$\Delta P = 2,882 \frac{kg_f}{m^2} \quad (106)$$

9.11.2 Cálculo del peso específico medio logarítmico del aire

$$\gamma_{ml} = \frac{(\rho_{sf} - \rho_i)}{\ln\left(\frac{\rho_{sf}}{\rho_i}\right)}$$

$$\gamma_{ml} = \frac{(1,096270 - 1,081081) kg_f}{\ln\left(\frac{1,096270}{1,081081}\right) m^3}$$

$$\gamma_{ml} = 1,088658 \frac{kg_f}{m^3} \quad (107)$$



Se tienen las máximas pérdidas de carga por ensanchamiento brusco a la entrada de la cámara de secado y estrechamiento brusco a la salida de la misma. Las pérdidas de carga por rozamiento se desprecian porque el recorrido del aire a través del equipo es pequeño. Entonces la ecuación (107) queda de la siguiente forma:

$$u_2 = \sqrt{2g * \left[(z_1 - z_2) + \frac{\Delta P}{\gamma_{ml}} - k_1 \frac{u_2^2}{2g} - k_2 \frac{u_2^2}{2g} \right]}$$
$$u_2 = \sqrt{2g * \left[(z_1 - z_2) + \frac{\Delta P}{\gamma_{ml}} - (k_1 + k_2) \frac{u_2^2}{2g} \right]}$$

(108)

La diferencia entre las alturas respecto al nivel de referencia es igual a la altura de la cámara de secado. La presión es la atmosférica para ambos casos y la densidad corresponde a la saturación y temperatura iniciales y en equilibrio del aire para el proceso de secado. Reemplazando las ecuaciones (106) y (107) en la ecuación (108) y los demás datos obtenidos del manual del ingeniero químico de Perry (Perry & Green, 2008); se tiene:

$$u_2 = \sqrt{2 * 9,81 \frac{m}{s^2} * \left[(-2,071) + \frac{2,882 \frac{kg_f}{m^2}}{1,088658 \frac{kg_f}{m^3}} - (0,44 + 0,46) \frac{u_2^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right]}$$
$$u_2 = \sqrt{2 * 9,81 \frac{m}{s^2} * \left[(-2,071) + \frac{2,882 \frac{kg_f}{m^2}}{1,088658 \frac{kg_f}{m^3}} - (0,44 + 0,46) \frac{u_2^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right]}$$
$$u_2 = \sqrt{19,62 \frac{m}{s^2} * \left(+0,575296m - 0,9 \frac{u_2^2}{19,62 \frac{m}{s^2}} \right)}$$



$$u_2 = \sqrt{\left(11,306928 \frac{m^2}{s^2} * -0,9 * u_2^2\right)}$$

(109)

La ecuación (109) se puede resolver por tanteo; en este caso se resuelve utilizando la herramienta *SOLVER* de *Microsoft EXCEL* (Microsoft Corporation, 2013).

$$u_2 = 2,439 \frac{m}{s} \quad (110)$$

9.12 Cálculo de la velocidad de secado del cacao en grano

La transferencia de masa de humedad, desde el cacao en grano hacia el aire, viene determinada por la velocidad de secado del cacao en grano. El investigador Nicholas Musa ha determinado experimentalmente las velocidades promedio de secado del cacao en grano hasta reducir totalmente la humedad de muestras de 2,2kg con el 81,2% de humedad en base seca, a diferentes temperaturas de salida del aire, los datos se muestran en la siguiente tabla (Musa, 2012):

Velocidad del aire	Temperatura del aire para el secado		
	60 °C	75 °C	85 °C
1,8 m/s	0,186 kg/h	0,218 kg/h	0,335 kg/h
2,7 m/s	0,218 kg/h	0,242 kg/h	0,351 kg/h
3,8 m/s	0,217 kg/h	0,283 kg/h	0,376 kg/h

Tabla 10. Velocidad de secado del cacao en grano, en función de la temperatura del aire, al ingreso a la cámara de secado. 2012. Fuente: Nicholas Musa (Musa, 2012).

La temperatura inicial del aire para el secado, seleccionada de la Tabla (9) es de 77,0°C, valor que corresponde con una temperatura de salida de 62,8 °C, considerando que la temperatura no disminuirá debido a las pérdidas de calor; por lo que se seleccionan los datos de la Tabla (10), correspondientes a 60°C.



Los datos de la Tabla 10 representan una función aproximadamente lineal, $R^2=0,9915$; valor calculado con EXCEL (Microsoft Corporation, 2013), cuya ecuación es:

$$\dot{m} - \dot{m}_1 = \frac{m_2 - m_1}{u_2 - u_1} * (u - u_1) \quad (111)$$

En donde, de acuerdo a los datos de la Tabla 10:

u_i : Velocidad del aire para el secado en m/s.

\dot{m}_i : Velocidad del secado del cacao en grano en kg/h.

Se reemplazan con los datos de la Tabla 10:

$$\dot{m} - 0,186 \frac{kg}{h} = \frac{0,217 \frac{kg}{h} - 0,186 \frac{kg}{h}}{3,8 \frac{m}{s} - 1,8 \frac{m}{s}} * \left(u - 1,8 \frac{m}{s} \right)$$

$$\dot{m} - 0,186 \frac{kg}{h} = \frac{0,031 \frac{kg}{h}}{2,0 \frac{m}{s}} * \left(u - 1,8 \frac{m}{s} \right)$$

$$\dot{m} - 0,186 \frac{kg}{h} = 0,0155 \frac{s * kg}{m * h} * \left(u - 1,8 \frac{m}{s} \right)$$

$$\dot{m} - 0,186 \frac{kg}{h} = 0,0155 \frac{s * kg}{m * h} * u - 0,0279 \frac{kg}{h}$$

$$\dot{m} = 0,0155 \frac{s * kg}{m * h} * u - 0,0279 \frac{kg}{h} + 0,186 \frac{kg}{h}$$

$$\dot{m} = 0,0155 \frac{s * kg}{m * h} * u + 0,1581 \frac{kg}{h}$$

$$(112)$$

Se reemplaza el dato de la ecuación (110) y se obtiene:

$$\dot{m} = 0,0155 \frac{s * kg}{m * h} * 2,439 \frac{m}{s} + 0,1595 \frac{kg}{h}$$



$$\dot{m} = 0,197305 \frac{kg}{h}$$

(113)

Esta es la velocidad de la pérdida de humedad del cacao en grano.

9.13 Cálculo del tiempo de secado

El tiempo de secado es igual a la masa total que se pierde durante el proceso de secado, multiplicada por su contenido de humedad en base húmeda, expresado en tanto por uno y dividido para la velocidad de secado.

$$\theta = \frac{2,2kg * X}{\dot{m}}$$

$$\theta = \frac{2,2kg * 0,56}{0,197305 \frac{kg}{h}}$$

$$\theta = \frac{2,2kg * 0,56}{0,197305 \frac{kg}{h}}$$

$$\theta = 6,244 h = 6 h, 15 min = 22479 s$$

(114)

El tiempo mínimo de secado a la velocidad y temperatura determinadas en el caso de estudio es de seis horas con quince minutos. Otros autores también han realizado experimentos similares y confirman este valor, tal como es el caso de Michael Okpara, que calcula que el secado completo ocurre en un tiempo de seis horas (Okpara, 2009).



9.14 Inclinación del colector de energía solar térmica

Para tener el máximo aprovechamiento de la energía solar térmica, según el lugar donde se colocará el equipo, el programa CENSOL 5.0 recomienda una inclinación $\beta = 14^\circ$ (Censolar ©, 2014). El estudio del colector se hace para una placa totalmente horizontal, por lo tanto, la nueva longitud del colector solar térmico, a considerar es:

$$l_\beta = \frac{l}{\cos \beta} = \frac{1,320 \text{ m}}{\cos 14^\circ}$$
$$l_\beta = 1,360 \text{ m} \quad (115)$$

9.15 Cálculo de la potencia necesaria para el colector de energía solar térmica

$$Pot_R = Pot_I \quad (116)$$

En donde:

Pot_R : Potencia requerida.

Pot_I : Potencia instalada.

La potencia requerida se puede expresar como:

$$Pot_R = \frac{q_a}{\theta} = \frac{|-q_c|}{\theta} + |-p|$$

(117)

La potencia instalada se puede expresar como:

$$Pot_I = N_{CS} * Pot$$

(118)

En donde:

N_{CS} : Número de colectores solares instalados en el equipo de secado.



Pot: Potencia de un colector solar térmico, según el caso de estudio.

Substituyendo las ecuaciones (117) y (118) en la ecuación (116), se obtiene:

$$N_{CS} * Pot = \frac{|-q_c|}{\theta} + |-p| \quad (119)$$

La potencia de un colector solar térmico viene dada por:

$$Pot = h_c * A_p * (T_{ai} - T_i) \quad (120)$$

En donde:

A_p: Área de la placa del colector de energía solar térmica.

$$A_p = a * l$$

$$A_p = 1,871 \text{ m} * 1,360 \text{ m}$$

$$A_p = 2,545 \text{ m}^2 \quad (121)$$

El coeficiente de transferencia de calor se calcula con las ecuaciones (99) y (100):

$$h_c = 1,4 \left(\frac{T_{gafa} - T_i}{\left(\frac{a+l}{2}\right)} \right)^{0,25} * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]$$

$$h_c = 1,4 \left[\frac{368^\circ K - 309^\circ K}{\left(\frac{1,871 \text{ m} + 1,360 \text{ m}}{2}\right)} \right]^{0,25} * \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]$$

$$h_c = 3,442 \frac{W}{m^2 * ^\circ K}$$

$$(122)$$



Se reemplazan las ecuaciones (121) y (122), junto con los datos de temperaturas del proceso, en la ecuación (120) y se obtiene:

$$Pot = 3,442 \frac{W}{m^2 * ^\circ K} * 2,545 m^2 * (350 ^\circ K - 309 ^\circ K)$$
$$Pot = 359,156 W \quad (123)$$

Se reemplaza la ecuación (123) en la ecuación (119) y se obtiene:

$$N_{CS} * 359,156 W = \frac{|-q_c|}{\theta} + |-p|$$
$$(124)$$

Se reemplazan las ecuaciones (88), (114) y la temperatura de estudio en la ecuación (124) y se obtiene:

$$N_{CS} * 359,156 W = \frac{\left| - \left(-260,304 \frac{kJ}{^\circ C} * 62,8^\circ C - 23540,723 kJ \right) \frac{1000J}{1kJ} \right|}{22479 s} + |-p|$$
$$(125)$$

$$N_{CS} * 359,156 W = \frac{|39887814,2 J|}{22479 s} + |-p|$$

$$N_{CS} * 359,156 W = 1774,448 W + |-p| \quad (126)$$

9.16 Cálculo de las pérdidas de calor en el equipo

Se tienen pérdidas de calor por conducción en el colector solar térmico y en la cámara de secado.

$$-p = -p_a - p_b \quad (127)$$

En donde:

p_a : Pérdidas de calor en el colector de energía solar térmica.

p_b : Pérdidas de calor en la cámara de secado.



Como se describió en el tema 7.2 de este mismo capítulo, el material a utilizarse para la cubierta del colector solar térmico y la cámara de secado es polimetacrilato de metilo (PMMA) de 2mm de espesor; el cual tiene alta translucidez, su transmisividad permite pasar prácticamente el 100% del espectro de radiación solar térmico. Y su conductividad es baja (Brydson, 1999):

$$k_{PMMA} = 0,00018 \frac{W}{m * ^\circ C}$$

9.16.1 Cálculo de las pérdidas de calor en colector de energía solar térmica

Se tomará en cuenta que se coloca una cubierta de plástico de espesor e_w a una cierta distancia entre la placa de acero galvanizado. El aire para el proceso de secado circulará entre la placa y la cubierta. El área de la cubierta de plástico es igual al área de la placa de acero galvanizado.

$$A_{CS} = 2,5450 m^2 \quad (128)$$

En donde:

A_{CS} : Área de la cubierta plástica de la superficie del colector solar térmico.

Aplicando la ecuación de la Ley de Fourier (Nellis & Klein, 2009):

$$p_a = N_{CS} * \frac{A_{CS} * k * (T_{sf} - T_i)}{e_w} \quad (129)$$

En donde:

k : Conductividad térmica del plástico que cubre la cámara de secado.

e_w : Espesor del plástico que cubre la cámara de secado.



Se reemplazan los datos y se tiene:

$$p_a = N_{CS} \frac{2,545 \text{ m}^2 * 0,00018 \frac{W}{m * ^\circ C} * (77^\circ C - 36^\circ C)}{0,002m}$$
$$p_a = N_{CS} * 9,391 W \quad (130)$$

9.16.2 Cálculo de las pérdidas de calor en la cámara de secado

Se tomará en cuenta que se coloca una cubierta de plástico de espesor e_w a una distancia de 5cm de las paredes de la cámara interna de secado:

$$A_0 = 2 * a_0^2 + 4 * a_0 * c_0 \quad (131)$$

En donde:

A_0 : Área externa de la cámara de secado.

a_0 : Longitud exterior de la cámara de secado.

c_0 : Altura exterior de la cámara de secado.

La longitud exterior de la cámara de secado y su altura, vienen dadas por:

$$a_0 = a + 0,10m + 2 * e_w \cong 1,871022 \text{ m} + 0,10m$$

$$a_0 \cong 1,971m$$

$$c_0 = c + 0,1m + 2 * e_w \cong 2,171 \text{ m}$$

$$c_0 \cong 2,171 \text{ m}$$

Reemplazando estos datos en la ecuación (131), se obtiene:

$$A_0 = 2 * (1,971m)^2 + 4 * 1,971m * 2,171 \text{ m}$$

$$A_0 = 24,886m^2 \quad (132)$$



Aplicando la ecuación de la Ley de Fourier (Nellis & Klein, 2009) y reemplazando los datos:

$$p_b = \frac{A_0 * k * (T_{sf} - T_i)}{e_w}$$
$$p_b = \frac{24,886m^2 * 0,00018 \frac{W}{m * ^\circ C} * (76^\circ C - 36^\circ C)}{0,002m}$$
$$p_b = 89,59 W \quad (133)$$

Reemplazando las ecuaciones (130) y (133) en la ecuación (127), se tiene:

$$-p = -N_{CS} * 9,391 W - 89,59 W$$
$$(134)$$

La ecuación (134) se reemplaza en la ecuación (126) y se tiene:

$$N_{CS} * 359,156 W = 1774,448 W + |N_{CS} * 9,391 W + 89,59 W|$$
$$N_{CS} * 359,156 W - N_{CS} * 9,391 W = 1774,448 W + 89,59 W$$
$$N_{CS} * (359,156 W - 9,391 W) = 1774,448 W + 89,59 W$$
$$N_{CS} = \frac{1774,448 W + 89,59 W}{(359,156 W - 9,391 W)}$$
$$N_{CS} = 5,330 \quad (135)$$

No se pueden colocar más de cuatro colectores solares térmicos, que corresponden a las cuatro paredes laterales de la cámara de secado; por lo tanto, la potencia instalada será menor que la requerida y consecuentemente el tiempo de secado será mayor. El tiempo de secado con cuatro paneles solares térmicos se calcula a partir de la ecuación (124):

$$N_{CS} * 359,156 W + p = \frac{|-q_c|}{\theta}$$
$$\theta = \frac{|-q_c|}{N_{CS} * 359,156 W + p}$$
$$(136)$$



Reemplazando la ecuación (88), la ecuación (134), el número máximo de colectores solares térmicos y la temperatura de estudio en la ecuación (136), se tiene:

$$\theta = \frac{\left| 260,304 \frac{kJ}{^{\circ}C} * 62,8^{\circ}C + 23540,723 kJ \right| * \frac{1000J}{1kJ}}{4 * 359,156 W + 4 * 9,391 W + 89,59 W}$$

$$\theta = \frac{39887814,2 J}{1563,778 W}$$

$$\theta = 25507,34 s = 7h, 5min$$

(137)

9.17 Cálculo del área de ingreso del aire en la cámara de secado

$$\dot{A} = u * a_A \quad (138)$$

En donde:

\dot{A} : Caudal volumétrico del aire.

a_A : Área de ingreso del aire a la cámara de secado.

El área de ingreso del aire a la cámara de secado es:

$$a_A = N_{CS} * a * c_i \quad (139)$$

En donde:

c_i : Altura de la entrada del aire a la cámara de secado.

Reemplazando la ecuación (139) en la ecuación (138), se tiene:

$$\dot{A} = u * N_{CS} * a * c_i \quad (140)$$



El caudal volumétrico del aire se obtiene al dividir la masa total del aire para la densidad del aire al inicio del secado y para el tiempo de secado:

$$\dot{A} = \frac{A}{\rho_{Si} * \theta} \quad (141)$$

Se reemplaza la ecuación (69) en la ecuación (141) y se obtiene:

$$\dot{A} = \frac{218,556 \text{ kg} * (Y^* - 0,039)^{-1}}{\theta} \quad (142)$$

Se reemplaza la ecuación (137), la humedad en equilibrio de la Tabla 5, el valor de la densidad del aire al inicio del secado y se obtiene:

$$\dot{A} = \frac{218,556 \text{ kg} * (0,044270 - 0,039)^{-1}}{1,049101 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 25507,34 \text{ s}}$$
$$\dot{A} = 1,550 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (143)$$

Substituyendo la ecuación (143) en la ecuación (140), se obtiene:

$$1,550 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = u * N_{CS} * a * c_i$$
$$c_i = \frac{1,550 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{u * N_{CS} * a} \quad (144)$$

Reemplazando las ecuaciones (59) y (110) y el número de colectores solares térmicos en la ecuación (144) se tiene:

$$c_i = \frac{1,550 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{2,439 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 4 * 1,871022 \text{ m}}$$



$$c_i = 0,085m = 8,50cm \quad (145)$$

Se tienen cuatro entradas de aire en la parte inferior de y cuatro salidas de aire en la parte superior de la cámara de secado, cada una con una altura de 8,5 cm.

9.18 Aislamientos térmicos de los colectores de energía solar térmica

Para evitar pérdidas de calor por conducción en las placas de acero galvanizado, se colocarán láminas de poliestireno por debajo de éstas. Este material es asequible y barato, además resiste hasta 105°C y tiene la conductividad térmica más baja de todos los termoplásticos (BIRON, 1998).

9.19 Diagramas del equipo de secado

Las dimensiones, calculadas en este capítulo, del equipo de secado, se muestran, a continuación en los siguientes diagramas.



9.19.1 Vista del interior del equipo de secado

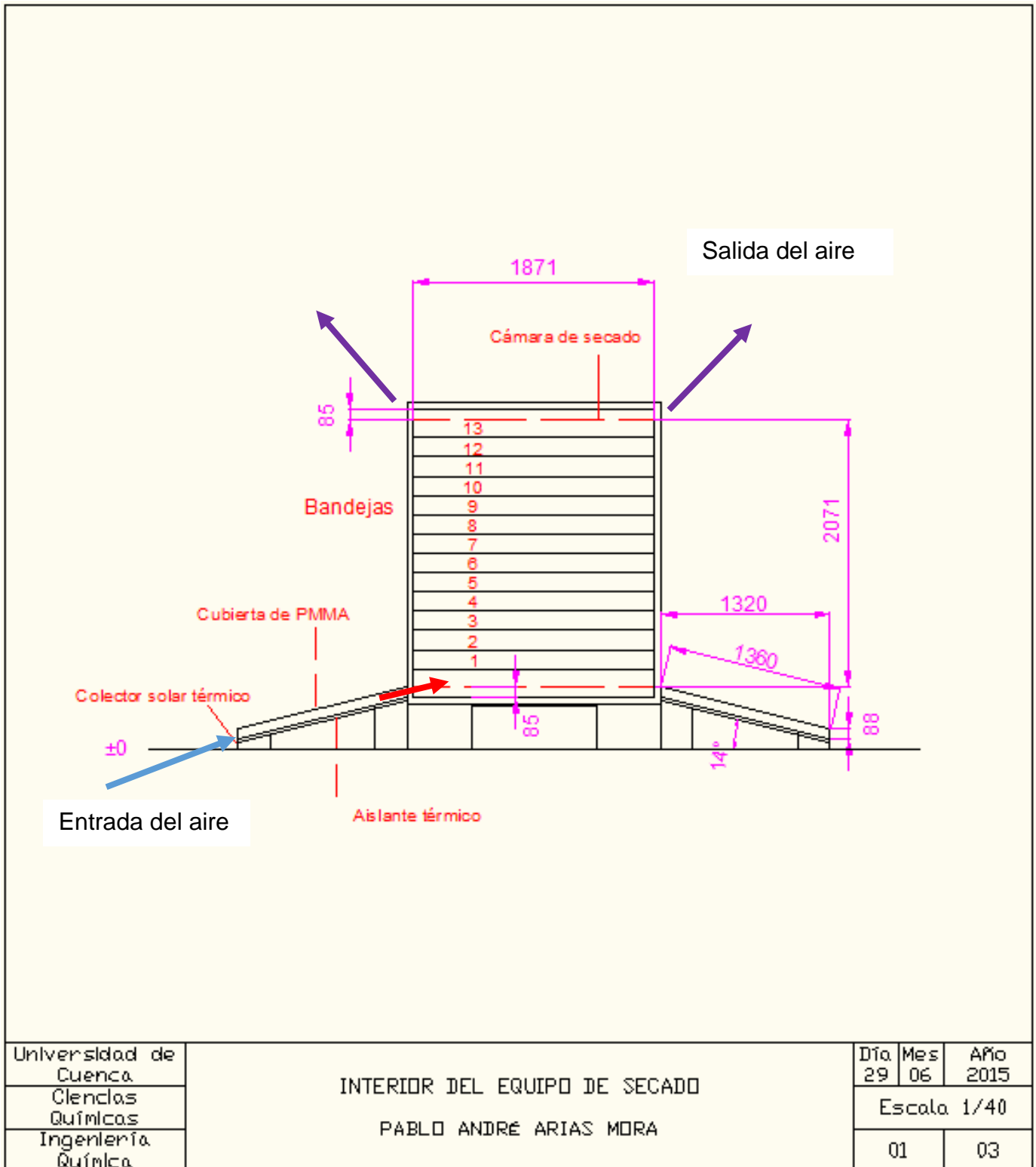


Figura 14. Vista del interior del equipo de secado del cacao en grano. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente propia.



Se tienen cuatro paneles colares térmicos de 1,360 m de largo, 1,871 m de ancho y 14° de inclinación con respecto al nivel de la superficie del suelo. La cubierta de *PMMA* se coloca a una distancia de 8,5 cm de la superficie del colector de energía solar térmico (placa de acero galvanizado) y a continuación de los paneles; con el objetivo de permitir cuatro entradas de aire para el secado, a una altura de 8,5 cm y 1,871 m de largo; respectivamente, a cada lado de la cámara de secado. Se considerará que la inclinación de 14° del panel solar térmico, formará una altura de 8,8 cm para la entrada de aire para el secado.

Además se tienen cuatro salidas de aire de una altura de 8,5 cm y 1,871 m de largo; respectivamente, en cada lado de la parte superior de la cámara de secado.

El equipo de secado descansará sobre soportes que mantengan una cierta altura con respecto al nivel de la superficie del suelo, suficiente como para impedir que el equipo y el suelo se encuentren en contacto directo, pero no demasiado para producir sombra; ya que la sombra se encontrará a menor temperatura y por lo tanto originará pérdidas de calor.

Desde la perspectiva superior, se visualiza, de mejor manera, la disposición de los cuatro paneles solares térmicos, instalados en el equipo de secado.

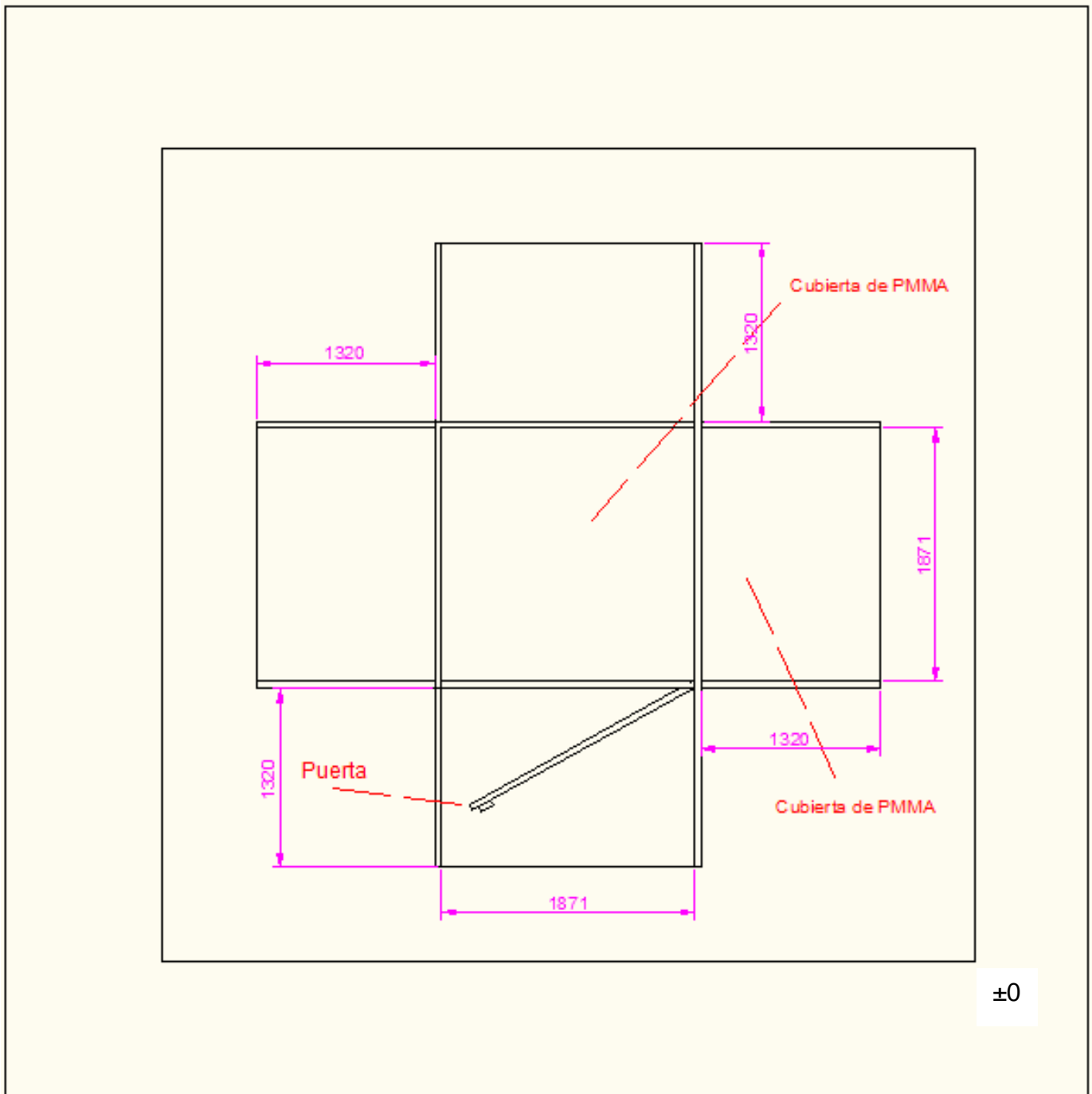
La puerta, que permite retirar y situar las bandejas de la cámara de secado, debe estar cerrada herméticamente para que no permita el intercambio de aire en el interior de la cámara de secado con el aire en el exterior de esta. Este principio es fundamental para garantizar que el tiempo de secado del producto sea el mínimo.

En las entradas y salidas de aire, se coloca una malla fina de cualquier material mecánicamente resistente, para impedir el paso de cualquier cuerpo extraño que pudiese ingresar a la cámara de secado. Esta malla debe ser lo suficientemente fina como para impedir el paso de insectos pequeños pero debe permitir libremente la circulación del aire.

Finalmente se recomienda la instalación de rieles que faciliten la manipulación de las bandejas que contendrán el cacao en grano durante el proceso de secado.



9.19.2 Vista superior del equipo de secado



Universidad de Cuenca Ciencias Químicas Ingeniería Química	VISTA SUPERIOR DEL EQUIPO DE SECADO			Día	Mes	Año
	PABLO ANDRÉ ARIAS MORA			29	06	2015
				Escala 1/40		
			02	03		

Figura 15. Vista del superior del equipo de secado del cacao en grano. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente propia.



9.19.2 Vista frontal del equipo de secado

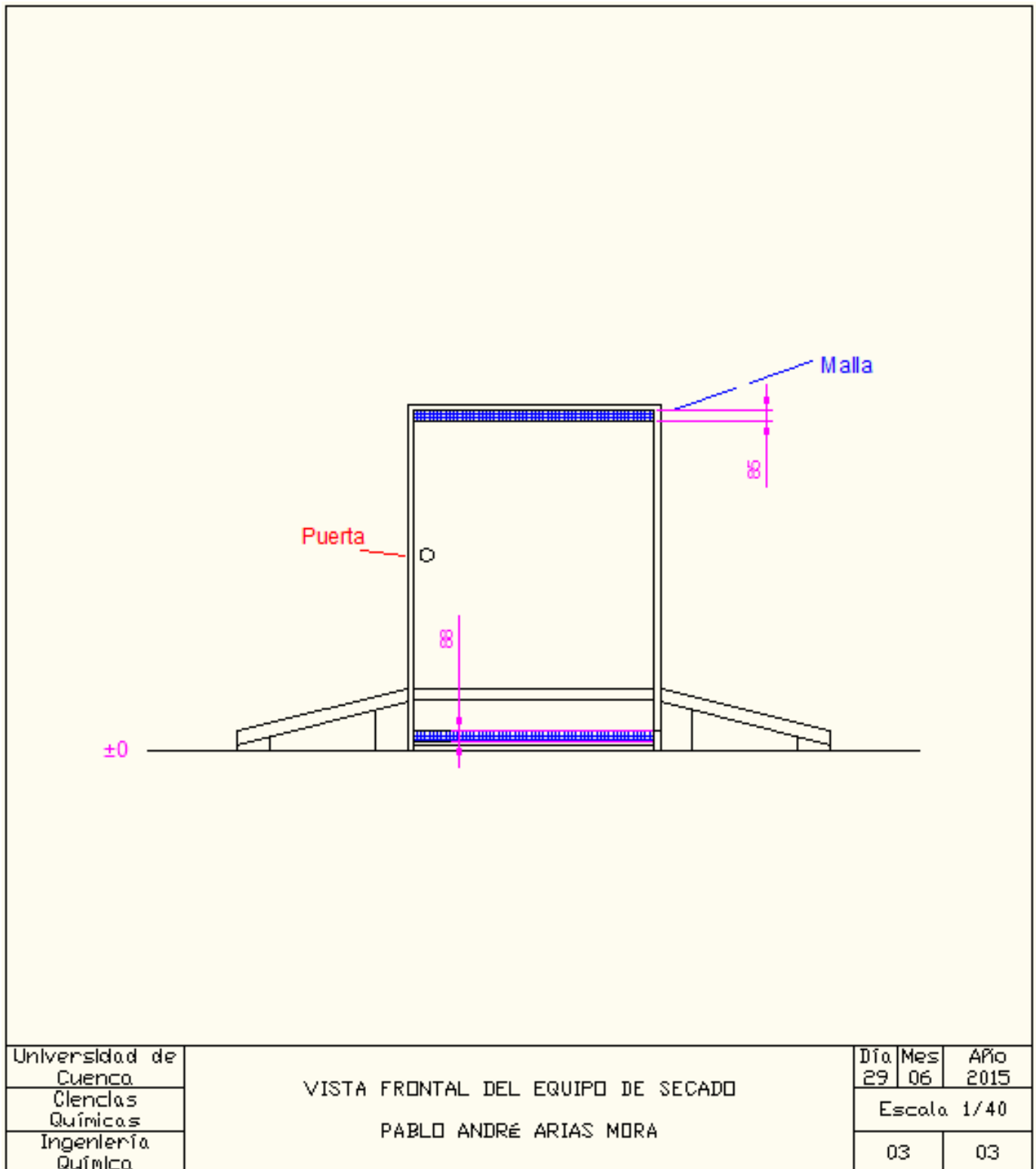


Figura 16. Vista frontal del equipo de secado del cacao en grano. Ciudad de Cuenca. 2015. Fuente propia.



Conclusiones

Dentro de este estudio se han encontrado más resultados que los objetivos planteados al inicio de la elaboración de este trabajo de tesis. Algunos resultados relevantes se han determinado y se han encontrado inesperadamente, algunos incluso serendípicamente; a continuación se describen algunos resultados relevantes encontrados y posteriormente se discute el alcance y cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente.

La fermentación del cacao en baba ayuda a la conservación del cacao en grano durante el proceso de secado, debido a que durante la fermentación se drena el contenido de humedad del cacao en baba, que, conjuntamente con la formación de diversos compuestos, disminuyen la actividad acuosa del cacao en grano; lo que a su vez impide el desarrollo de microorganismos contaminantes.

El cacao en grano beneficiado debe cumplir una serie de requisitos, expuestos en la NTE 0176 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006). Dichos requisitos son necesarios para fines de comercialización del producto.

El precio del cacao en grano beneficiado, aumenta cuando este pierde peso; es decir, cuando su masa disminuye, debido a que su contenido de humedad disminuye; a esto se le debe agregar el costo de un mayor procesamiento que se requiere para disminuir el contenido de humedad.

Se ha encontrado que el contenido de humedad del cacao en grano es mayor en la cascarilla que en los cotiledones; sin embargo, la masa de la cascarilla es pequeña en relación con la de los cotiledones, por lo que el contenido de humedad del sistema cotiledón/cascarilla, que conforma el cacao en grano seco, puede considerarse el mismo que el de los cotiledones, únicamente.

La disposición una sola capa de cacao en grano, en las bandejas, permite un proceso de secado más rápido, debido a que se tiene mayor superficie de contacto con el aire que circula en el interior de la cámara de secado.



Al incrementar la velocidad del aire para el secado, se incrementa la velocidad del secado; así mismo, al incrementar la temperatura del aire para el secado, se incrementará la velocidad del secado.

Como se dijo en el punto anterior, al aumentar la temperatura del aire aumenta la velocidad de secado del cacao en grano; sin embargo, la temperatura del procesamiento del cacao en grano debe ser la menor posible mientras este producto tenga un alto contenido de humedad, para minimizar el deterioro ocasionado por los diferentes tipos de reacciones de hidrólisis.

Se ha determinado que los contenidos de humedad del cacao en grano, del 3% y el 7%, expuestos en las NTE 0176 y 0623 respectivamente, se encuentran dentro del intervalo óptimo de estabilidad relativa del cacao en grano; por lo tanto, estos valores de contenido de humedad, en relación con su actividad acuosa y explicados mediante la teoría de transición vítrea, permitirán la óptima conservación del cacao en grano seco.

Encontrar el máximo volumen de la cámara de secado en la mínima área de la cubierta de la misma, es importante no solo para optimizar el uso de materiales de construcción y reducir costos, sino también para reducir las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes de la cámara de secado.

En base a investigación bibliográfica, se ha encontrado que el acero galvanizado es un material idóneo para la fabricación de colectores para paneles solares térmicos, en nuestro medio; debido a su resistencia general, su precio módico y su asequibilidad; pero principalmente, debido a su alta selectividad térmica; parámetro que se obtiene al dividir su alta absorptividad por su baja emisividad del espectro infrarrojo, producido por la radiación solar y que contiene las ondas de calor.

Se tienen varias alternativas en cuanto al diseño colector de energía solar térmica para el equipo de secado, de acuerdo a los distintos parámetros que intervienen en el diseño del mismo. Como se puede observar en las soluciones de la ecuación (98) en la Tabla 9, un incremento de la longitud de las placas del colector solar térmico permite incrementar la temperatura de ingreso del aire a la cámara de secado, también supone una mayor potencia y por lo tanto un menor tiempo de



secado; sin embargo, este aumento de temperatura se vuelve irrelevante cuando se empieza a necesitar grandes longitudes de la placa para crear un pequeño aumento de temperatura. Queda a criterio de la persona que diseña seleccionar esta longitud, puesto que la ecuación (98) no tiene puntos máximos o mínimos en su función y por lo tanto no se puede encontrar un valor máximo de temperatura aprovechable para una longitud mínima de la placa. El punto de inflexión de la función, como un valor óptimo, tampoco se puede considerar; en su lugar deben considerarse criterios prácticos de construcción, como el espacio que ocupará el equipo de secado, los costos y la factibilidad de construcción respecto a su dimensionamiento.

En base a investigación bibliográfica, se ha encontrado que el polimetilmetacrilato (*PMMA*) es un material idóneo para el revestimiento del equipo de secado, en nuestro medio; debido a su resistencia general, su precio módico y su asequibilidad; pero principalmente, debido a su baja transmisividad, la cual permite el paso de casi todo el espectro infrarrojo, producido por la radiación solar y que contiene las ondas de calor; y su baja conductividad térmica, que minimiza las pérdidas de calor por conducción y convección.

En base a investigación bibliográfica, se ha encontrado que el poliestireno (*PS*) es un material idóneo como aislante térmico de la placa del colector de energía solar térmica, en nuestro medio; debido a su resistencia general, su precio módico y su asequibilidad; pero principalmente, debido a que presenta la más baja conductividad térmica de todos los termoplásticos.

La inclinación del panel de energía solar térmica permite el máximo aprovechamiento de la radiación solar incidente; sin embargo la dirección de esta cambiará de acuerdo a la hora del día y a la época del año; los paneles solares térmicos recibirán diferentes incidencias de energía solar térmica; sin embargo, están diseñados para el mejor aprovechamiento de esta energía, según las recomendaciones del programa CENSOL 5.0 (Censolar ©, 2014)



El tiro natural, debido a la diferencia de densidades del aire en las entradas y salidas del equipo, permite la circulación del aire sin la necesidad del uso de una máquina de fluido, como un ventilador; sin embargo, la velocidad del aire puede variar del valor calculado, de acuerdo a las condiciones climáticas del entorno; dado que estas no se pueden prever, quedan fuera del control y del alcance de este estudio; no obstante, si se desea mantener constante la velocidad del aire, se puede instalar un ventilador operado por un sistema de control automático.

Se ha cumplido totalmente el objetivo principal que es el de mejorar el proceso de secado del cacao en grano en el cantón Naranjal, esto se puede evidenciar al comparar el estado actual del proceso con los contenidos planteados en este trabajo de tesis; donde, se demuestran la factibilidad y la aplicabilidad práctica, de los argumentos expuestos, mediante la producción y el análisis de la muestra de cacao en grano seco, obtenida mediante el proceso de secado en un equipo piloto y de acuerdo con los argumentos expuestos. Lo único que queda es implementar este estudio en la producción de cacao en grano beneficiado en el cantón Naranjal.

El objetivo específico de realizar un estudio económico-técnico para determinar el punto óptimo de secado del cacao en grano, en base a su actividad acuosa, se determinó más allá de lo previsto, ya que la conservación del cacao en grano se explicó en base a diversas teorías y demostraciones experimentales actuales, de varios investigadores; y se estableció en base a la conservación de sus propiedades y la obstaculización de las reacciones de deterioro que pueden tener lugar.

El objetivo específico de establecer una relación entre el precio del producto y su contenido de humedad se determinó mediante balances de materia y balances económicos; además se incluyeron los requisitos que debe tener el cacao en grano seco para fines de comercialización y para clasificar como cacao beneficiado, de acuerdo a la NTE 0176 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2006). Además se incluyeron diversos aspectos relevantes que no se consideran dentro de la norma, como la conservación de las propiedades del cacao en grano seco.



El objetivo específico de diseñar un equipo de secado, para el caso específico de estudio se cumplió, su construcción está fuera de los objetivos y el alcance de este estudio, pero se busca llevar a cabo. Para el diseño se incluyeron todos los contenidos anteriores de este trabajo de tesis y las soluciones y mejoras planteadas como objetivo específico están implícitas en todo este estudio, ya que cada una sirve como argumento que respalda el avance y culminación de este trabajo. Al cumplir con todo esto se obtienen el cacao en grano beneficiado, materia prima para la elaboración del chocolate o para fines de comercialización. Se puede concluir, finalmente, que se han diseñado y establecido mejoras en el proceso de producción del cacao en grano beneficiado.

Recomendaciones

A partir del estudio realizado en esta tesis; se pueden realizar varias otras investigaciones de temas, tales como: el proceso de fermentación del cacao en baba, aprovechamiento del jarabe de la pulpa que cubre los granos de cacao en baba, isotermas de sorción del cacao en grano fermentado, cinética del secado del cacao en grano fermentado, estado de transición vítrea del cacao en grano, relación de la temperatura de transición vítrea con la humedad de monocapa del cacao en grano, relación de la temperatura de transición vítrea con la actividad acuosa del cacao en grano, automatización del proceso de secado del cacao en grano, diseños alternativos de equipos de secado, etc.



Bibliografía

- BIRON, M. (1998). *Propriétés des thermoplastiques*. Francia. Recuperado el 16 de 06 de 2015, de <http://www.techniques-ingenieur.fr/>
- Bray, J. (14 de 01 de 2015). *On the cocoa trail*. Obtenido de On the cocoa trail: <http://www.onthecocoatrail.com>
- Briones García, C., Proaño, J., & Medina, K. (2011). *Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo*. Obtenido de http://elguabo.gob.ec/files/public/03_sistema_ambiental.pdf
- Brydson, J. A. (1999). *Plastics Materials - 7th - Edition*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- Censolar ©. (2014). CENSOL 5.0. Sevilla, España.
- CONELEC. (Agosto de 2008). *Atlas Solar del Ecuador con Fines de Generación Eléctrica*. Recuperado el 30 de 03 de 2015, de http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf
- Diario El Tiempo. (04 de agosto de 2013). El subsidio al gas se eliminará en el 2016. *Diario El Tiempo*. Obtenido de <http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/126692-el-subsidio-al-gas-se-eliminara-en-el-2016/>
- Gobierno Provincial del Guayas. (2015). *Naranjal*. Recuperado el 13 de 02 de 2015, de <http://www.guayas.gob.ec/cantones/naranjal>
- Hastings, D. (2009). *Commercial Dehydrator*. Obtenido de <http://dryer.com/spanish/contact.html>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (1975). NTE INEN 173. *Cacao en grano. Determinación de la humedad*. Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (1988). NTE INEN 0623. *Pasta (Masa, licor) de cacao. Requisitos*. Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (1988). NTE INEN 1676. *Productos derivados del cacao. Determinación de la Humedad o pérdida por calentamiento*. Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (1995). NTE INEN 177:95. *CACAO EN GRANO. MUESTREO*. Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2006). NTE INEN 176:2006. *CACAO EN GRANO. REQUISITOS (Norma Técnica Ecuatoriana Obligatoria)*. Quito, Ecuador.



- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (19 de Enero de 2015). *Anuario Meteorológico N° 51 (2011)*. Recuperado el 13 de 02 de 2015, de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202011.pdf>
- Labuza, T., McNally, L., Gallagher, D., Hawkes, J., & Hurtado, F. (1972). STABILITY OF INTERMEDIATE MOISTURE FOODS. 1. Lipid Oxidation. *Journal of Food Science*, 154–159. doi:10.1111/j.1365-2621.1972.tb03408.x
- Lane, D. M. (2007). *Online Statistics Education: A Multimedia Course of Study* (<http://onlinestatbook.com/>). Project Leader: Lane, David M, Rice University (chapter 2 "Graphing Distributions", section "Histograms"). Recuperado el 14 de 02 de 2015, de <http://onlinestatbook.com/>
- Microsoft Corporation. (2013). Microsoft Office Excel.
- Moss, K. J. (2007). *Heat and Mass Transfer in Buildings Second Edition*. New York, USA: Taylor & Francis Group.
- Musa, N. A. (2012). Drying Characteristics of Cocoa Beans Using an Artificial Dryer. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 7 (2), 194 - 197.
- Nellis, G., & Klein, S. (2009). *Heat Transfer*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Okpara, M. (University of Agriculture, Department of Agricultural Engineering, Umudike, de April de 2009). Effect of Drying Temperature and Drying Air Velocity on the Drying Rate. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, Manuscript 1091. Vol. XI. Obtenido de http://worldcocoafoundation.org/wp-content/files_mf/chinenye2009.pdf
- Parra Rosero, P., Saavedra, R., & Inapaqué, W. (2012). Modelación y Simulación en ambiente Ecosimpro de una cámara de secado para cacao. *INGENIUS*(8), 54-60. Recuperado el 13 de 02 de 2015, de <http://ingenius.ups.edu.ec/documents/2497096/3033837/Articulo+7.pdf>
- PEDIANOW. (2014). <http://pedianow.com>. Recuperado el 09 de 02 de 2015, de <http://pedianow.com/2014/2-7types-food-deterioration/>
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill.
- Rahman, M. S. (2009). Food stability determination by macro-micro region concept in the state diagram and by defining a critical temperature. *Journal of Food Engineering*, 403 - 406. doi: 99 402-416, 2010



- Sandulachi, E. (2012). WATER ACTIVITY CONCEPT AND ITS ROLE IN FOOD PRESERVATION. *Technical University of Moldova*, 42-43. Obtenido de http://www.utm.md/meridian/2012/MI_4_2012/8.%20Art.%20Sandulachi%200E.%20Water.pdf
- The Engineering Toolbox. (2015). *The Engineering Toolbox*. Recuperado el 05 de 04 de 2015, de <http://www.engineeringtoolbox.com/>
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia Colombia. (2010). *UNAD Lección 39. Cálculos en operaciones de secado*. Recuperado el 30 de 03 de 2015, de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211612/contLinea_eXe_/leccin_39_clculos_en_operaciones_de_secado.html
- Weisstein, E. (© 1996-2007). *Eric Weisstein's World of Science*. Recuperado el 30 de 03 de 2015, de <http://scienceworld.wolfram.com/physics/KirchhoffsLaw.html>