

Secado artificial de cacao. Estado del arte

Pablo Parra Rosero*
pparra@ups.edu.ec

Introducción

Datos socioeconómicos

Para el año 2013 la ICCO (Organización Internacional para la Comercialización del Cacao), ubica al Ecuador como el sexto productor de cacao a nivel mundial, con un volumen de 190 000 toneladas métricas. Según la misma fuente para este año la producción de cacao a nivel mundial estará distribuida en un 69,8% en África, un 16,1% en América y un 14,1% en Asia y Oceanía. Costa de Marfil es el principal productor de cacao con un volumen de 1 470 toneladas métricas (ICCO, 2013). ANECACAO (Asociación Nacional de Exportadores de Cacao de Ecuador), expone que el 5% de la producción mundial del cacao corresponde a cacao fino o de aroma, correspondiendo al Ecuador el 63% de esa producción a nivel mundial (<http://www.anecacao.com/es/cacao-nacional/>).

La mayor parte de la producción de cacao ecuatoriano que se exporta corresponde a cacao en grano, según el Banco Central del Ecuador, del total de cacao y derivados exportados el 1% corresponde a chocolate, 2% a cacao en polvo, 2% a manteca, grasa y aceites de cacao,

* Master en producción Automatizada y Robótica Industrial, Ingeniero en Electricidad, Candidato a Doctor por la Universidad de Piura, Profesor del Área de Ciencia y Tecnología de la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

4% a pasta de cacao y el 90% restante a cacao en grano (BCE, Dirección de Inteligencia Comercial e Inversiones PRO ECUADOR 2013).

Descripción de la planta de cacao

La palabra cacao proviene según Enríquez (2004) de los vocablos mayas “Kaj” y “Kab” que en castellano quieren decir amargo y jugo respectivamente. Sobre el lugar o las culturas que dieron origen a la utilización o cultivo del cacao no existe un consenso, algunas referencias bibliográficas apuntan hacia América del sur, en la zona amazónica como el lugar de origen de esta planta; lo cierto es que actualmente este producto es conocido y consumido en la mayoría de países del mundo.

El naturalista sueco Carl von Linneo dio el nombre de *Theobroma* a la planta de cacao en 1737, este género está conformado por 22 especies, de estas el *Theobroma cacao* L. es la de mayor importancia. Una especie de menor importancia producida en Brasil es la *Glandiflorum* (Moreno, 2004). El *Theobroma Cacao* L, es una planta perteneciente a la familia Malvaceae, subfamilia Byttnerioideae (Alverson et al., 1999; Sousa y Figueira, 2005).

Variedades de cacao

Se conocen tres grupos genéticos de cacao; Criollo, Forastero y Trinitario que vendría a ser una mezcla de las dos variedades anteriores. En Ecuador se cultiva tradicionalmente la variedad “Nacional” que debido a sus características genéticas y morfológicas se asemeja mucho al cacao Criollo (Enríquez, 2004). Este tipo de cacao es el denominado fino o de aroma y es el más apreciado en el mercado internacional por sus excelentes cualidades organolépticas, sin embargo se sabe que este genotipo de cacao hoy en día es muy escaso y se realizan grandes esfuerzos para evitar su desaparición.

En los últimos años en Ecuador se ha venido experimentando con combinaciones o cruzamientos de material genético nacional-forastero y nacional-trinitario, lo cual ha marcado una disminución en la calidad del producto (Enríquez, 2004).

Procesamiento del cacao

El grano de cacao requiere cumplir con una cadena de procesos muy particulares antes de convertirse en la materia prima básica para la elaboración del chocolate. Las etapas fundamentales de este proceso son: beneficiado del cacao, tostado, molido, prensado y conchado.

Beneficiado del cacao

Se conoce como beneficiado del grano de cacao a las etapas de: cosecha, fermentación, secado, limpieza, selección y almacenamiento del grano.

La cosecha consiste en la selección de mazorcas maduras, posteriormente se ejecuta la recolección, partida y desgranada de dichas mazorcas.

Las etapas de fermentación y secado son las más críticas dentro de la cadena del proceso, de ellas depende las cualidades organolépticas adquiridas por el grano.

La limpieza y selección de las almendras de cacao se ejecutan luego del secado, con la finalidad de eliminar elementos extraños o almendras dañadas. En esta etapa se clasifican los granos de acuerdo a ciertos estándares de calidad que tienen que ver con el color, tamaño y variedad o genotipo.

El almacenamiento del grano seco, limpio y clasificado, se lo realiza en sacas de yute y en pilas de no más de seis sacas de altura. Siendo el cacao un material higroscópico, se almacena el grano una vez que se ha enfriado luego del proceso de secado, en lugares libres de humedad ambiental.

Fermentación

La fermentación es una etapa imprescindible dentro de la cadena de procesamiento del grano, ya que en esta se producen fenómenos de reacción bioquímica y de oxidación que a su vez permiten la disminución del grado de amargura y de astringencia en el sabor cacao. Esta etapa es la responsable de las cualidades de aroma y sabor del

cacao, ya que durante este proceso actúan microorganismos tales como bacterias y levaduras, permitiendo que los azúcares de la pulpa formen ácidos que penetran en el cotiledón y produzcan la muerte del embrión así como la formación de precursores de las cualidades organolépticas.

Según Portillo, Graziani y Cros (2006), la fermentación involucra dos fenómenos distintos pero no independientes: la fermentación microbiana que es la que genera la eliminación de la pulpa mucilaginosa de las almendras o granos de cacao y las reacciones bioquímicas responsables de la modificación de la composición química al interior de las almendras, en los llamados cotiledones. En la fermentación existe una migración de ácido acético desde la pulpa hacia la almendra

De igual manera Rosa Pérez Piza (2009), identifica claramente dos fases dentro del proceso de fermentación. La fase anaeróbica, que se realiza sin la presencia del aire, una vez abiertas las mazorcas se contaminan con una serie de microorganismos, tales como levaduras que actúan sobre los azúcares de la pulpa o mucílago, transformándolos en alcohol etílico. Durante este proceso se desprende calor, incrementando así la temperatura del lote de grano. En la fase anaeróbica también se detecta la presencia de ácido láctico, que posteriormente se convertirá en ácido butírico. En la fase aeróbica, la presencia de aire permite que las bacterias acéticas transformen el alcohol en ácido acético (vinagre), el mismo que ingresa a los cotiledones y produce la muerte del embrión.

La fermentación es una acción combinada y balanceada de ácidos, alcoholes, humedad, pH y temperatura, conducente a la disminución del sabor amargo y la pérdida de teobromina. La fermentación facilita el proceso de secado y la separación de la testa o cáscara de los cotiledones (Ramos, 2004).

Varios factores influyen dentro del proceso de fermentación, el tipo o variedad del cacao (Braudeau, 1970); el tiempo de almacenamiento posterior a la cosecha y previo a la apertura de las mazorcas (Torres et al., 2004); la técnica de fermentación utilizada (Nogales et al.,

2006); la frecuencia de remoción del grano en fermentación y el tiempo de duración de esta etapa (Puziah et al., 1998).

Ligia Ortiz de Bertorelli et al., 2009, expone los resultados del análisis experimental realizado con distintas variedades de cacao, con y sin remoción de la masa fermentante, con y sin tiempo de almacenamiento posterior a la cosecha, para determinar las características físicas y químicas del cacao bajo diferentes condiciones de fermentado. En los resultados obtenidos puede apreciarse que efectivamente se consiguen diferentes niveles de PH, color, acidez, taninos, humedad, grasas y proteínas según la variedad y condiciones establecidas para el proceso.

Dependiendo de la variedad de cacao, podría iniciarse el proceso de fermentación inmediatamente después de la cosecha o almacenar las mazorcas durante algunos días previos al inicio de la fermentación. La remoción del grano depende de la técnica a utilizarse, puesto que podría optarse por el amontonamiento del grano o el uso de cajones perforados de madera, en donde es factible la remoción; para el caso del fermentado en sacas, la remoción del grano no es factible.

La remoción o volteo de las almendras o granos de cacao se lo realiza para homogenizar la fermentación, la ausencia de volteo genera masas de cacao mal fermentado. El volteo debe realizarse cada 24 horas en el caso de la variedad Criollo y cada 48 horas en el caso de las variedades Forastero y Trinitario (Saltos, Sánchez y Anzules, 2006).

En la Figura 1 se muestra la secuencia del proceso de beneficiado en imágenes que muestran: la mata de cacao, vaina o mazorca de cacao en el proceso de cosecha, mazorca abierta, grano extraído de la vaina, proceso de fermentación en cajas perforadas de madera, grano de cacao fermentado en su etapa final, en donde se aprecia que el mucílago ha desaparecido en su totalidad; finalmente aparecen las imágenes correspondientes al secado natural del grano por efecto de exposición directa al sol y el cacao debidamente almacenado en sacas de yute.

Figura 1
Proceso de beneficiado del cacao



Fuente: el autor

Un cacao correctamente fermentado presentará ciertas características tales como: aroma agradable, sabor ligeramente amargo, color marrón achocolatado en su cáscara o testa, la almendra toma un aspecto inflado o hinchado debido a la humedad adquirida y la cáscara puede separarse del cotiledón con relativa facilidad. Cuando las almendras no han sido correctamente fermentadas adquieren las siguientes características: sabor muy amargo o astringente, aroma desagradable, el color de la testa es blanco, las almendras se quedan aplanadas y la cáscara se encuentra muy adherida al cotiledón.

Secado

El proceso de secado del grano de cacao se lo puede realizar de forma natural o artificial. En la etapa de secado continúa el proceso de oxidación iniciado en la fermentación y se completa la formación de aquellos compuestos que determinan las cualidades organolépticas, como el aroma y el sabor del cacao. En esta etapa además se desarrolla la pigmentación de color marrón a partir de los compuestos fenólicos. (Cros y Jeanjean, 1995).

Según Enríquez (1993), el objetivo principal del proceso de secado es que el cacao termine de desarrollar el sabor a chocolate que inició durante la fermentación y las almendras adquieren el color marrón o pardo típico del cacao correctamente fermentado y secado.

Para Rincón (1999), de nada sirve que se haya realizado una buena fermentación si el secado no se hace de una forma adecuada ya que el cacao mal secado no alcanzará el aroma y sabor adecuados. Según el mismo autor, durante el secado se eliminará el exceso de humedad y de acidez de las almendras recién fermentadas desde un aproximado del 55% hasta el 7%, valor de humedad que garantiza su posterior almacenaje y comercialización.

Un exitoso proceso de secado permite alcanzar al cacao un pH óptimo de 5.1 a 5.4, cualquier muestra de almendras con un pH inferior a 5.0 revela la presencia de ácidos no volátiles, lo cual genera aromas desagradables, disminuyendo la calidad del chocolate (Armijos, 2002).

El secado debe hacerse de forma lenta y gradual (Jiménez 2000), el proceso de secado violento no permite lograr un secado homogéneo e interrumpe la hidrólisis enzimática, generando almendras de color púrpura con sabor astringente. El secado violento además produce un endurecimiento rápido de la testa o cascarilla, lo cual impide la salida o difusión de los ácidos volátiles generando almendras con sabor ácido (Ramos, 2004) (Ramos et al., 2000).

Secado natural

Se denomina secado natural del cacao al proceso de secado por exposición al sol y consiste en aprovechar el calor generado por los rayos solares para secar lenta y paulatinamente las almendras de cacao. Según Enríquez (2004), con esta técnica de secado las almendras completan satisfactoriamente los cambios bioquímicos internos, logrando buenas características organolépticas. El mismo autor expone que este tipo de secado se lo puede realizar utilizando tendales, los mismos que pueden ser contruidos de varias formas, utilizando madera, bambú, cemento u otros materiales refractarios.

En el secado natural se realizan volteos del grano con poca frecuencia durante los primeros días y con mayor frecuencia durante los últimos días de secado. Según las horas de sol y la intensidad de los rayos solares, el proceso puede durar entre 3 y 12 o hasta quince días. Realmente no existe un consenso en la bibliografía revisada sobre el tiempo que dura el secado de cacao, esto se debe a que al tratarse de un proceso empírico y además fuertemente dependiente de las condiciones climáticas ambientales, el tiempo de exposición del grano no está determinado de forma precisa. En la Figura 2 se muestran algunos sistemas de secado natural: a) Tendales de exposición directa en patios o plataformas de cemento, b) Secador en plataforma flotante con cubierta transparente, c) Secador de plataforma flotante con exposición directa y d) Secador de plataforma o de techo móvil.

Figura 2
Diferentes tipos de secadores naturales de cacao



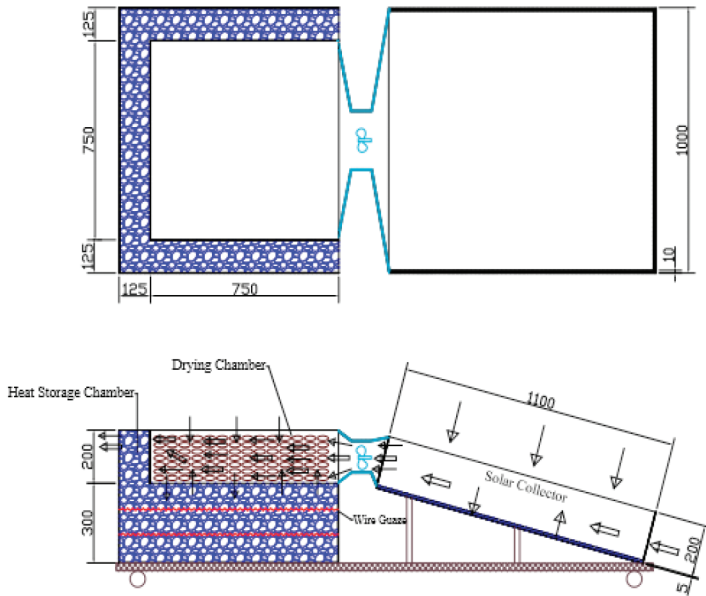
Fuente: el autor

Según Rosa Pérez Piza (2009), en el secado natural deben aprovecharse los rayos del sol durante el día esparciendo las almendras de cacao en el tendal y apilándolos durante la noche. Para lograr mejores resultados, la misma autora recomienda secar en capa gruesa durante el primer día, e ir disminuyendo el grosor de la capa de almendras durante los días siguientes.

En el año de 2009, los autores A. O. Fagunwa, O. A. Koya y M.O. Faborode presentaron su trabajo sobre el desarrollo de un secador solar intermitente para granos de cacao. El sistema cuenta con almacenamiento de energía térmica y combina los mecanismos de calentamiento por convección y por radiación.

En la Figura 3 se muestra el diagrama para el secador. La presencia de una cámara para almacenamiento de calor es la que permite que el proceso de secado continúe por la noche o en aquellos períodos de ausencia de sol, por ello el nombre de intermitente.

Figura 3
Diagrama esquemático del Secador Solar Intermitente



Fuente: A. O. Fagunwa, O. A. Koya y M.O (2009).

Secado artificial

El nivel de humedad contenido varía de un producto a otro, la sal de mesa por ejemplo tiene un 0,5 de humedad, el cacao fermentado tiene un 55% de humedad, el maíz un 20%. El secado es un término relativo, se refiere realmente a un proceso de disminución de líquido contenido en un sólido. De igual manera los productos a secar tienen formas diferentes, escamas, gránulos, cristales, polvo, etc., además poseen propiedades físico-químicas diferentes.

El líquido contenido puede estar concentrado en la superficie del sólido, en su parte interna o en ambas partes. La temperatura que puede soportar un sólido en el proceso de secado varía de un producto a otro y los cambios de temperatura también dependen de la cinética de secado de cada sólido. Estas razones argumentan el hecho que en el mercado industrial existan una gran variedad de tipos de secadores y sus diferencias radican esencialmente en la forma en que se mueven los sólidos a través de la zona de secado y en la forma en que se realiza la transferencia de calor (McCabe et al., 1998).

Dentro de la teoría de operaciones unitarias, los procesos de secado son clasificados como directos o adiabáticos e indirectos o no adiabáticos.

Los secadores adiabáticos son aquellos que exponen el sólido a un gas caliente, generalmente aire. Dentro de este tipo de secadores de pueden identificar:

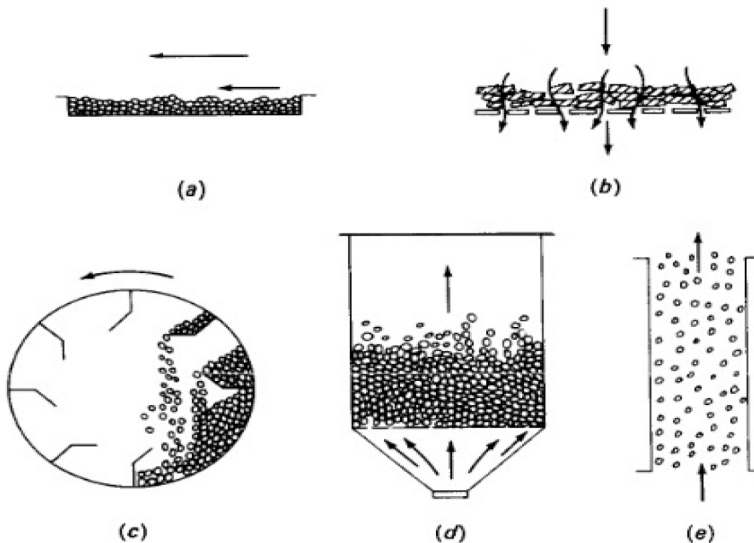
- Secadores con circulación superficial, en donde el gas circula sobre el lecho o la superficie del sólido a secar.
- Secadores con circulación a través, utilizado para el secado de sólidos granulares gruesos, colocados sobre una rejilla.
- Secadores descendentes, cuyo funcionamiento consiste en formar una lluvia de sólidos a través de un flujo de gases calientes, esto da lugar al arrastre no deseado de partículas finas.
- Secadores de lecho fluidizado, en donde el gas caliente pasa a través de los sólidos con una velocidad suficiente para fluidizar el lecho.

- Secadores de mezcla y separación, arrastrando los sólidos con un flujo de gas a altas velocidades y transportándolos neumáticamente desde un dispositivo de mezcla hacia un separador mecánico.

En la Fig. 4 se puede apreciar los distintos tipos de secadores adiabáticos. En los secadores no adiabáticos la transferencia de calor se la puede realizar de las siguientes maneras:

- Esparciendo los sólidos sobre una superficie horizontal que es calentada eléctricamente o utilizando vapor de agua o agua caliente. Puede utilizarse opcionalmente una fuente de calor radiante situada en la parte superior del sólido.
- Removiendo los sólidos sobre una superficie caliente de forma cilíndrica, utilizando para el efecto, agitadores o transportadores de tipo pala o tornillo.
- Deslizando el sólido por efecto de gravedad sobre una superficie caliente e inclinada.

Figura 4
Secadores adiabáticos

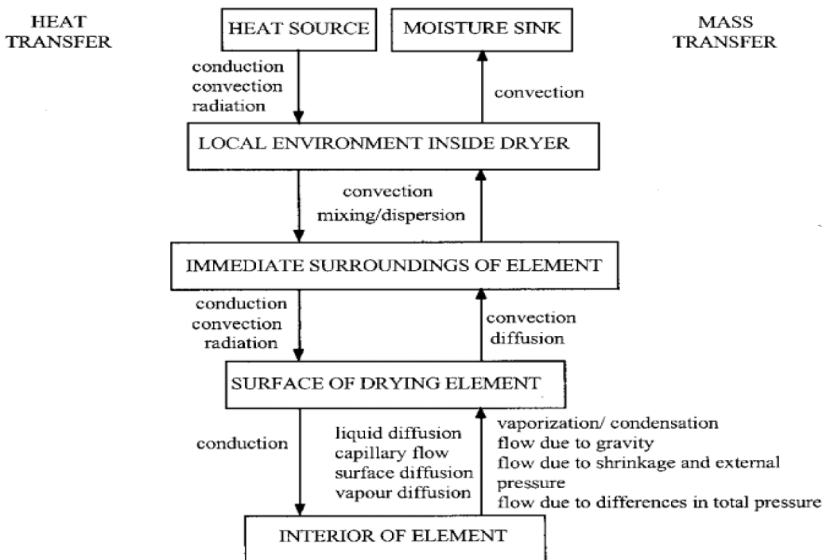


Fuente: Manual de Operaciones Unitarias, Perry

Transferencia de masa y de energía

Todos los procesos de secado tienen como función esencial la eliminación de sustancias volátiles (humedad) a partir de una mezcla para producir un producto sólido. En general, el proceso de secado implica la utilización de técnicas térmicas, consecuentemente la aplicación de calor, comúnmente por convección a partir de una corriente de aire. Durante el secado convectivo de sólidos, se producen dos procesos simultáneamente, a saber: la transferencia de energía desde el ambiente circundante; y la transferencia de humedad desde la parte interna del sólido. Por lo tanto, la operación de secado puede ser considerada como un proceso simultáneo de transferencia de calor y de masa. Por otra parte, la velocidad a la que se lleva a cabo el secado depende de magnitud relativa de los dos procesos. La Fig. 5 proporciona una representación detallada del fenómeno de transferencia de calor y de masa entre el material a secarse y el entorno que lo rodea (McMinn & Magee, 1999).

Figura 5
Descripción del fenómeno de transferencia de calor y de masa

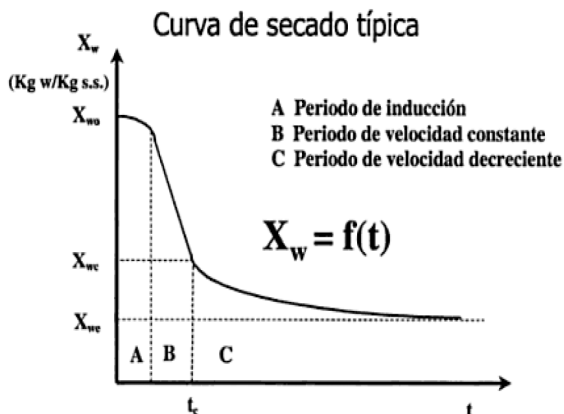


Fuente: Bruin, S. and Luyben, 1980

Curvas de secado

Pedro Fito Maupoey et al., 2001 en su obra *Introducción al secado de alimentos*, argumenta que en un experimento de secado, manteniendo constantes todas las variables del proceso de secado y obteniendo periódicamente el valor de humedad del sólido, entonces puede graficarse la variación de humedad X_w en función del tiempo, obteniéndose la curva de secado, la misma que o representa el comportamiento de la humedad en un fenómeno de secado de alimentos de forma general. En la Figura 6 se muestra la curva típica de secado. X_w , representa la humedad; t el tiempo; X_{w0} , la humedad inicial del sólido; X_{wc} , el valor de humedad crítica y X_{we} , la humedad de equilibrio.

Figura 6
Curva típica de secado



Fuente: Pedro Fito Maupoey et al., 2001

Se conoce como humedad crítica de un sólido al punto en el que la velocidad de secado deja de ser constante y empieza a ser decreciente, a estos períodos de secado se los llama antecrítico y postcrítico.

La humedad de equilibrio se refiere al valor de humedad que se alcanza cuando un sólido húmedo se pone en contacto con aire a ciertos valores temperatura y humedad constantes. Cuando la presión parcial

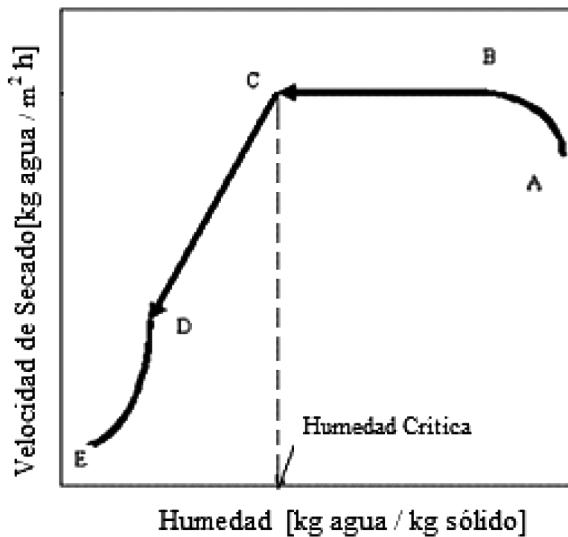
del agua contenida en el sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua contenida en el aire se alcanzan las condiciones de equilibrio.

Velocidad de Secado

La rapidez con la que disminuye el contenido de humedad de los sólidos se conoce como velocidad de secado (Pedro Fito Maupoey et al., 2001). En la Figura 7 se observa el comportamiento de la velocidad de secado.

Figura 7
Velocidad de secado

$$V_s = -d(X_w)/dt$$



Fuente: el autor

La pendiente de la curva $d(X_w)/dt$ representa el valor de la velocidad de secado. La velocidad de secado no es la misma durante todo el proceso. La eliminación de humedad se realiza en una serie de etapas en las que la velocidad de secado es diferente. A es el punto de partida del proceso. Durante el tramo AB, el sólido y el agua contenida se van

calentando lentamente, en el tramo BC se produce una gran disminución del contenido de agua, manteniéndose constante la velocidad de secado. Al alcanzar el valor de humedad crítica, punto C, se produce un cambio brusco, el proceso de extracción de humedad se vuelve lento, decreciendo la velocidad de secado en la fase CD.

Tiempo de Secado

El tiempo de secado se puede determinar considerando las dos etapas más importantes de la curva de secado. Cuando el proceso está en la zona de secado a velocidad constante V_c , entonces:

$$t_c = \frac{m_s(X_o - X_c)}{\frac{d(m_w)}{dt}} = (X_o - X_c)/V_c$$

Cuando el proceso está la fase de secado a velocidad decreciente, entonces:

$$t_d = (X_c/V_c) \ln(X_c/V_c)$$

Para las dos ecuaciones, las humedades X , están expresadas en base seca.

Tipos de secadores artificiales

En la industria de los alimentos se utilizan diferentes tipos de secadores artificiales, entre los más importantes se pueden identificar a los secadores directos y a los secadores indirectos. A continuación se expone la clasificación realizada por (P.F. Maupoey et al., 2001).

Secadores directos

Este tipo de secadores utilizan la transmisión de calor por convección, a través de corrientes de gases calientes que entran en contacto con el producto a secar y arrastran fuera del secador los flujos evaporados desde el sólido húmedo.

Los gases calientes utilizados para el secado de alimentos pueden ser:

- Aire calentado por vapor de agua
- Productos de combustión
- Gases inertes
- Vapor recalentado
- Aire calentado por radiación solar

Secadores indirectos

Este tipo de secadores aprovechan la transmisión de calor por conducción, utilizando normalmente una pared metálica para el efecto.

Las fuentes de calor pueden ser:

- Vapor condensado
- Agua caliente
- Aceites térmicos
- Gases de combustión
- Resistencia eléctrica

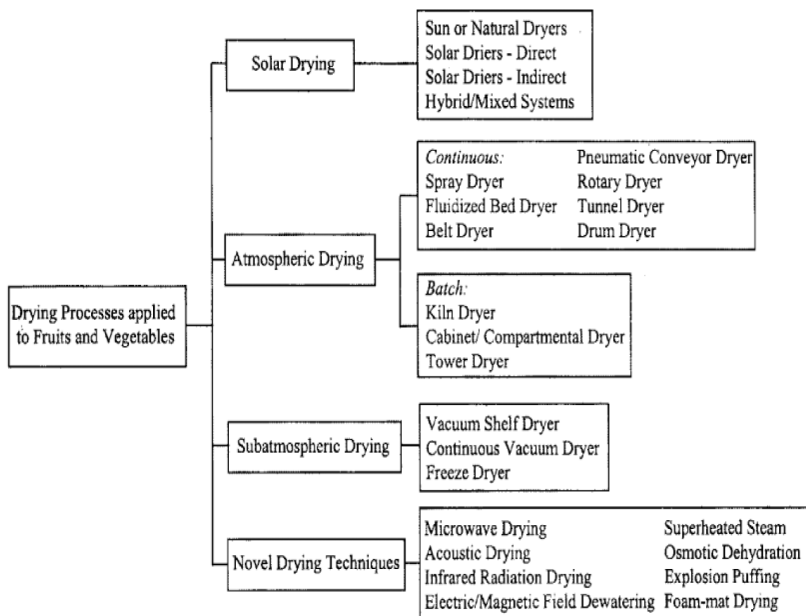
Según los mismos autores, los secadores directos e indirectos pueden trabajar en régimen continuo o intermitente. Además, los secadores indirectos permiten la recuperación del disolvente y son sistemas apropiados para el secado a bajas presiones y en atmósferas inertes, pudiendo ser utilizados para deshidratar productos termolábiles o fácilmente oxidables. Los secadores por radiación son sistemas que utilizan energía radiante para extraer la humedad del producto. La energía radiante se la obtiene eléctricamente por medio de infrarrojos o por medio de refractarios calentados con gas. El costo de la energía necesaria para su operación es considerablemente mayor que el costo del combustible utilizado por los sistemas directos o indirectos. Los secadores dieléctricos generan calor al interior del sólido a secar, utilizando un campo eléctrico de alta frecuencia, el cual produce fricción molecular que a su vez genera el calor necesario para la evaporación. Este tipo de secadores son muy poco utilizados por su alto costo de operación.

La Figura 8 presenta una clasificación para sistemas de secado de alimentos establecida en base a las condiciones físicas de calor y a la eliminación de vapor de agua. La selección de un secador apropiado para un proceso particular de secado resulta ser un problema complejo, por

lo que muchos factores tienen que ser tomados en cuenta. Sin embargo, en última instancia, la selección general y el diseño de un sistema de secado para un material en particular está sujeto a la conjugación de condiciones favorables de la calidad del producto y el costo del sistema (McMinn & Magee, 1999).

A nivel industrial se utilizan varios tipos de secadores, los rotatorios son ampliamente aplicados, algunos de ellos han sido tratados en la literatura científica: Savaresi et al., 2000 describe una aplicación para un secador rotatorio de azúcar; Iguaz et al., 2002 presenta un modelo aplicado a desechos vegetales; Merino, 2003 plantea el modelo de un secador rotatorio para pulpa de remolacha, en este trabajo se presentan además los resultados de la simulación realizada en base al modelo planteado. Castaño et al., 2009 presenta un modelo matemático para un secador rotatorio de arena con flujo de aire en isocorriente.

Figura 8
Clasificación de sistemas de secado para frutas y vegetales



Fuente: Jayaraman, K.S. and Das Gupta, D.K., 1995

Secado artificial del cacao

Para el secado artificial del cacao se utilizan distintas fuentes de calor, preferentemente las generadas a partir de la combustión de carburantes como el gas natural. Para el beneficiado del cacao en Ecuador se utilizan mayoritariamente secadores artificiales estacionarios. Enríquez (2004), menciona algunos tipos de secadores artificiales: estufas, secadoras con leña, secadoras de combustión, secadoras eléctricas y la secadora de cacao tipo Samoa. Según el mismo autor, la mayor parte de la producción de cacao proviene de países en donde el secado es predominantemente natural, sin embargo en algunas regiones geográficas los períodos de cosecha coinciden con épocas de lluvia y humedad alta, en cuyo caso inevitablemente se recurre al secado artificial.

En Brasil, primer país en la lista de productores en América y quinto a nivel mundial, todas las haciendas productoras de cacao están equipadas con secadores de leña, para reemplazar al secado natural cuando las condiciones climáticas lo demandan (Enríquez, 2004).

La secadora tipo Samoa consiste en un tubo de metal, en cuyo interior se pone la fuente de calor, la misma que puede ser leña, carbón vegetal, diésel, etc. Sobre el tubo y a una distancia aproximada de 1,20 metros se coloca una cama, plancha o plataforma perforada, sobre la cual se tenderá una capa fina de granos de cacao. La parte inferior, debajo de la plataforma debe estar totalmente cerrada, constituyéndose de esta forma en una cámara de aire caliente. So no se tienen las debidas precauciones, suelen ocurrir contaminaciones con humos de combustión, pero de manera general el secador tipo Samoa es adecuado para sustituir al secado natural por exposición directa al sol en épocas cuyas condiciones ambientales son adversas al proceso de secado (Enríquez, 1987).

Una variación del secador tipo Samoa, consiste en una cámara de aire caliente totalmente cerrada, cuyo techo está constituido por una plancha perforada en donde se coloca el cacao. La diferencia con el secador tradicional tipo Samoa está en que no se utiliza el tubo interno, simplemente el aire caliente es alimentado desde una fuente de calor externa utilizando un ventilador. En la Figura 9 se ilustra un sistema

de secado con convección forzada. El secador tipo Samoa utiliza convección natural, es decir que el flujo de aire sucede por diferencia de densidades entre el aire caliente y el aire frío o a temperatura ambiental.

Figura 9

Secador artificial de cacao con convección forzada



Fuente: el autor

Tinoco y Ospina (2010) realizaron un análisis del proceso de deshidratación del cacao con miras a la disminución del tiempo de secado. En este trabajo realizaron dos pruebas experimentales de secado y análisis computacional basado en elementos finitos. Para la primera prueba se utilizó un horno de gas con bandejas perforadas dispuestas verticalmente y una muestra de cacao con una masa de 13kg aproximadamente. Para el segundo experimento se utilizó un horno con flujo de aire a la entrada y un extractor de aire y una temperatura de 55°C. Luego de analizar las simulaciones realizadas a nivel computacional y el comportamiento de las variables de temperatura y humedad, los autores concluyen que el cacao debía ser agitado dentro del horno para evitar quemaduras por contacto entre los granos y las bandejas

metálicas. Recomiendan no remover grandes cantidades de vapor de agua del aire ya que el aire seco deshidrata la superficie de los granos, provocando quemaduras.

Los autores (C.L. Hii et al., 2011) realizaron una investigación para estudiar la cinética de secado de las capas individuales del grano de cacao, estas son la testa o cascarilla y el cotiledón. Una capa fina de granos de cacao fueron secados utilizando una bomba de calor y aire seco a temperaturas de 28.2 °C, 40.4°C y 56°C, registrando durante todo el proceso los contenidos de humedad de la testa y el cotiledón. Se pudo observar que durante las dos primeras horas del proceso, la reducción del contenido de humedad en la testa era más rápido que en el cotiledón. Seguidamente en la etapa intermedia de secado se registró un mayor contenido de humedad en la testa con respecto al cotiledón. Finalmente se encontró mayor humedad en la testa que en el cotiledón, demostrando la migración del contenido de humedad desde el cotiledón hacia la testa. En sus conclusiones, los autores argumentan que el comportamiento del contenido de humedad registrado en la testa y el cotiledón se explica con el postulado de transferencia de masa de Luikov, en este caso se encontró que el potencial de transferencia de masa para la testa es siempre menor que en el cotiledón, por lo tanto, se efectúa la transferencia de masa del cotiledón hacia la testa, aun cuando es menor el contenido de humedad del cotiledón.

En el año 2012, P. Parra et al., presentan un trabajo orientado al modelado y simulación de una cámara para secado de cacao, la investigación se desarrolla para un sistema de secado que consiste en un cilindro rotatorio con convección forzada de aire y flujo paralelo, en este caso el sistema trabaja por lotes.

Dentro del ámbito del modelado también se encuentran referencias bibliográficas para el área de secado artificial de cacao. En el año 2008, los autores: Hii, Law & Cloke publican un trabajo de investigación que analiza los modelos existentes para la cinética de secado de una capa fina de granos de cacao tanto de forma natural como de forma artificial. Para este trabajo utilizaron un horno con circulación de aire secador solar. Los datos obtenidos se procesaron con varios modelos de secado para capa fina publicados anteriormente y se introdujo un

nuevo modelo, combinando los modelos de Page y el modelo de los dos términos.

La selección del mejor modelo se realizó determinando los coeficientes de R^2 , chi-cuadrada reducida χ^2 y error cuadrático medio RMSE, entre los valores de predicción de los modelos y los valores obtenidos experimentalmente. Los modelos utilizados son semi-teóricos o empíricos están basados en el modelo teórico de secado planteado en la segunda ley de Fick, con algunas simplificaciones y añadiduras como son aquellos coeficientes empíricos que ayudan a mejorar el ajuste de la curva de secado a una temperatura de 60°C y un secador solar.

Tabla 1
Thin Layer Drying Models Tested for Cocoa Drying

| Model name | Model equation | Equation No. | References |
|---------------------|---|--------------|------------|
| Newton | $MR = \exp(-kt)$ | 1 | [9] |
| Henderson and Pabis | $MR = a \exp(-kt)$ | 2 | [10] |
| Page | $MR = \exp(-kt^n)$ | 3 | [11] |
| Logarithmic | $MR = a \exp(-kt) + c$ | 4 | [12] |
| Two term model | $MR = a \exp(-kt) + c \exp(-gt)$ | 5 | [13] |
| Verma et al. | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$ | 6 | [14] |
| Diffusion approach | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kgt)$ | 7 | [10] |
| Midili-Kucuk | $MR = a \exp(-kt^n) + bt$ | 8 | [15] |
| Wang and Smith | $MR = 1 + at + bt^2$ | 9 | [16] |
| New model | $MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n)$ | 10 | This paper |

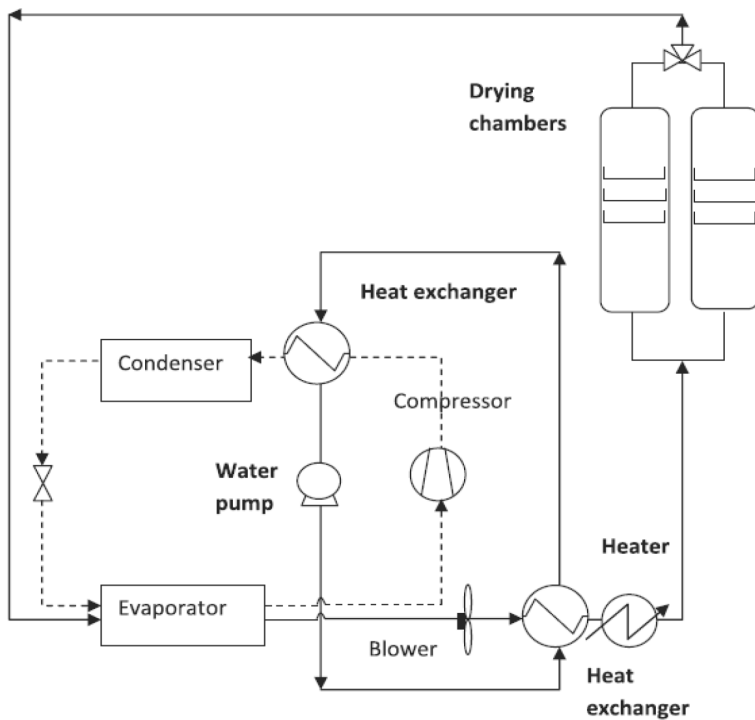
Fuente: C.L. Hii et al., 2013

Hii, Law y Cloke (2008) utilizaron los modelos expuestos en la Tabla 1. Los autores concluyen que el nuevo modelo describe de mejor manera

la cinética de secado del cacao en capas finas, para las técnicas natural y artificial de secado.

El último aporte registrado en torno al secado artificial de cacao fue publicado por Hii, Law y Law en el año 2013, en su investigación sobre la simulación de la transferencia de calor y de masa en el proceso de secado de cacao, utilizando una bomba de calor. En la Figura 10 se observa un esquema del sistema utilizado.

Figura 10
Diagrama esquemático del secador basado en bomba de calor



Fuente: C.L. Hii, C.L. Law y M.C. Law, 2013

El secador utilizado para la experimentación, es un prototipo constituido por la bomba de calor, intercambiador de calor, cámaras de secado y ductos para el flujo de aire. La bomba de calor está conformada por:

compresor, bomba de agua, condensador y ventilador. Para la simulación se asumió que el grano de cacao tiene forma elipsoidal y se trabajó con un modelo matemático basado en el modelo de conducción de Fourier para el caso de la transferencia de energía; y en el modelo de difusividad de Fick para el caso de la transferencia de masa. Los autores concluyen haber notado una gran concordancia entre los datos experimentales y las predicciones arrojadas por el modelo en la relación a la humedad y a los perfiles de temperatura de las almendras de cacao. No observaron una mejoría significativa al incorporar un factor de encogimiento al modelo. Finalmente plantean la posibilidad a futuro de considerar la mejora del modelo de difusividad y poder incluir la testa y las distintas capas del cotiledón en el modelo.

De acuerdo a la bibliografía consultada, el proceso de secado de cacao mayoritariamente es de tipo natural. Con respecto al secado artificial del cacao, básicamente se encuentra información de sistemas estacionarios que aprovechan el mecanismo de convección natural o convección forzada de aire. A la fecha no se encuentra en la bibliografía especializada ninguna investigación que haga referencia al secado artificial de cacao en donde además de utilizar la convección forzada, también se ponga en movimiento continuo a la masa de grano a secar.

Conclusiones

Existe suficiente información sobre trabajos de investigación desarrollados en torno a los sistemas de secado artificial utilizados a nivel industrial de manera general, menor es el número de trabajos enfocados al secado artificial de alimentos y muy escasas son las investigaciones centradas en el secado artificial de cacao.

Se ha encontrado literatura especializada que describe sistemas de secado artificial, que utilizan el flujo de aire caliente como agente de secado, manteniendo al grano de cacao estático con remociones periódicas y que trabajan u operan por lotes.

En los últimos años se han estudiado varios modelos matemáticos para el secado de cacao y se los ha validado con datos experimentales obtenidos a nivel de laboratorio, pero no se registra ningún trabajo

científico en el cual se plantee el modelo matemático de un sistema secador artificial e industrial para granos de cacao.

Se sugiere realizar una futura investigación con miras a plantear un modelo paramétrico para un secador artificial de cacao, que utilice el fenómeno de convección con flujo de aire caliente y que incorpore como novedad el movimiento rotacional del grano así como un flujo de alimentación continuo.

El diseño y construcción de una planta industrial piloto, integrada por una cámara de combustión para generar aire caliente y un cilindro rotatorio para secar granos de cacao podría ser útil para la obtención de datos experimentales que permitan la validación del modelo planteado.

Referencias bibliográficas

- Alverson, W., Whitlock, B.A., Nyffeler, R., Bayer, C. & Baum, D.A. (1999). Phylogeny of the core Malvales: evidence from *ndhF* sequence data. *American Journal of Botany*, 86(10), 1474-1486.
- Armijos, A. (2002). *Caracterización de acidez como parámetro químico de calidad en muestras de cacao (Theobroma cacao L.) fino y ordinario de producción Nacional durante la fermentación*. (Tesis de Licenciatura en Química). Quito: Pontificia Universidad Católica.
- Banco Central del Ecuador (BCE) (2013). Dirección de Inteligencia Comercial e Inversiones PRO ECUADOR.
- Braudeau, J. (1970). *El cacao. Técnicas agrícolas y producciones tropicales*. Barcelona: Editorial Blume, primera edición.
- Bruin, S. & Luyben, K.Ch.A.M. (1980). Drying of food materials: A review of recent developments. En: A.S. Mujumdar (Ed.), *Advances in Drying* (pp. 155-215). New York: Hemisphere Publishing.
- Castaño, F., Rubio, F.R. & Ortega, M.G. (2009). Modelado de secadores rotatorios en Isocorriente. *RIAI*, 6, 4, 32-43.
- Cros, E. & Jeanjean, N. (1995). Cocoa quality: effect of fermentation and drying. *Plantations, research, development*, 24, 25-27.
- Enríquez G.A. (1987). *Manual del cacao para agricultores*. CATIE, ACRI, UNED. San José-Costa Rica.
- _____ (1993). Control de calidades durante un proceso productivo, *Revista INIAP* 2(1), 37-42. Quito.

- _____ (2004). *Cacao orgánico. Guía para productores ecuatorianos*. Quito: Instituto Nacional Autónomo de investigaciones Agropecuarias -INIAP-.
- Fagunwa, A.O., Koya, O.A. & Faborode, M.O. (2009). Development of an Intermittent Solar Dryer for Cocoa Beans. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript number 1292. Vol. XI. July.
- Hii, C.L., Law, C.L. & Suzannah, S. (2011). Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying. *Journal of Food Engineering*. ELSEVIER.
- Hii, C.L., Law, C.L. & Cloke, M. (2008). Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Cocoa Beans During Artificial and Natural Drying. *Journal of Engineering Science and Technology*, 3(1), 1- 10.
- Hii, C.L., Law, C.L. & Law, M.C. (2013). Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. *Applied Thermal Engineering*, 54 ELSEVIER, 264-271.
- ICCO. *Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics*, XXXIX, 4, Cocoa year 2012/13. Publicado: 02-12-2013.
- Iguaz, A., Esnoz, A., Martínez, G., López, A. & Vírveda, P. (2003). Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of Food Engineering*, 59 (2-3), 151-160.
- Jayaraman, K.S. & Das Gupta, D.K. (1995). Drying of fruits and vegetables. En: A.S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (pp. 643-690). New York: Marcel Dekker Inc.
- Jiménez, J.C. (2000). *Efectos de dos métodos de fermentación sobre la calidad de tres grupos de cacao (Theobroma cacao L.) cultivados en la zona de Quevedo, provincia de los Ríos*. (Tesis Ingeniería Agronómica) Guaranda-Ecuador: Universidad Estatal de Bolívar.
- Maupoey, Pedro Fito, Grau, A., Albors Sorolla, A.M. & Barat Baviera, José Manuel (2001). Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente. Disponible en: <http://www.books.google.com>
- McCabe, Warren L. et al. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Mc Graw Hill Edit. Cuarta Edición.
- McMinn, W.A.M. & Magee, T.R.A. (1999). Institution of Chemical Engineers. *Trans IChemE*, 77, Part C, September.
- Merino Gómez, A. (2003). Modelado y simulación de un secadero de pulpa. 2ª Reunión de Usuarios de EcosimPro, UNED, Madrid 24-25 de febrero del 2003. http://www.ecosimpro.com/download/articles/C02_02_es.pdf.

- Moreno, M. (2004). *El cultivo del cacaotero*. Barinas, Venezuela: Ediciones de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora. Colección Docencia Universitaria.
- Nogales, J., Graziani de Fariñas, L. & Ortiz de Bertorelli, L. (2006). Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao fermentado en dos diseños de cajones de madera. *Agronomía Tropical*, 56, 1, 5-20.
- Ortiz de Bertorelli, L., Graziani de Fariñas, L. & Gervaise Rovedas, L. (2009). Influencia de varios factores sobre características del grano de cacao fermentado y secado al sol. *Agronomía Tropical*, 59(2), 119-127.
- Parra Rosero, P., Saavedra, R. & Ipanaqué Alama, W. (2012). Modelación y simulación en ambiente Ecosimpro de una cámara de secado para cacao. *Revista INGENIUS*, 8, 54-60.
- Pérez Piza, Rosa (2009). *La Calidad del Cacao*. Programa de capacitación a facilitadores y agricultores en la cadena del cacao. Estación Experimental Central de la Amazonía. Ecuador.
- Portal oficial de ANECACAO. Estadísticas comerciales del cacao ecuatoriano. Disponible en: <http://www.anecacao.com/es/cacao-nacional/>
- Portillo, E., Graziani L. & Cros, E. (2006). Efectos de algunos factores post-cosecha sobre la calidad sensorial del cacao criollo porcelana (*Theobroma cacao* L.). *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 23, 49-57. Venezuela.
- Puziah, H., Jinap, S., Kharidah, M. & Asbi, A. (1998). Effect of mass and turning time on free amino acid, peptide-N, sugar and pyrazine concentration during cocoa fermentation. *J. Sci. Food Agric*, 78, 543-550.
- Ramos, G. (2004). La fermentación, el secado y almacenamiento del cacao. *Taller Internacional de Calidad Integral de Cacao*. Memorias INIAP. Quevedo, Ecuador.
- Ramos, G., Ramos, P. & Azocar, A. (2000). Beneficio del cacao. En: *Manual del productor de cacao* (pp. 58-69). Mérida, Venezuela.
- Rincón, S.O. (1999). *Manual del cacaotero*. Bogotá: Cenicafé.
- Saltos, A., Sánchez, V. & Anzules, A. (2006). Beneficio del cacao. *Taller de entrenamiento en calidad física y organoléptica de cacao* (20-24 de marzo, Quevedo-Ecuador). Memorias INIAP. Quevedo Ecuador.

- Savaresi, S., Bitmead, R. & Pierce Robert (2000). On Modelling and Control of a Rotary Sugar Dryer. *Control Engineering Practice*, 9, 3, 249-266.
- Sousa Silva, C. & Figueira, A. (2005). Phylogenetic analysis of Theobroma (Sterculiaceae) based on kunitz-like trypsin inhibitor sequence. *Plant Systematics and Evolution* 250, p. 93-104.
- Tinoco, H. & Ospina, Diana (2010). Análisis del proceso de deshidratación del cacao para la disminución del tiempo de secado. *Revista EIA*, 13, 53-63, Julio. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín-Colombia.
- Torres, O., Graziani de Fariñas, L., Ortiz de Bertorelli, L. & Trujillo, A. (2004). Efecto del tiempo transcurrido entre la cosecha y el desgrane de la mazorca del cacao tipo forastero de Cuyagua sobre características del grano en fermentación. *Agronomía Tropical*, 54, 4, 481-495.