

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

DIRECCIÓN DE PROYECTOS

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INTEGRACIÓN BOSQUE INDUSTRIA

INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**BALANCE ENERGÉTICO EN DOS SISTEMAS DE SECADO DE RESIDUOS
LIGNO-CELULÓSICOS PRODUCIDOS EN COSTA RICA.
(DOCUMENTO I)**

INVESTIGADORES:

*Ing. Roger Moya R. Ph.D.
Ing. Carolina Tenorio M. Lic.*

Setiembre, 2012

BALANCE ENERGÉTICO EN DOS SISTEMAS DE SECADO DE RESIDUOS LIGNO-CELULÓSICOS PRODUCIDOS EN COSTA RICA.

RESUMEN

Los desechos ligno-celulósicos en la agricultura y en el sector forestal constituyen un alto porcentaje. La industria forestal se caracteriza por presentar una baja eficiencia en la utilización de la materia prima (40-60%), en tanto que los cultivos agrícolas producen una gran cantidad de biomasa residual, de la cual solamente se aprovecha el 60%. La utilización de residuos ligno-celulósicos como fuentes energéticas, ha sido una temática desde años atrás; no obstante, para el medio costarricense, aún es un tema muy insipiente. En este proyecto estuvo orientada a determinar el potencial energético de distintos desechos de la industria forestal y agrícola costarricense (aserrín de *Gmelina arborea*, pinzote de palma africana y hojas de piña). Por esta razón la investigación tuvo como objetivo establecer las curvas de balance energético entre la cantidad de calor necesario para secar al menos 3 tipos de productos ligno-celulósicos y la cantidad de calor generado por estos residuos ligno-celulósicos en diferentes grados de humedad en 3 tipos de sistemas de secado (aire, solar y con caldera). Así mismo se diseñó, validó y socializó una secadora solar de baja escala (3 m³ de capacidad) para el secado de residuos del cultivo de la piña. De los resultados obtenidos se encontró que los diferentes tipos de residuos presenta un punto crítico de secado, en aserrín fue de 10%, en el pinzote varió de 11 a 13% y en rastrojo de piña varió de 4% a 13%. El balance energético en aserrín y el pinzote fue de 4.0 a 4.5 kwh/kg secado en contenido de humedad menor a 10%, en la piña el mejor balance energético se presenta cuando el contenido de humedad varía de 30 a 40%. En el desarrollo y fabricación de la secadora solar portátil utilizando la fibra de las hojas de la planta de piña, se encontró que el mejor intervalo para el secado de la fibra es desde las 6 hasta las 14 horas y luego de esta hora, con el fin de aumentar la eficiencia de la secadora, es conveniente inyectar aire caliente y usar un deshumificador dentro de la secadora.

Palabras clave: *piña, poder calórico, cultivos agrícolas, secado solar.*

ENERGETIC BALANCE FOR TWO DRY SYSTEMS OF LIGNO-CELLULOSIC AGRO-FORESTRY WASTES IN COSTA RICA

SUMMARY

Ligno-cellulosic residues from agriculture and forestry industries represent a high percentage. The forest industry is characterized by a low efficiency in utilization of raw materials (40-60%), while the agricultural crops produce a large amount of residual biomass and only 60% is used. The use of ligno-cellulosic residues as energy sources has been a topic for years. However, it's still a very incipient for Costa Rica. This project was conducted to determine the energy potential of various residues from the agricultural and forest industries residues (sawdust from *Gmelina arborea*, empty fruit bunches from oil palm, and pineapple leaves). The main objective was to establish the curves of energy balance between the amount of heat required to dry at least 3 types of ligno-cellulosic residues and the amount of heat generated by these ligno-cellulosic residues, in different moisture content, and in 3 types of drying systems (air, solar and conventional). It also was designed, validated and socialized one small-scale solar dryer (3 m³) for drying the pineapple leaves fibers. From the results obtained it was found that different types of residues has a critical point drying, at 10% in sawdust, 11 to 13% in the empty fruit bunches of oil palm, and 4% to 13% in pineapple leaves. The energy balance in sawdust and the empty fruit bunches of oil palm was 4.0 to 4.5 kwh /kg-dried to moisture content below 10%, in pineapple, the better energy balance occurs when the moisture content varies from 30 to 40%. In the development and manufacturing of portable solar dryer using fiber leaves from pineapple plant, it was found that the best range for the drying of the fiber is from 6 to 14 hours, and after this time, with the objective to increase the efficiency of the dryer, hot air should be injected and also should be use a dehumidifier into the dryer.

Keywords: *pineapple, calorific value, agricultural crops, solar drying.*

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	2
SUMMARY	3
ÍNDICE GENERAL	4
1. INTRODUCCION	6
2. METODOLOGÍA	8
2.1. Materiales y procedencia.....	8
2.2. Características del material	8
2.3. Proceso experimental.....	10
2.4. Sistemas de secado	10
2.5. Colocación de los residuos durante el secado.....	10
2.6. Condiciones durante la prueba de secado.....	10
2.7. Control de humedad.....	11
2.8. Gasto energético por transformación, transporte y secado.....	12
2.9. Ganancia energética	13
2.10. Balance energético.....	14
2.11. Punto crítico de secado	14
2.12. Propuesta de secadora solar portátil	15
2.13. Evaluación de la eficiencia de la secadora con fibra de piña	17
2.14. Análisis estadísticos	19
3. RESULTADOS	19

3.1. Contenido de humedad de los desechos en los 3 sistemas de secado	19
3.2. Tiempos de secado en los 3 sistemas de secado.....	20
3.3. Gasto energético, su variación y punto crítico de secado	23
3.4. Balance energético.....	31
3.5. Temperatura y humedad relativa dentro de la cámara de secado	34
3.6. Efecto de la radiación solar y temperatura externa sobre la temperatura interna de la cámara.	37
3.7. Prueba de secado con fibra de piña	38
4. CONCLUSIONES	42
5. AGRADECIMIENTOS	43
6. BIBLIOGRAFÍA	43

1. INTRODUCCION

Los desechos orgánicos son un problema de grandes dimensiones en Costa Rica. Se estima que en este país se producen alrededor de 11764 toneladas por día, de las cuales el 86% (10122 tol/día) son desechos agroindustriales (Ulloa et al., 2003). El problema se vuelve aún más grave por el hecho de que solamente un pequeño porcentaje de estos desechos recibe algún tipo de tratamiento. Residuos ligno-celulósicos provenientes de la agricultura y del sector forestal constituyen un alto porcentaje de dichos desechos. Específicamente, la industria forestal o maderera se caracteriza por presentar una baja eficiencia. Se estima que entre 40-60% de la materia prima en troza (alrededor 500 mil de m³) se convierte en residuos (Moya et al., 2009, Barrantes y Castro, 2007). En la producción de aceite vegetal a partir de la palma africana, se genera alrededor de 26 % del peso total del fruto en desechos, aproximadamente 200 toneladas/año de este desecho en Costa Rica (Rebeiro, 2007). Por otro lado, en la producción de piña se generan aproximadamente 3600 toneladas/hectárea de residuos, principalmente en la mata (Rebeiro, 2007).

En los últimos años, con los problemas asociados al medio ambiente y al calentamiento global del planeta, en muchas regiones del mundo se está desarrollando la utilización de residuos en fuentes energéticas de los procesos de transformación de la industria maderera (aserrín), y de los desechos de cultivos agrícolas (Velázquez, 2006; Askew y Homes, 2002; Andersen et al., 2005; Offerman et al., 2011; Shuit et al., 2009). No obstante, para el medio costarricense y algunos países en vías de desarrollo, la utilización de estos residuos constituiría una alternativa novedosa en el uso secundario de este tipo de materiales.

La utilización de residuos ligno-celulósicos como material energético presenta muchas ventajas, entre las que destacan que sus componentes provienen de fuentes renovables con relativamente poco consumo de energía para su obtención (McKendry, 2002). Sin embargo, es importante indicar que una de las limitantes más grandes a la que se enfrentan estos sectores es que no se cuenta con un proceso industrial que verdaderamente haga utilización de dichos residuos (Ulloa et al., 2003). Este poco desarrollo industrial puede ser explicado por el hecho que estos materiales tienen un origen biológico, dando como resultado un alto grado de humedad (McKendry, 2002). Estos residuos por lo general presentan humedades sobre 45 %, en el caso de pinzote y el aserrín de madera (Ratnasingam et al., 2008; Moya et al., 2012) y en el caso de la mata de piña de hasta 87 % (Moya et al., 2010). De forma tal que para una utilización de los residuos agroforestales se hace necesaria la eliminación de esta humedad (McKendry, 2002).

Para el secado de productos lignocelulósicos tradicionalmente se han utilizado varios métodos de secado, que van desde propuestas muy simples a propuestas muy complejas. En el primer grupo de propuesta está el secado al aire libre, el cual no requiere de ningún tipo de equipo (FPL, 1999), y entre los sofisticados se encuentran los que requieren de equipos especializados, como los tambores rotatorios o cámaras de secado convencionales con calderas (González et al., 2011). La tecnología de secado solar se considera intermedia entre lo simple y lo sofisticado, esta posee algunas ventajas, entre las que se destacan el tiempo de

secado y contenidos de humedad bajos en relación al secado al aire y en relación al secado al horno con aire caliente, el secado solar es de menor costo (Langrish y Walker, 2006; Sattar, 1994), y del consumo mínimo de energía (Sattar, 1994).

En el caso de Costa Rica, como en muchos otros países, ya se han iniciado el aprovechamiento de residuos ligno-celulósicos para posteriormente ser utilizados como fuente de calor (Ramírez et al., 2007). No obstante, dichos residuos para lograr la máxima eficiencia energética se deben secar, y este proceso de secado involucra en la mayoría de los casos el gasto de energía (Pang and Xu, 2010). Normalmente el contenido de humedad debe alcanzar entre 5-30% de humedad dependiendo de la tecnología secado y el uso final que tenga la biomasa seca. Por ejemplo, en los procesos de pirólisis se necesita menos de 10 % de MC, en gasificación se necesita entre 10-20 % (Pang y Li, 2006), en combustión directa puede ser hasta 30 % (Pang and Xu, 2010), en la fabricación de pellet debe secarse a 10-12 % y en la fabricación de briquetas entre 20-30 % (Rhéna et al., 2005).

El secado de biomasa ha recibido amplio interés de los investigadores a nivel mundial (Fagernäsa et al, 2010), no solo para los residuos presentes en el presente estudio, si no que para muchos otros tipos de residuos (Fagernäsa et al, 2010). Dichos estudios contemplan, además del diseño de excelentes secadoras (Kopyscinski et al., 2010), el desarrollo de muy ajustados modelos de secado (Bauer et al., 2010) y curvas de la cinética del secado bastante reales (White et al., 2011). No obstante, el proceso de secado real es más complejo que esos sistemas de secado y modelos de secado. En el secado de los materiales ligno-celulósicos además del gasto energético para generar el calor para remover el agua (Muller, 2009), deben agregarse otros gastos energéticos como por ejemplo el del procesamiento del material con el fin de facilitar el secado, o bien los gastos en transporte de acarrear los residuos del lugar que se producen a la zona de carga del secador, que puede involucrar un costo alto en algunos países. En Costa Rica por ejemplo, el costo de un 1 Kwh de uso industrial es de 0.16 US\$ (Diario Oficial La Gaceta, 2012). Dicha energía puede ser utilizada en reducir el tamaño de los residuos para una mayor facilidad de transporte o facilitar el secado y para el secado mismo de la biomasa (Anttila et al., 2011). Por otro lado deben agregarse los gastos de transporte, que en general, para este país, son altos ya que no se cuenta con una estructura vial adecuada para la flota de transporte de carga (D'Alolio, 2007).

Aunado a ello, un inconveniente que se presenta es la falta de conocimiento sobre el verdadero potencial energético, los sistemas de secado y sobre todo el balance energético que presentan los residuos de las distintas plantaciones o de los cultivos agrícolas. De forma tal que esta propuesta de investigación tuvo como objetivo establecer el balance energético de 3 tipos de residuos ligno-celulósicos generados en Costa Rica (pinzote, plantas de piña y aserrín de *Gmelina arborea*) bajo tres sistemas de secado: al aire, con secador solar y con horno con aire caliente. Además de desarrollar una secadora solar portátil para validar la eficiencia en el campo del secado de residuos como las matas de piña molidas. Dicha información permite observar los rangos óptimos de secado y los máximos contenidos de humedad que se pueden utilizar para obtener un balance energético adecuado para cada

sistema de secado o residuo y de esta manera generar posibles estrategias para su utilización.

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales y procedencia

Tres tipos de residuos lignocelulósicos fueron secados: hojas de piña (PL), fibras de pinzote de la palma aceitera (EFB) y (iii) aserrín de *Gmelina arborea* (GAD). Estos residuos son producidos en grandes cantidades y no son utilizados. PL provenían de plantas de segunda cosecha, de 18 meses de edad, ubicada en la zona Sur de Costa Rica (Buenos Aires, Puntarenas). El EFB fue traído de una planta de procesamiento de aceite ubicada en el pacífico central de Costa Rica (Parrita, Puntarenas). Finalmente el GAD se tomó del proceso de aserrío de una empresa ubicada en la zona norte de Costa Rica y cuyo abastecimiento de trozas es realizado en plantaciones ubicadas en la misma zona. Cada uno de los residuos se tomó de dos lotes diferentes, con aproximadamente 15 días de diferencia entre colectas, de forma tal, que para el secado solar y al aire los materiales provenían del mismo lote, mientras que para el secado con horno con aire caliente provenían de un lote diferente.

2.2. Características del material

Hojas de piña: La transformación de las hojas de piña se realizó para dos procesos diferentes: (i) en primer proceso la mata fue astillada en diferentes longitudes (estas pueden ser reguladas) con la ayuda de un astillador o picador (de construcción local) que se adapta a la toma fuerza de un tractor agrícola y (ii) el segundo proceso consistió en el molido de las matas, en donde la mata de piña fue triturada. En el primer método se simuló el proceso de astillado de la hoja y para ello las hojas fueron cortadas en 3 diferentes longitudes (Figura 1a). En el segundo método las plantas de piña fueron trituradas en un molino utilizado comúnmente en la extracción del jugo de la caña de azúcar (Figura 1b). En el primer caso, las PL fueron separadas de la base de la mata y se cortaron a tres longitudes distintas: de 2 cm, 6 cm y 10 cm, manteniendo el ancho de la hoja (Figura 1a). Para la longitud de 6 y 10 cm el haz (parte superior) y el envés de la hoja se mantuvieron en su forma original. Pero en el caso de la longitud de 2 cm se probaron dos tipos de tratamientos: (i) el haz y el envés se mantuvieron en la forma original de la hoja y (ii) en la parte del envés se realizaron estrías (grietas) que rompieron la cutícula de la hoja de piña con el fin de determinar en qué forma afectaban el flujo del agua durante el secado (Figura 1a). Las hojas de la familia Bromeliaceae presentan una capa de células llamada cutícula, cuya función es la de tejido protector (Krauss, 1949; Bartholomew *et al.*, 2003) y evitar la pérdida de humedad de la hoja (Py *et al.*, 1987). Las estrías se realizaron a una separación de 5 mm y pasando clavos sobre la cara inferior de la hoja de piña. Para el segundo caso (triturado de las hojas), las matas fueron arrancadas completamente y se eliminaron sus respectivas raíces, y posteriormente fueron pasadas a través de un molino de extracción del jugo de la caña. Dicho molino

presentaba un motor de 30 Hp, 34 Kw, 1725 rpm, para una velocidad de lineal de molido de 90 m/min (Figura 1b).

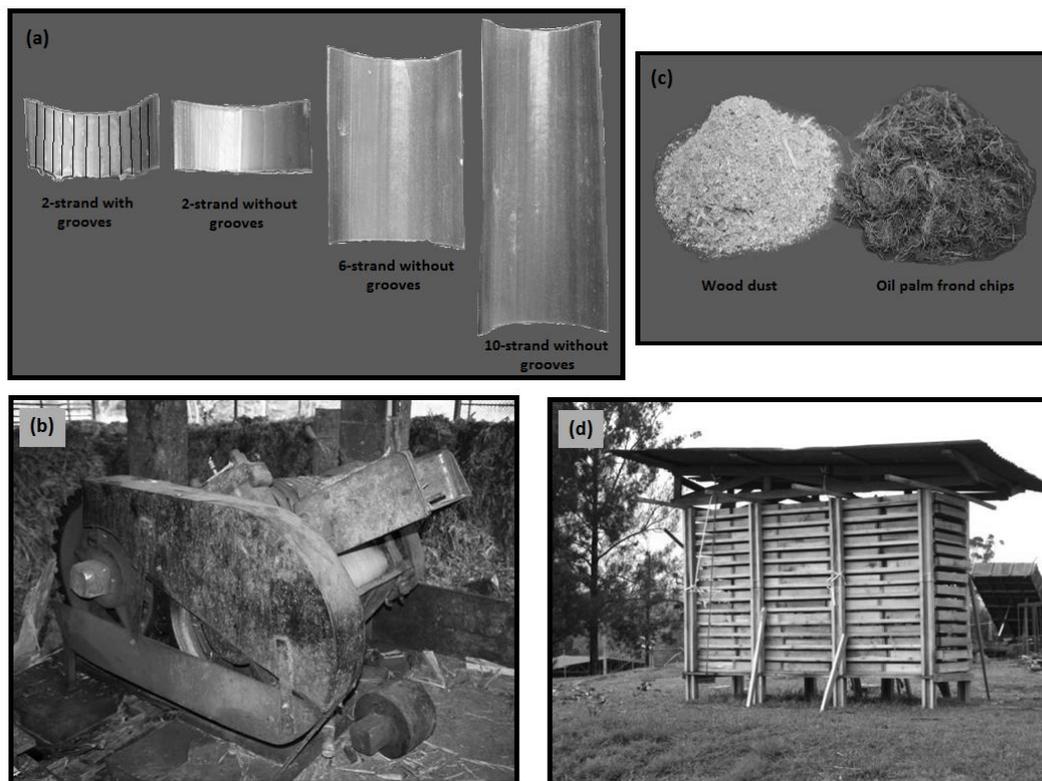


Figura 1. Diferentes longitudes utilizadas en las hojas de piña(a), molino de extracción de jugo de caña utilizado para moler las matas de piña (b), forma de los residuos de aserrín y pinzote utilizados (c) y dispositivo diseñado para colocar las muestras granuladas o molidas durante los procesos de secado (d).

Aserrín: como fue extraído directamente de los sistemas de evacuación de aserrín de un proceso de aserrío de trozas, este presentaba una forma granulada. Este material granulada presentaba un módulo de finura de 2,5, acorde con la adaptación de la norma brasileña “NBR 7211/83: Agregado para Concreto”, utilizada para clasificar arena para hormigón. La distribución de los diferentes tamaños fue la siguiente: 2% de las partículas con tamaño mayor a 6,7 mm, un 4% con partículas entre 4 y 6,7 mm, un 11% entre 2 y 4 mm, un 31% entre 1 y 2 mm, un 36% con partículas entre 0,43 y 1 mm, un 11% entre 0,25 y 0,43 mm y finalmente un 6% correspondía a partículas menores a 0,25 mm (Figura 1c). Dicha distribución de partículas produce una densidad aparente de 158 kg/m³ en condición verde.

Pinzote: durante el proceso de extracción del aceite, el EFB con el fruto es calentado y luego de la separación de ellos, el EFB es molido y triturado para extraer aceite adherido a este durante el proceso de cocimiento. Luego estos son triturados, lo que produce una separación de los haces vasculares que componen este tipo de monocotiledóneas, por lo que este tipo de residuo tiene forma fibrosa (Figura 1c). En este molido se obtienen trozos con largos que

varían de 6 a 9 cm, que son los utilizados en este estudio y produce una densidad aparente de 70 kg/m^3 en condición verde.

2.3. Proceso experimental

Los tres materiales utilizados fueron de tipo granulado o astillado, y debido a que en Costa Rica se espera iniciar la utilización de dichos residuos con los sistemas y tipos de secado existentes, el método experimental se basó en el paso de aire caliente a través del material (forma estática). De forma tal que no fue probado el secado utilizando aire caliente a través de los materiales en movimiento.

2.4. Sistemas de secado

Al aire: el secado al aire (AD) se realizó en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ubicado en Cartago, Costa Rica, durante los meses de febrero a abril. El sitio se caracteriza por tener una altitud de 1380 msnm, con una temperatura durante los meses de estudio de entre los 17,6 y los 19,3 °C, con humedad relativa de entre 88 y 89,9 %, con precipitaciones que van de 0 a 50 mm y velocidades de viento de los 12 a los 13,8 Km/h (IMN, 2011).

Solar: este secado (SD) se realizó en una secadora solar con capacidad para 6 m^3 , construida en el ITCR. Dicha secadora consta de un colector de temperatura (lámina de hierro) cuya función es capturar la energía solar y convertirla en calor. Luego este calor se pone en movimiento a lo interno de la secadora a través de abanicos, a fin de que ese aire caliente circule por los materiales a secar. La velocidad promedio del aire en esta secadora varía de 1,5 y 2,0 m/s (Salas *et al.*, 2008). Así mismo, esta cámara cuenta con un dispositivo electrónico que mide las condiciones de temperatura y humedad relativa externa e interna.

Secado en horno con aire caliente (HAD): el secado de los materiales se llevó a cabo con una secadora experimental marca NARDI con capacidad para 2 m^3 . En dicha secadora el movimiento del aire a través de los materiales se da a una velocidad de 2 a 2,5 m/s.

2.5. Colocación de los residuos durante el secado

Para el almacenamiento de los materiales durante el secado se diseñaron recipientes (bandejas) que permitieron la circulación del aire en la parte inferior y superior de los mismos. Estas bandejas fueron construidas con madera, con fondo de cedazo de 19 mm x 19 mm. La bandeja fue diseñada con dimensiones de 50 cm de profundidad x 67 cm de ancho x 7 cm de alto. El apilado en los tres tipos de secado se llevó a cabo procurando una separación de 25,4 mm entre las bandejas, de forma tal que permitiera el paso del aire entre las mismas. Para ello fue construido un dispositivo de madera de 180 cm de alto, 85 cm de ancho y 250 cm de largo, en el cual se colocaron las bandejas con el material (Figura 1d).

2.6. Condiciones durante la prueba de secado

Los secados AD y SD fueron realizados simultáneamente con el fin de que no se presentaran variaciones por condiciones climáticas entre los dos tipos de secado. Dichos procesos se

realizaron en los meses de febrero a abril, los cuales corresponden a la época seca en la región de Cartago, Costa Rica. En tanto en el secado HAD se programó a una temperatura de 80°C y una humedad relativa interna de 8%, para lograr un secado de aproximadamente 10%. Las condiciones de temperatura y humedad relativa, tanto internas como externas a la cámara, de SD durante el período en que se llevó a cabo el proceso de secado se muestran en la figura 2. El promedio de humedad relativa externa fue de 90% con un máximo de 100% y un mínimo de 39%, el promedio de temperatura externa fue de 24°C, con un máximo de 27°C y un mínimo de 15°C. Las condiciones internas en la cámara de SD fueron de 52% en promedio de humedad relativa con valores máximos y mínimos 71% y 19%, y 29°C de temperatura promedio, con 57°C como máximo y 20°C como mínimo.

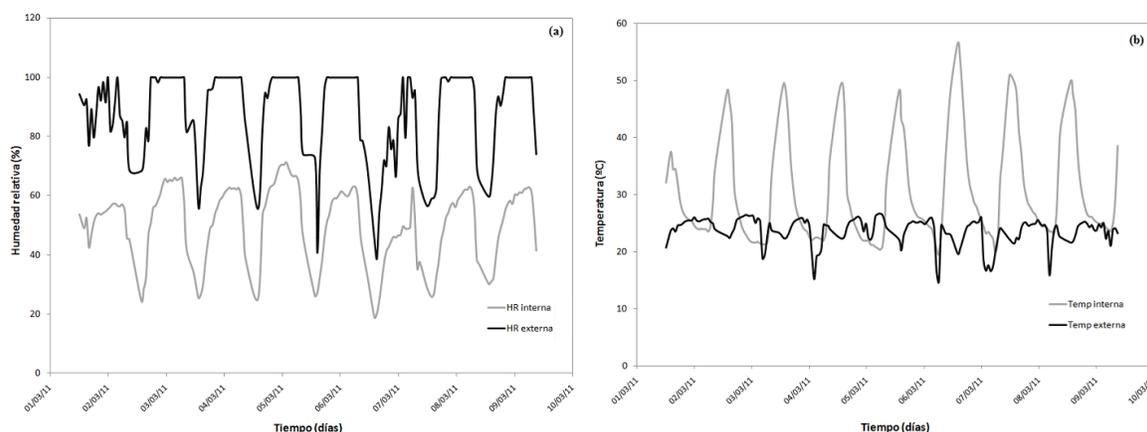


Figura 2. Condiciones internas y externas de humedad relativa (a) y temperatura (b) de la cámara de secado solar.

Aunque fueron contruidos dispositivos para colocar las bandejas con los residuos, el volumen y peso de estos varió con el tipo de secado. En el AD se colocó solamente un dispositivo con 75 bandejas, y el caso del secado SD y HAD fueron colocados dos dispositivos con 75 bandejas cada uno, lo que significa 150 bandejas. La cantidad de material en peso a secar en cada bandeja varió por tipo de material a secar, 3,35 Kg para GAD, 2,11 Kg en EFB, 2,24 Kg en PL picada y finalmente en PL molida de 2,06 Kg. Todos estos pesos se determinaron con los materiales en condición verde.

2.7. Control de humedad

Para el control de la variación del contenido de humedad (MC) en los diferentes tipos de residuos se utilizaron cuatro muestras testigo por material y por secado. Para ello, por tratarse de un material granulado, se utilizó con una bolsa con una malla de 0,4 mm x 0,4 mm, esto con el fin de evitar la pérdida de material y de permitir la circulación del aire en el material. Estas bolsas fueron colocadas en bandejas ubicadas a diferentes alturas en la pilas de secado, con el fin de monitorear la variación del MC en las distintas partes de la cámara. Las muestras se pesaron al inicio de cada secado, y dos veces en el día en el caso del AD y SD. En el HAD las muestras de control de MC fueron pesadas cada 2 horas. Posteriormente al final de proceso de secado estas muestras se colocaron en un horno a 103 °C por 24 horas.

La determinación del MC en cada lapso de tiempo que se pesaron las muestras, se calculó utilizando como referencia la base humedad, acorde con la siguiente fórmula.

$$CH(\%) = \frac{\text{Peso muestra al inicio del secado} - \text{Peso de muestra seca}}{\text{Peso de la muestra al inicio del secado}} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

MC = contenido de humedad

2.8. Gasto energético por transformación, transporte y secado

El consumo eléctrico, medido en kilovatios por hora (kwh), fue determinado para: (i) el gasto energético de transformación del material, (ii) el gasto energético del transporte del material y (iii) el gasto energético del secado. Cada uno de estos gastos se detalla a continuación:

Gasto energético por transformación: este tipo de gasto fue solamente calculado al residuo matas de piña, ya que tanto el aserrín como el pinzote provienen de procesos de industrialización, en donde no hubo ninguna transformación para secar. La PL se probó dos procesos (astillados en diferentes longitudes con la ayuda de un astillador o picador y el triturado de las hojas con la ayuda de un molino), entonces el gasto energético por transformación fue calculado para cada uno de ellos. En el caso del astillador fue medido la cantidad de diesel que consume el tractor agrícola en el proceso de astillar las matas de piña durante una labor de 8 horas. Para ambos casos, el gasto energético en el proceso de transformación se determinó con la relación entre el consumo de energía y el peso del material preparado (Ecuación 2). En el caso del diesel se utilizó la información técnica del diesel comercializado en Costa Rica (RECOPE, 2011) que corresponde a un factor de densidad de 0,85876 Kg por cada litro de este combustible y de calor de combustión de 42900 KJ por cada Kg.

El gasto energético en el triturador fue medido colocando en la entrada principal del panel de control eléctrico del molino un medidor de consumo eléctrico, la cual daba directamente la cantidad de energía (en Kwh) durante el proceso de triturado.

$$\text{Gasto energético en transformación en astillador} \left(\frac{KJ}{Kg} \right) = \frac{\text{Consumo de diesel (litros)} \cdot 36840.375 \left(\frac{KJ}{litro} \right)}{\text{Masa del material procesado (kg)}} \quad (2)$$

Donde:

36840.375 representa la constante de pasar la capacidad calórica del diesel (42900 KJ/Kg) a litros, utilizando una densidad de 0.85875 g/cm³.

Gasto energético en transporte: fue aplicado para cada uno de los residuos. Se tomaron en cuenta factores como la densidad aparente de los materiales y el consumo de combustible por cada kilómetro recorrido. La densidad aparente de los materiales fue calcula pesando 5 muestras de un volumen conocido, con esta información se obtuvo la relación existente entre el peso y el volumen medidos. Una vez obtenido el valor de densidad aparente, se estableció la cantidad de material por peso (Kg). El material fue transportado en un countaneir de una

capacidad de 33 m³ (5,9 m de largo, 2,35 m de ancho y 2,40 m de alto). Por otro lado, se tomaron en cuenta las distancias desde donde se transportó cada material: en el caso de la piña se transportó a 150 km, el aserrín 140 km y el pinzote 116 km. El consumo de combustible, en este caso diesel, se midió la cantidad en litros consumido por el camión en transportar el 33 m³ en las distancias establecidas anteriormente. Luego el consumo en diesel fue transformado a la cantidad de energía gastada en el transporte, utilizando la densidad de 0,85876 Kg por cada litro de este combustible y de calor de combustión de 42900 KJ por cada Kg (RECOPE, 2011). Finalmente el consumo de energía por en transporte fue calculado por la ecuación 3.

$$\text{Gasto energético en transporte } \left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right) = \frac{\text{Consumo de diesel (litros)} \cdot 36840.375 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{litros}}\right)}{\text{densidad aparente del material } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot \text{capacidad de transporte (m}^3\text{)}} \quad (3)$$

Donde:

36840.375 representa la constante de pasar la capacidad calórica del diesel (42900 KJ/Kg) a litros, utilizando una densidad de 0.85875 g/cm³.

La capacidad de transporte es de 33 m³

Gasto energético por tipo de secado: El consumo eléctrico, medido en kilovatios por hora (kwh), para el secado de cada residuo fue determinado en el secado solar y secado convencional. Para ello fue colocado, en la entrada principal de la corriente eléctrica un medidor digital marca Schneider Electric®, modelo PM200, que mide directamente del consumo en Kwh. El consumo fue observado en este medidor en cada momento que fueron pesadas las muestras testigo y fue anotado. El cálculo del consumo eléctrico fue determinado de dos formas: (i) el gasto total al final del secado y (ii) el gasto energético en los diferentes CH. Estos consumos de energía fueron calculados en los diferentes tiempos de secado y estos valores fueron expresados por kilogramo de material o residuo. Para esto se utilizó el consumo acumulado en kwh de cada una de la mediciones y se dividió entre el peso (kg) del material al contenido de humedad del momento de la medición. Además de estudiar la variación del gasto energético en relación al CH, se presenta el gasto energético total en el secado.

2.9. Ganancia energética

Este parámetro energético fue medido por el poder calórico en diferentes grados de humedad. Para realizar dicho ensaya los diferentes residuos en condición verde fueron molidos para obtener aproximadamente 100 gramos del material con un tamaño menor a 0,6 mm. Después, las muestras fueron pasadas a través de dos mallas de 0,25 mm y 0,42 mm (40 a 60 meshes respectivamente) y fue seleccionado el tamaño de partículas colectadas entre la malla de 40 y 60 mesh. Este material esparcido se secó a una temperatura ambiente por 15 horas hasta alcanzar la humedad de equilibrio. Durante el secado, cada 30 minutos fueron extraídos aproximadamente 8 gramos de muestras, esto permite tener la variación del poder calórico en relación a los diferentes grados de humedad del material. Entonces, las muestras fueron divididas en dos partes: 1 gramo para la determinación de contenido de humedad y tres

muestras de 2 gramos cada para la determinación del poder calórico. El poder calórico se basa en la determinación de la cantidad de energía total que un material orgánico emite, en este caso se determinó usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 (ASTM, 2003).

2.10. Balance energético

Se estableció el gasto energético total a determinado MC por cada unidad de peso de material seco (Ecuación 4). Primeramente, fue modelada la relación matemática entre el consumo energético por secado por unidad de peso del residuo (kwh/kg) y el MC. Los datos utilizados fueron los obtenidos en el momento de llevar el control de contenido de humedad y llevar el control de consumo eléctrico. El modelo usado en esta relación fue de tipo una polinómica ($Gasto\ energético = \beta_1 MC^3 + \beta_2 MC^2 + \beta_3 MC + \beta_4$) para GAD y EFB en los secados SD y HAD, y PL en el HAD, y de tipo logarítmica ($Gasto\ energético = \beta_1 \ln(MC) + \beta_2$) para PL en el SD. Posteriormente, para calcular el gasto energético total en cada MC se le agregó el gasto energético del proceso de transformación y el gasto energético de transporte (Ecuación 4).

$$GE\ total\ \left(\frac{KJ}{Kg}\right) = GE\ transformación\ \left(\frac{KJ}{Kg}\right) + GE\ transporte\ \left(\frac{KJ}{Kg}\right) + GE\ de\ secado\ a\ MC\ \left(\frac{KJ}{Kg}\right) \quad (4)$$

Donde:

GE: gasto energético

MC: contenido de humedad

Por otro lado, en el cálculo de la generación del energía del residuo fueron utilizados los valores de poder calórico obtenidos en la prueba calorimétrica de Parr's (ASTM, 2003) a los diferentes contenidos de humedad. Esto generó una ecuación de tipo $GE = ax + d$. Posteriormente, fue calculada la generación de calor en los mismos MC que fueron establecidos para el gasto energético. Finalmente el balance energético fue calculado para los diferentes contenidos de humedad por la diferencia entre la ganancia y el gasto energético (Ecuación 5).

$$Balance\ energético\ \left(\frac{KJ}{Kg}\right) = Ganancia\ energética\ \left(\frac{KJ}{Kg}\right) - Gasto\ energético\ \left(\frac{KJ}{Kg}\right) \quad (5)$$

2.11. Punto crítico de secado

Con el fin de establecer aquel contenido de humedad donde ocurre una inflexión en el gasto energético, se aplicó un análisis de regresión lineales de tipo $Y = ax+b$ en dos segmentos. Un primer segmento corresponde al rango de contenido de humedad más alto, hasta un contenido de humedad donde la pendiente de la recta no sufre cambio alguno. El segundo segmento de la recta corresponde al MC donde finalizó el primer segmento hasta el 0% de MC, el punto donde se interceptaron los dos segmentos es llamado punto crítico de secado.

2.12. Propuesta de secadora solar portátil

La secadora es de tipo portátil (Figura 3a) y diseñada para utilizar los materiales que comúnmente se encuentran en las casas de distribución de materiales de construcción. La secadora cuenta con dimensiones máximas de 300 cm ancho, 170 cm profundidad y 186 cm de alto (Figura 4a y 4b) y puede ser transportada y ensamblada en cualquier sitio. La secadora está conformada por dos paredes, cuatro puertas, un techo plegable, una base y piso de madera, una loma que funciona como bafle y un colector solar metálico. Además, cuenta con dos abanicos para hacer circular el aire y un deshumidificador para disminuir la humedad relativa (HR) dentro de la cámara. De forma general se tiene que:

Base y piso: se construyó una base de madera para colocar encima el piso fabricado (Figura 4c).

Paredes: están construidas con madera, fibra de vidrio (aislante) en la parte interna, láminas de zinc liso en la parte exterior e interior. En una de las paredes se construyeron cuatro ventanas (40 cm de ancho por 40 cm de alto) para poder intercambiar aire dentro de la cámara. En estas se instalaron sistemas convencionales de celosías para abrir y cerrar.

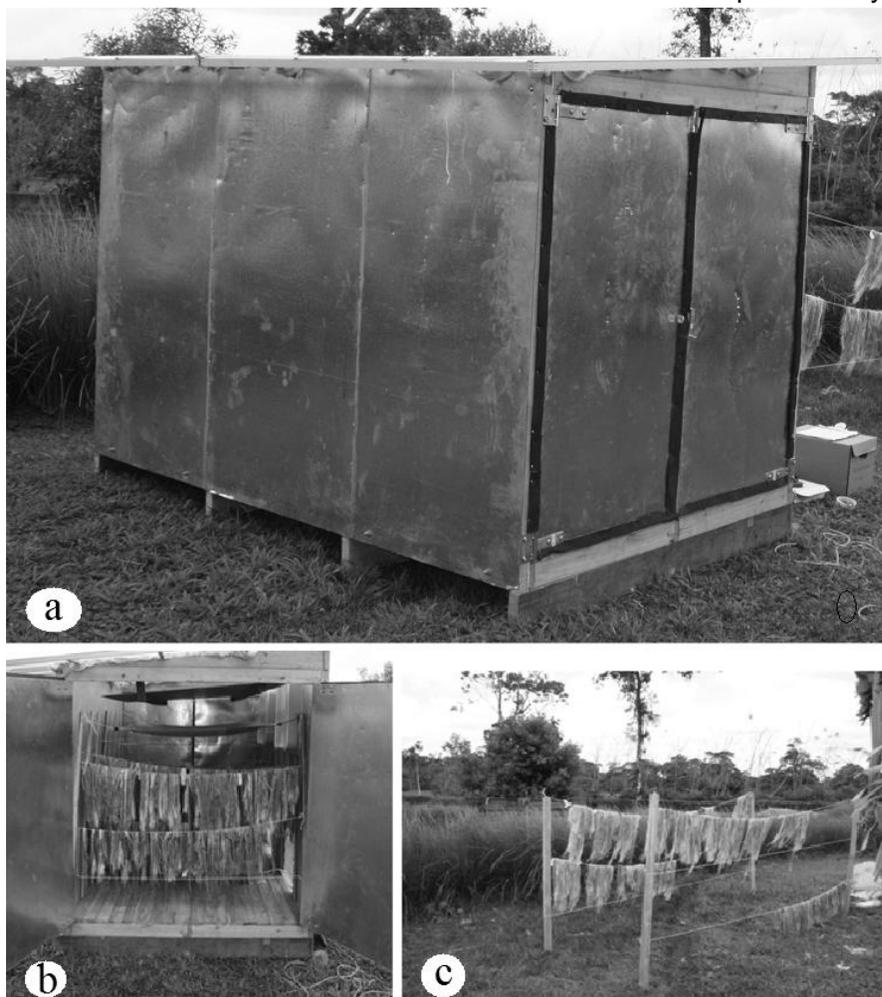


Figura 3. Vista general de modelo de secadora portátil construido para el secado de fibra de piña (a), colocación de las muestras de fibra de piña dentro de la secadora (a) y al aire libre (b).

Techo: fabricado con tubos de aluminio y con láminas de policarbonato de 3 mm de espesor, fue diseñada para poder plegarse en dos mitades para facilitar su manipulación y transporte y se construyó un cuadrícula para darle mayor soporte y resistencia (Figura 4d).

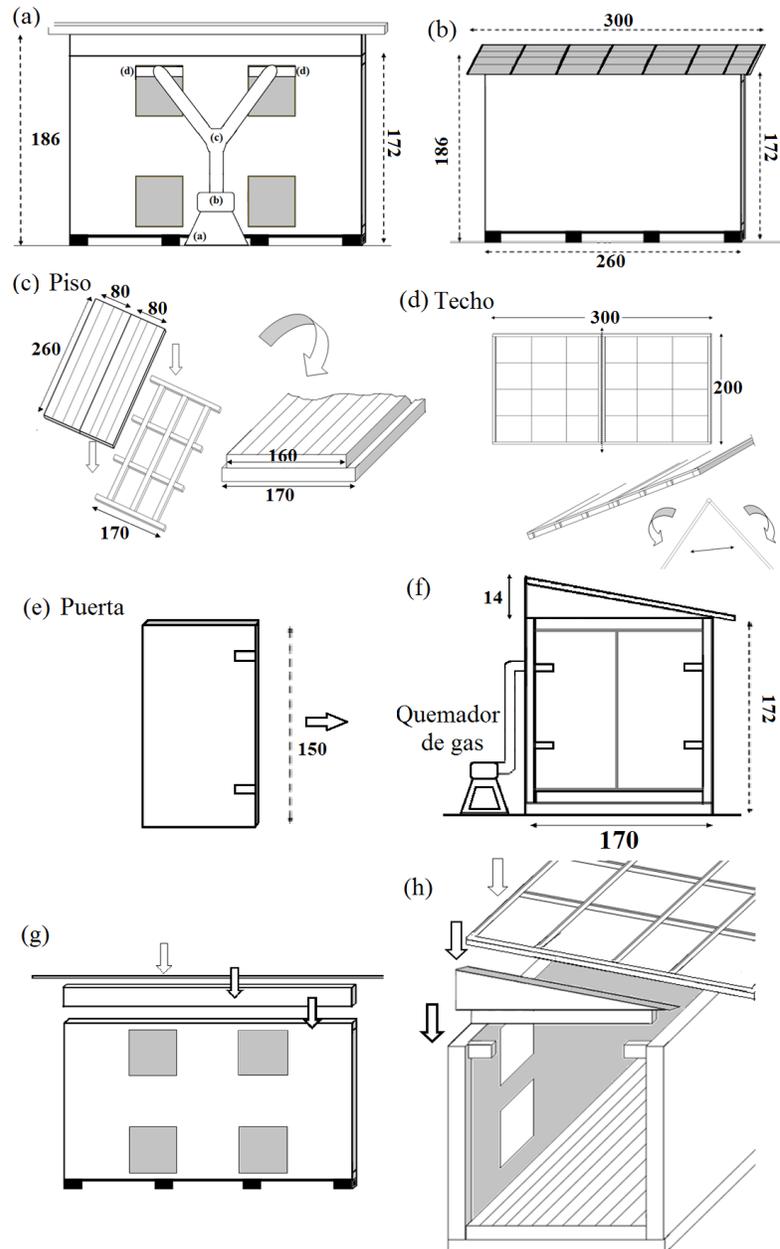


Figura 4. Diagrama del ensamblaje de la secadora portátil (a y b), (b) vista posterior de ventilas y sistema de inyección de calor, (c) piso de madera fabricado en dos secciones, (d) techo de secadora, (f) puerta (f) sistema de inyección de calor (caja del quemador, turbina extractora y tubería) vista lateral, (g) esquema de ensamblaje delantero y (h) esquema de ensamblaje lateral.

Puertas: externa e internamente están forradas con láminas de zinc lisas y dentro de la estructura se aislo con fibra de vidrio. Las puertas son removibles (Figura 4e y 4f).

Ensamblaje de la secadora: primeramente se coloca la base de madera nivelada, para luego colocar las dos partes del piso (Figura 4a). Luego las paredes se sujetan con tornillos, luego se instalan dos conectoras hechos de madera. Seguidamente se colocan las bases de los colectores solares, que deben ser colocados antes de la instalación del techo (Figura 4g). Antes de concluir, el techo que se coloca encima y se atornilla a las platinas metálicas ubicadas en las paredes. Para finalizar se colocó fibra de vidrio en las aberturas que existen entre el techo y las paredes para evitar la fuga de calor y se colocan las puertas de la secado (Figura 4h).

Parte interna de la secadora: dentro de la secadora se coloca una lámina de hierro pintada de negro (Figura 5a) y soportados por dos barras (Figura 5d). Debajo de los colectores se encuentra una lona que tiene la función de baffle (Figura 5e), para re-direccionar las corrientes de aire dentro de la cámara de secado. Dos abanicos (Figura 5c), se encuentran cerca de las ventilas en la parte superior y estos apuntan a los colectores solares, para formar una corriente de aire.

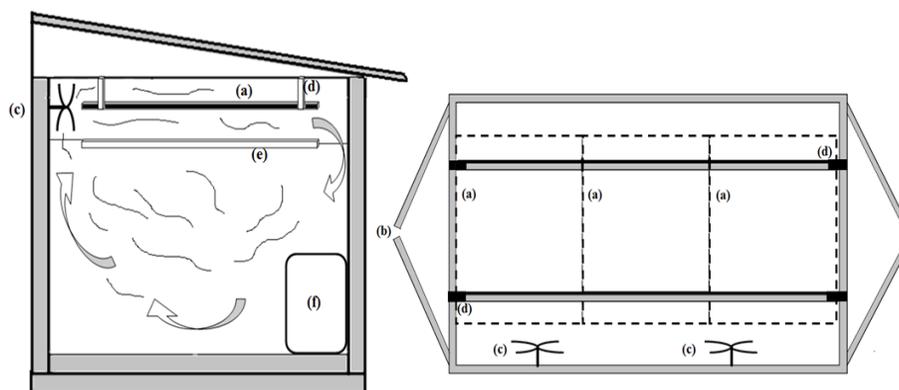


Figura 5. Diagrama de la parte interna de la secadora (a) colector solar, (b) puertas, (c) abanicos, (d) angulares metálicos, (e) baffle y (f) deshumidificador.

Control de humedad relativa y temperatura: Como solución a la alta humedad relativa en las condiciones de Costa Rica se plantea el uso de un deshumidificador (Figura 5f) que puede funcionar con un panel solar. En cuanto a la baja temperatura, se diseñó un método de inyección de calor (Figura 4d), el cual consiste de un quemador de gas que puede utilizar gas licuado de propano (LPG) o bien adaptarse para biogás.

2.13. Evaluación de la eficiencia de la secadora con fibra de piña

Cuatro pruebas de funcionamiento en cuatro sitios de Costa Rica con diversas condiciones climáticas fueron realizadas. La evaluación de la eficiencia consideró: (i) temperatura (TI) y humedad relativa (HRI) dentro de la cámara, (ii) temperatura y humedad relativa externa (TE y HRE, respectivamente), (iii) radiación solar directa e indirecta (RSD y RSI, respectivamente). En relación al secado de la fibra se evalúa: contenido humedad (CH) y tiempo de secado (TS)

y finalmente esta eficiencia en el secado fue comparada con el secado de la fibra en un secado natural o al aire.

Medición de la temperatura, humedad relativa dentro y fuera de la cámara y radiación:

las mediciones de las variables ambientales se realizaron en intervalos de 30 minutos. En las mediciones de TI, TE y HRI se utilizó un higrómetro (Marca Shack, modelo Cat No 63-1032). La determinación de la HRE se utilizó una estación meteorológica portátil (Kestrel 3000). La medición de la RSD y RSI se utilizó un Piranómetro (Marca Daystar's, modelo DS-05A). Las mediciones de RSD fue colocado en instrumento perpendicular a los rayos solares, mientras que la RSI se colocó el instrumento en el techo de la secadora con la misma inclinación y posición del techo de la secadora.

Sitios de estudio y condiciones para el secado: en todos los sitios se buscó un sitio plano y un espacio abierto. La secadora se ubicó en dirección norte-sur (sección más alta-sección más baja) para contar con la mayor radiación solar. Seguidamente se detalla el orden y las condiciones con que fueron realizadas las pruebas de secado:

- Río Cuarto de Grecia- Alajuela (10°26'09 N y 84°14'58 O) llevada a cabo entre el 16 y 17 de febrero, los abanicos se colocaron en el suelo de la cámara de secado y no se utilizó el deshumificador para controlar la humedad interna. Las ventilas se abrieron y cerraron de acuerdo a la humedad interna de la cámara para controlarla.
- Guácimo-Limón (10°10'25 N y 83°41'10 O) y Buenos Aires- Puntarenas (9°12'07 N y 83°28'19 O), los abanicos se colocaron en la parte superior de la cámara y se utilizó el deshumificador para controlar la HRI y se dejaron de abrir las ventilas.
- Cartago en campus del Instituto Tecnológico de Costa Rica-Cartago (9°50'59N y 83°54'37 O), los abanicos se colocaron en la parte superior, el deshumificador en la parte inferior (Figura 5f) y se implementó el sistema aire caliente con él quemador de gas LPG (Figura 4d).

Material a secar: la fibra de piña fue extraída utilizando una máquina similar a la utilizada para la extracción de fibras de cabuya (<http://www.youtube.com/watch?v=AWBg80ZSUQU>). La evaluación del secado se hizo durante un día de trabajo, comprendido de 6:00 am a las 2:00 pm. En ese periodo cada 1 ó 2 horas fueron extraídas 6 muestras con un peso que variaba de 250 a 350 g con el fin de evaluar el secado en diferentes horas del día. La muestra se dividía en dos lotes, una para evaluar la secadora solar y la otra para el secado al aire, que servía como testigo.

Variación del contenido de humedad y tiempo de secado: las muestras de fibras fueron pesadas a ciertos lapsos de tiempo. Cuando la temperatura estaba sobre 26°C, se pesaba cada hora, pero si la temperatura era menor a 26°C la muestra se pesaba cada 2 horas. Una vez que las muestras alcanzaban su peso constante en la cámara y al aire se concluía el secado. Posteriormente estas muestras se colocaron en un horno a 103 °C por 24 horas para luego determinar el contenido de humedad (Ecuación 6). El tiempo de secado (TS) fue calculado en la cantidad de tiempo que tardaron las muestras en alcanzar el 15% de CH.

$$\% \text{ Contenido de Humedad} = \frac{\text{Peso Verde} - \text{Peso Seso al Horno}}{\text{Peso Verde}} * 100 \quad (6)$$

Colocación del material dentro y fuera de la cámara: el material se colocó en dos condiciones: dentro de la secadora y fuera de la cámara, este último llamado natural. Dentro y fuera de la cámara las muestras se acomodaron en tendedores de nylon (Figura 3b y Figura 3c).

2.14. Análisis estadísticos

Se realizó un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para el MCi, MCf, cantidad de secado en días y gasto energético al final del secado. Así mismo se comprobó que dichas variables cumplieran con 2 suposiciones de la distribución normal: homogeneidad de la variancia y la no presencia de datos extremos. Posteriormente, se aplicó a cada uno de estos parámetros evaluado, un análisis de varianza para probar las diferencias entre los distintos tipos de secado para cada residuo. La existencia de diferencias significativas entre las medias de cada una de la especies fue verificada mediante la prueba de Tukey ($P < 0,01$).

Por otro lado, para evaluar la eficiencia de la secadora portátil se calculó el cambio de temperatura (ΔT) entre la TI y TE y posteriormente se aplicó un análisis de regresión para correlacionar este parámetro con TE, RSD y RSI.

3. RESULTADOS

3.1. Contenido de humedad de los desechos en los 3 sistemas de secado

El contenido de humedad inicial (MCi) para cada tipo de residuo varió de 41,8% a 47,1% para GAD, de 47,7% a 53,9% para EFB y de 87,6% a 79,9% en el caso de la PL (Cuadro 1). Los valores más altos de MCi los presentó PL en las diferentes condiciones de secado (sobre 79%), seguidas de EFB (sobre 47%), y el de mejor MCi fue en GAD con MC menores al 47% (Cuadro 1).

En lo referente al MCi para cada tipo de residuo, se encontró que este fue estadísticamente (valor $p > 0,05$) igual en los diferentes tipos de secado practicados, a excepción de EFB y PL de 2 cm con estrías y 10 cm, donde se presentó diferencia estadística (valor $p < 0,05$) entre el SD y HAD para EFB, entre el AD y HAD para la PL de 2 cm con estrías y entre el AD y SD para PL de piña de 10 cm (Cuadro 1).

En lo referente al MCf, se encontró que este varió de 2,2% a 13,9%, siendo el valor más bajo para el SD de PL de 2 cm con estrías y el más alto en GAD en AD (Cuadro 1). Los diferentes tipos de secado aplicados a estos residuos dieron MCf estadísticamente iguales en EFB (en promedio de 6,6%), en PL cortada a 6 y 10 cm (en promedio 6,0% y 8,1% respectivamente), y cuando la mata es pasada por un molino (en promedio 4,0%). En tanto fue encontrada una diferencia estadística en PL cortada a 2 cm de largo aplicando o no ruptura de la cutícula. El AD dio un MCf estadísticamente mayor (valor $p < 0,05$) que el SD, pero estadísticamente igual

que HAD (valor $p > 0,05$) en PL con estrías y largo de 2 cm. Así mismo, el AD dio un MCf estadísticamente mayor (valor $p < 0,05$) que el SD y el HAD, siendo estos dos últimos secados estadísticamente iguales, en el caso de PL de 2 cm sin estrías (Cuadro 1).

Los residuos analizados provienen de plantas, en las cuales para la formación de celulosa es necesaria la utilización de agua, lo que hace que esta sea un componente natural en ellas (McKendry, 2002). Pero la cantidad de agua necesaria varía con el tipo de planta (John and Thomas, 2008), situación que fue comprobado con los residuos analizados. PL fue el residuo con mayor humedad, seguido del GAD y por último el EFB. En el caso de PL por tratarse de un planta de haces fibrosos “bundles fiber” posee dentro de su estructura pocos cúmulos de fibras y un alto tejido de parénquima (Bismarcka et al., 2005), que es tejido donde se almacena el agua, lo que produce un MC más alto, en tanto que el EFB por tratarse de una Arecaceae posee una estructura conformada por haces vasculares, la cual presenta un contenido moderado de tejido de parénquima (Weiner and Liese, 1990), por su parte la madera se caracteriza por presentar en su estructura un tejido celular fibroso (Skaar, 1994), por lo que presenta menos espacios libres para almacenar agua y por lo tanto el MCi es menor en relación a los otros residuos.

Las diferencias encontradas de MCi en EFB, PL de 2 cm con estrías y PL de 10 cm de largo en los diferentes tipos de secado, (Cuadro 1) pueden ser explicadas por que las muestras utilizadas en el AD y SD fueron recolectados en tiempos diferentes, con respecto al material utilizado en el HAD. El más bajo MCi en la planta de piña molida en relación a PL de diferentes largos (Cuadro 1) es atribuido a que la planta es molida y triturada, y durante este proceso se pierde o se elimina una proporción del agua contenida en las PL.

En relación al MCf, en todos los tipos secado se alcanzó MCf inferior a 8%, a excepción de GAD en AD, donde se alcanzó el MCf más alto (Cuadro 1). Esta diferencia puede explicarse por que el contenido de humedad de equilibrio (EMC) de cada tipo de secado es diferente. El HAD presentó condiciones de EMC de 4%, mientras que el SD presentó un EMC de 8% aproximadamente para el sitio en donde se realizó, en tanto que las condiciones al medio ambiente en el AD fueron de entre 13-16% EMC. En la estructura celular y los constituyentes químicos de la madera o el aserrín se establece un equilibrio con el EMC del medio, alcanzando en este caso un MCf en base seca aproximadamente similar al EMC del medio (de 13,9% en base humedad equivalente 26,7%). En el caso de PL o EFB se observa que el MCf es inferior a 8% en este tipo de secado, sin embargo si se utiliza el MC calculado en base seca y no en base humedad como el presente estudio, sí se obtienen MCf similar al GAD, de 12,4% y 50%, para el EFB y PL, respectivamente. Estos resultados muestran que en el caso de PL y EFB la proporción del peso seco es muy baja en relación al peso húmedo, por lo que es de esperar bajos MCf.

3.2. Tiempos de secado en los 3 sistemas de secado

Como era de esperarse los tiempos de secado para los 3 tipos de residuos fueron mayores en AD, seguido por el SD y finalmente el HAD. En el AD, al secar las PL en longitudes de 2 a 10 cm produce los tiempos de secado más extensos (de 342 a 222 horas), pero cuando la planta

de piña es procesada por un molino, el tiempo de secado al aire se reduce a 123 horas. Se observó que al realizar pequeñas incisiones en PL para permitir el flujo de agua por la cutícula no influyó en el tiempo de secado al aire, en relación con las muestras sin incisiones. En el caso de GAD los tiempos de secado al aire son mayores que los obtenidos para EFB, siendo los de EFB similares a los obtenidos en PL cortadas (Cuadro 1). En el AD, el menor tiempo se obtuvo para las PL molidas (Cuadro 1), con 123 horas, y un MCf de 4,75%.

En el SD, se presentó el mismo comportamiento de AD, las PL cortadas en longitudes de 2 a 10 cm produjeron tiempos de secado de 125 a 167 horas, pero si las hojas son molidas este tiempo se redujo a 76 horas (Cuadro 1). En tanto, que el rompimiento o hacer estrías sobre la cutícula, no aumenta o disminuye el tiempo de secado de PL, ambos tiempos de secado fueron de 125 horas (Cuadro 1). El tiempo de secado del GAD, en SD, fue mayor que tiempo de secado del EFB con 150 y 92 horas, respectivamente.

En HAD, el tiempo de secado de la PL de 2 cm con estrías (26 horas) fue menor en relación con las otras longitudes (2 cm, 6cm y 10 cm) y muy similar al obtenido cuando la planta de la piña es molida (Cuadro 1). A su vez, un aumento en la longitud de corte de PL, aumenta el tiempo de secado por este método, la longitud de 2 cm se secó en 33 horas, en tanto las longitudes de 6 y 10 horas alcanzaron un tiempo de secado de 50 horas. El tiempo de secado del GAD fue mayor que el EFB, fue similar a los tiempos obtenidos en la PL con estrías y las horas de la planta de piña molida, pero de menor tiempo de secado en relación a la PL cortada en longitudes de 2, 6 y 10 cm. El EFB fue el residuo que presentó el menor tiempo de secado en HAD (Cuadro 1).

Cuadro 1. Contenido de humedad inicial (MCi), final (MCf), tiempo y consumo energético del secado, obtenidos en los diferentes tipos de residuos.

Residuos	Tipo de secado	MCi (%)	MCf (%)	Tiempo de secado (horas)	Consumo (kwh/kg)	
Aserrín	Aire	47,1 ^A (7,1)	13,9 ^A (1,2)	220 ^A	-	
	Solar	41,9 ^A (3,5)	4,9 ^B (0,7)	150 ^B	0,22	
	Convencional	46,4 ^A (2,2)	6,6 ^B (0,4)	27 ^C	0,20	
Pinzote	Aire	51,0 ^{AB} (0,6)	6,1 ^A (0,6)	147 ^A	-	
	Solar	53,9 ^A (4,4)	7,9 ^A (4,3)	92 ^B	0,36	
	Convencional	47,8 ^B (2,0)	5,9 ^A (1,8)	23 ^C	0,28	
2 cm (estrías)	Aire	87,4 ^A (0,3)	5,4 ^A (1,8)	222 ^A	-	
	Solar	87,0 ^{AB} (0,4)	2,2 ^B (1,6)	125 ^B	1,87	
	Convencional	86,4 ^B (0,3)	4,8 ^{AB} (1,0)	26 ^C	1,10	
2 cm	Aire	86,8 ^A (0,5)	5,7 ^A (0,9)	222 ^A	-	
	Solar	86,7 ^A (0,2)	2,8 ^B (1,6)	125 ^B	1,46	
	Convencional	86,1 ^A (0,4)	3,2 ^B (1,0)	33 ^C	1,37	
Piña	6 cm	Aire	86,5 ^A (1,2)	6,9 ^A (2,2)	314 ^A	-
		Solar	86,1 ^A (0,6)	5,7 ^A (0,6)	167 ^B	1,57
		Convencional	86,4 ^A (0,4)	5,5 ^A (2,0)	50 ^C	1,68
10 cm	Aire	87,6 ^A (0,2)	7,7 ^A (1,3)	342 ^A	-	
	Solar	85,9 ^B (0,3)	7,9 ^A (1,4)	167 ^B	1,76	
	Convencional	86,6 ^{AB} (0,8)	8,7 ^A (1,4)	50 ^C	1,90	
Molida	Aire	79,9 ^A (1,0)	4,8 ^A (0,4)	123 ^A	-	
	Solar	80,7 ^A (0,7)	2,6 ^A (1,4)	77 ^B	0,78	
	Convencional	80,5 ^A (1,1)	4,8 ^A (3,2)	28 ^C	0,89	

Se observó que el tiempo de secado está relacionado con la temperatura en los 3 sistemas de secado. El mayor tiempo se obtuvo en HAD, seguido de SD y finalmente por AD, (Cuadro 1). La diferencia en los tiempos de secado puede ser explicada debido a que a una mayor temperatura se reduce rápidamente el MC como consecuencia de una mayor evaporación de la humedad y de la velocidad de movimiento del agua dentro del material, y por el contrario en las bajas temperaturas se presenta poca evaporación y una menor velocidad del movimiento del agua en la parte interna de los materiales (Hasibuan y Wan Daud, 2004). De acuerdo con esto es de esperar en AD se presenten los mayores tiempos de secado para todos los residuos. Así mismo, el SD presenta temperaturas inferiores al HAD y por tanto presenta un mayor tiempo de secado.

Se observó también que hay una tendencia entre largos tiempos de secado y altos MCi. Las PL con altos valores de MCi presentaron un mayor tiempo de secado en todos los secados (Cuadro 1). Sin embargo, este comportamiento no se presentó en el EFB. Estas diferencias pueden ser producidas por la morfología de las partículas que conforman cada tipo de

residuo. El EFB posee una densidad aparente de 70 kg/m³ y largos de fibras de 6 cm a 9 cm, lo que permite una mayor circulación de aire, la cual no sucede en el aserrín que es un material granulado y más compacto (densidad de 158 kg/m³).

Los tiempos de secado más largos en PL se deben a que la hoja posee tejidos especializados que evitan la pérdida de humedad, específicamente la cutícula, la cual es un tejido de protección (Krauss, 1949; Bartholomew et al., 2003) y resistente al agua (Py et al., 1987). Este tejido es el que produce que la pérdida de humedad durante el secado sea lenta en PL, provocando un mayor tiempo de secado. De forma tal, que para favorecer la eliminación de agua en el caso de las PL es necesario realizar algunas modificaciones como las siguientes:

1. Incisiones en la cutícula de hoja (estrías) que ayudan a que el agua se elimine de la superficie sin la barrera impermeable. Sin embargo, en secados lentos, de baja temperatura como el AD o SD, este tipo de incisiones no favorecieron los tiempos de secado, ya que no se encontraron diferencias estadísticas entre las hojas con y sin incisiones. Por otro lado, en el secado convencional las estrías practicadas en PL disminuyeron el tiempo de secado en 7 horas en relación a las hojas sin estrías del mismo tamaño (Cuadro 1).
2. Disminuir el largo de la hoja: los resultados mostraron que al disminuir el largo de la hoja se disminuye también el tiempo de secado (Cuadro 1), esto porque facilita el flujo del agua en el sentido longitudinal, evitando que el agua intente atravesar la cutícula.
3. Molido y triturado de las hojas de piña: este procedimiento produce que la cutícula sea completamente rasgada, disminuyendo de esta manera significativamente el tiempo de secado (Cuadro 1). Con la excepción de la hoja cortada a 2 cm con estrías en el secado convencional, la cual presentó un tiempo de secado más bajo que la hoja triturada. De modo que, este resultado es el tratamiento que obtuvo mejores resultados para las hojas de piña, tanto en MCf como en tiempos de secado.

3.3. Gasto energético, su variación y punto crítico de secado

El gasto energético por transformación es aplicado solamente al PL y se determinó que las matas de piña presentan un gasto energético que varía de 0,0406 a 0,0898 kwh/kg, siendo el valor más bajo en PL astillada y el valor más alto en PL triturada (Cuadro 2). En relación al gasto energético en transporte, con material en condición verde, fue mayor para el pinzote, con 0,0947 Kwh/kg, seguido por PL triturada y astillada con 0,0898 Kwh/kg y finalmente el aserrín con 0,0506 Kwh/kg (Cuadro 2).

Cuadro 2. Gasto energético por transporte y transformación para cada tipo de residuo.

Residuo	Gasto energético en transformación (kwh/kg)	Gasto energético en transporte (kwh/kg)
Aserrín	-	0,0506
Pinzote	-	0,0947
Hojas de piña cortadas	0,0898	0,0898
Hojas de piña molidas	0,0406	0,0898

En lo referente al gasto energético total para el SD y HAD se tienen los valores mostrados en el cuadro 1. En él se puede observar que el mayor consumo energético fue para PL de 2 cm con estrías en el SD (1,87 Kwh/kg) y para PL de 10 cm en el HAD (1,90 Kwh/kg). Además otros valores de altos consumos energéticos en el SD se dieron para GAD y EFB PL-2 cm sin estrías con valores de 0,22, 0,36, y 1,46 Kwh/kg respectivamente. Mientras que en el HAD altos consumos energéticos se presentaron en PL de 6 cm y las matas molidas, con 1,68 y 0,89 Kwh/kg, respectivamente (Cuadro 1).

En relación con el consumo energético por secado al disminuir el MC para los 3 tipos de residuos se encontró que al disminuir MC se aumenta el gasto energético; no obstante, existe una diferencia entre los diferentes residuos y los diferentes tipos de secado (Figura 6). En general se observa que el residuo del aserrín y pinzote los valores de gasto de energéticos son inferiores a 0,65 kwh/kg (Figura 6a), pero en el caso de la piña puede alcanzar un gasto de energía cercano a 4 kwh/h (Figura 6c). Así mismo otros de los resultados obtenidos, muestran que en el secado del aserrín utilizando un secado solar presenta valores de gasto energético similares a los encontrados en el secado de aire caliente. En tanto que en el secado del pinzote, se encontró que el secado solar presenta un ligero aumento en el gasto energético en relación al secado en horno con aire caliente (Figura 6a). En el caso de la piña, en el secado en horno con aire caliente se puede observar como las PL de 10 cm presentan los valores más altos de gasto energético, seguidos de las PL de 6 cm y 2 cm, siendo las PL molidas las que presentaron los valores más bajos (Figura 6b). Para el secado solar las PL de 2 cm con y sin estrías son las que presentan los valores más altos de gastos energéticos para el secado, seguidas por las PL de 10 cm, 6 cm y finalmente las PL molidas (Figura 6c).

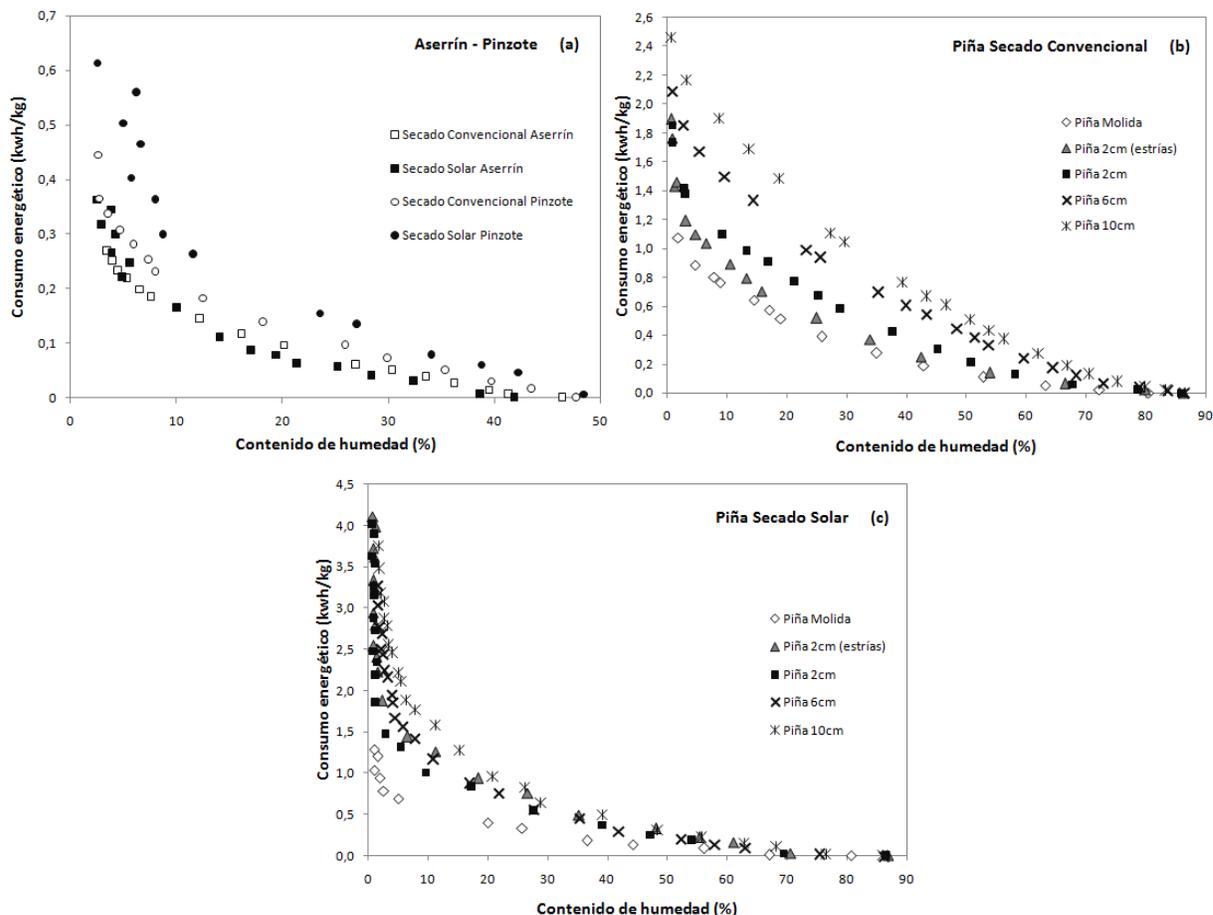


Figura 6. Gasto energético (kwh/kg) para cada residuo por tipo de secado, secado convencional y solar para aserrín y pinzote (a), secado convencional (b) y secado solar para las hojas de piña (c).

Al establecer el modelo de variación del gasto energético con la disminución del MC en los diferentes tipos de residuos, se encontró dos tipos de relaciones: una polinómica ($Gasto\ energético = \beta_1 MC^3 + \beta_2 MC^2 + \beta_3 MC + \beta_4$) para GAD y EFB en los secados SD y HAD, y PL en el HAD, y otra de tipo logarítmica ($Gasto\ energético = \beta_1 \ln(MC) + \beta_2$) para PL en el SD. En el cuadro 3, se muestran los diferentes coeficientes de los modelos, los coeficientes de determinación (R^2) y el porcentaje de error en los diferentes residuos agroforestales y en los dos tipos de modelos.

En general los diferentes residuos presentan R^2 altos (mayor a 0,92), para ambos modelos, a excepción de las PL de 2 cm, que presenta un valor de 0,84, y de las PL de 2 cm con estrías con 0,82 en el modelo logarítmico. El porcentaje de error fue más bajo en los modelos de tipo polinómico (GAD y EFB en los secados SD y HAD, y PL en el HAD) en que los de tipo logarítmico (PL en el SD). En los modelos polinómicos el error varió de 1,13% a 14,27% y de 10,78% a 58,54% para el modelo logarítmico. Siendo los valores de error más altos los presentes en el las PL de 2 cm con y sin estrías con un error de 14,27% y 9,71%

respectivamente para el modelo polinómico, y de 58,54% y 52,48% para el modelo logarítmico. Por otro lado, los porcentajes de error más bajos fueron para el GAD y el EFB en el HAD, los cuales presentan 1,13% y 3,27%, para el modelo polinómico. En el modelo logarítmico el valor más bajo lo presenta las PL molidas con 10,78%.

Cuadro 3. Coeficientes del modelo, coeficientes de determinación y porcentaje de error de la variación del gasto energético y el contenido de humedad para los residuos.

Modelo	Residuos	Tipo de secado	Coeficientes del modelo				Coeficiente de determinación	Error (%)	
			β_1	β_2	β_3	β_4			
Polynomial $\beta_1 MC^3 + \beta_2 MC^2 + \beta_3 MC + \beta_4$	GAD	SD	-0,00**	0,00**	-0,03**	0,42**	0,96	2,50	
		HAD	-0,00**	0,00*	-0,02**	0,31**	0,99	1,13	
	EFB	SD	-0,00**	0,00**	-0,05**	0,64**	0,92	6,50	
		HAD	-0,00**	0,00**	-0,03**	0,44**	0,94	3,27	
	PL 2 cm (estrías)	SD	PL 2 cm	-0,00**	0,00**	-0,08**	1,61**	0,95	14,27
			PL 2 cm	-0,00**	0,00**	-0,06**	1,68**	0,97	9,71
		HAD	PL 6 cm	-0,00**	0,00**	-0,05**	2,01**	0,99	5,93
			PL 10 cm	-0,00**	0,00**	-0,06**	2,41**	0,99	5,85
			PL Molidas	-0,00 ^{NS}	0,00 ^{NS}	-0,02**	0,97**	0,94	9,23
	Logarithm $\beta_1 \ln(MC) + \beta_2$	PL 2 cm (estrías)	SD	PL 2 cm	-0,68**	0,03**	-	-	0,82
PL 2 cm				-0,71**	2,93**	-	-	0,84	52,48
PL 6 cm		SD	PL 6 cm	-0,74**	3,08**	-	-	0,97	19,63
			PL 10 cm	-0,89**	0,02**	-	-	0,97	19,90
PL Molidas		SD	PL Molidas	-0,26**	1,15**	-	-	0,95	10,78

Nota: **estadísticamente significativa a 99%, *estadísticamente significativa a 95% y NS=no significativa. GAD = *Gmelina arborea* sawdust, EFB = empty fruit bunches, PL = pineapple leaf, SD = solar drying, HAD = hot air drying.

En ambos modelos se observa como el gasto energético aumenta con la disminución del MC (Cuadro 3). Sin embargo, esta tendencia es más marcada en el modelo logarítmico de las PL en el secado solar, en comparación con el HAD del modelo polinómico.

Al establecer el punto crítico con el consumo energético, MC donde el gasto energético aumenta en mayor proporción en relación al gasto energético que se presentaba antes del punto crítico, se encontró que:

- En el caso del aserrín el punto crítico tanto para el SD como el HAD es cuando el MC es aproximadamente 10 % (Figura 7a),
- Mientras que para el pinzote este punto es cercano al 11 % del MC para el HAD y de aproximadamente 13% para el SD, valor ligeramente superior al HAD (Figura 7b).
- PL de 2 cm sin estrías, es de 5% para el HAD y MC menor en el SD, con 3% (Figura 7c).
- En las PL de 2 cm con estrías 8% para HAD y 4% para SD, valores muy similares (Figura 7d).
- Para el caso de las PL de 10 cm, 6 cm y molidas no se presentó un punto crítico para el HAD, pero si para el SD con valores de 9%, 9% y 8% respectivamente (Figura 7e,f,g).

El gasto energético por transformación es solamente atribuido a PL, esto porque luego de cosechar éstas deben triturarse o bien astillarse para facilitar el transporte. A diferencia de biomasa de GAD y EFB, estos son los residuos de procesos industriales, los cuales tienen su forma establecida y para su utilización es necesario solo transportar el residuo. Por tanto, la utilización de PL puede convertirse en una actividad de alto consumo de energía, esto porque las operaciones de cosecha y de transporte no solo son demandantes de energía, además de los posibles problemas relacionado a la contaminación que se puede tener durante estas operaciones (Mckendry, 2002).

En relación a los otros residuos, sobre todo en el caso GAD, se tiene el inconveniente que presenta en GAD es la variedad de formas y tamaños (Pang and Mujumdar, 2010), el cual producen variación de los valores encontrados en el presente estudio. Así mismo en este tipo de residuo, si se establece como una fuente de energía, se tener claramente que estos son recogidos de los residuos de los procesos industriales de aserraderos, por lo que no está contemplado el gasto energético de transformación. Gasto que se debe considerar si esta biomasa es producida durante la cosecha de cultivos energéticos.

PL trituradora presentó el doble de consumo energético que PL astillada (Cuadro 2), atribuida a que en el segundo proceso se utilizó un triturador estacionario y adaptado al procesamiento de la caña de azúcar, la cual es de mayor tamaño y longitud. Aunque este proceso presenta un mayor consumo energético en este primer proceso se tiene la ventaja que se facilita el flujo de agua de PL, dando como resultado que las PL triturada presenten menor tiempo de secado y consumo energético total al comparar con la PL astillada (Cuadro 1). Así mismo este tratamiento de PL da como resultado que la variación del consumo energético con el MC sea menor en todos los tipos de secado (Figura 6).

El gasto energético en transporte es relacionado con la forma de la biomasa y la distancia de transporte (Hamelinck et al, 2005) e indirectamente la forma de esta biomasa puede ser estandarizado por la densidad aparente del material. Dicha situación fue comprobada en los resultados obtenidos en el presente estudio. Los valores de gasto energético en transporte mostraron que el menor gasto energético se dio para la biomasa con mayor densidad aparente, el GAD con una densidad aparente de 158 kg m^{-3} . Y por el contrario, el mayor gasto energético se presentó en la biomasa con la menor densidad aparente, que este caso fue las EFB con 70 Kg m^{-3} .

Se ha referido anteriormente que los tiempos de secado fueron más extensos en biomasa con altos MCi (Cuadro 1), dicho comportamiento provoca que para mantener secando esta biomasa se haga necesario contar con energía para llevar a cabo este proceso. Por tanto el aserrín con más bajo MCi, hace que se tenga un menor consumo energético total (Cuadro 1) o bien que durante el proceso secado el gasto energético sea el más bajo de los residuos estudiados en los diferentes contenidos de humedad y en los diferentes tipos de secado (Figura 6). Por el contrario, el mayor gasto energético total (Cuadro 1) y en los diferentes MC (Figura 6) se presentó en la biomasa de piña, gastos que son muy superior a los otros residuos, situación que fue explicada anteriormente por el hecho que PL posee tejidos

especializados que evitan la pérdida de humedad, específicamente la cutícula, la cual es un tejido de protección (Krauss, 1949; Bartholomew et al., 2003) y resistente al agua (Py et al., 1987). Este tejido es el que produce que la pérdida de humedad durante el secado sea lenta en PL, provocando un mayor gasto energético. Sin embargo, el gasto energético puede ser disminuido cuando en la PL se le aplican algún tipo de tratamiento para romper la cutícula en la superficie de la hoja. En nuestro caso, cuando PL fue cortada en cortas dimensiones y se rasga la cutícula haciendo estrías el consumo energético disminuye (Cuadro 1, Figura 6). No obstante, ocurre una importante disminución del gasto energético cuando PL es triturado con un molino, disminuyendo el gasto energético en un 50% en comparación a las hojas no trituradas.

Por otra parte, aunque fue encontrado que el tiempo de secado disminuye con el valor de temperatura usado en la secadora, los resultados mostraron que en el gasto energético no ocurre este comportamiento, es decir, este no disminuye al aumentar la temperatura. El SD, con menor temperatura en relación con HAD, en general fue de mayor consumo energético que en el secado HAD (Cuadro 1), con alta temperatura. Esto indica que el aumento de temperatura por la radiación solar que se produce dentro de la cámara de secado, no llega a alcanzar temperaturas necesarias para evaporar rápidamente presente en los diferentes tipos de biomasa. Dicha situación da resultado a un mayor tiempo de secado y por tanto mayor uso de los abanicos de ventilación, los cuales consumen mayor cantidad de energía. Un aspecto que puede estar afectando el alto gasto energético en SD es que la temperatura de la cámara es irregular y no se producen altas temperaturas. Las mayores temperaturas, cerca a 50 °C, se producen en periodos de tiempo cortos (Figura 2b), dando como adecuados flujos de humedad en la biomasa y por tanto bajos consumo energético.

Por tanto este resultado, alto gasto energético en el SD en relación con HAD, debe ser considera en cuenta en el momento de seleccionar el método de secado, esto por qué uno de los objetivos del secado solar es disminuir el gasto energético con ayuda de fuentes alternas de energía con como la radiación solar (Sharma et al., 2009).

Los resultados del modelo de variación del consumo energético, mostraron que el modelo polinómico propuesto ($Gasto\ energético = \beta_1 MC^3 + \beta_2 MC^2 + \beta_3 MC + \beta_4$) brinda la mejor curva de ajuste para los residuos de GAD, EFB y para PL en el HAD, similar a lo encontrado para la variación del MC con el tiempo en los mismos residuos (Tenorio y Moya, 2012). Dicho modelo difiere a los encontrados en el secado de de muchas frutas y verduras, que se aplica en modelo "Page Model" que es de tipo exponencial ($MC = a * \varepsilon^{-t*b}$) (Tunde-Akintunde y Ajala, 2010). Sin embargo, estos modelos difieren del modelo encontrado para el gasto energético en PL en SD, las cuales presentaban un mejor ajuste con un modelo logarítmico ($\beta_1 \ln(MC) + \beta_2$). Este resultado indica que el SD de PL, tiene un gasto energético totalmente diferente que el encontrado en este mismo residuo, pero secado al natural o a alta temperatura. Específicamente el modelo logarítmico difiere del modelo polinómico en que el primero a MC menor a 10% este gasto energético es muy alto con poco cambio de la humedad del residuo (Figura 6c).

Por otra parte, aunque fue posible establecer los modelos para el gasto energético (en Kwh) para los diferentes tipos de biomazas en los diferentes tipos de secado, se encontró un MC donde el gasto energético tiene un punto de inflexión, donde comienza a aumentar en mayor proporción de cómo se había presentado anteriormente (Figura 6). El agua en células leñosas se presenta de 3 formas: una ocupando los espacios libres y cavidades celulares, una segunda en la pared celular y una tercera ya formando parte de la pared celular de la fibra (Berry y Roderik, 2005). El primer tipo de agua es de más fácil secado y en el segundo por lo general es de más lento secado y por alto demanda mayor cantidad de energía (Berry y Roderik, 2005). El punto de inflexión encontrado en el presente trabajo puede ser explicado por el hecho que de ese MC hacia abajo comienza a salir el agua de la pared celular y por tanto ocurre un mayor gasto energético en el secado.

El punto crítico o MC de inflexión fue diferente para los diferentes tipos de biomazas estudiados. En el aserrín y pinzote, presentaron MC críticos similares en los diferentes tipos de secado. No obstante, en el caso de PL fue diferente, su valor es más bajo que los anteriores tipos de biomasa. Otro aspecto importante de destacar de la tendencia de los consumos, se tiene que en la PL el cambio del consumo energético es de mayor intensidad (mayor pendiente) en relación con los otros tipos de biomasa. Este comportamiento puede ser nuevamente explicado por el hecho de que PL posee una cutícula impermeable que no permite la difusión adecuada del agua (Krauss, 1949; Bartholomew et al., 2003) y resistente al agua (Py et al., 1987).

El uso práctico de conocer el punto crítico es que este nos permite establecer un punto de mayor eficiencia energética. Si es necesario, secar esta biomasa a un MC inferior al punto crítico se debe tener muy presente que el gasto energético es alto. Además, por debajo de ese valor de MC, el cambio de 1 porcentaje (%) en la humedad, conllevará a un alto consumo de energía.

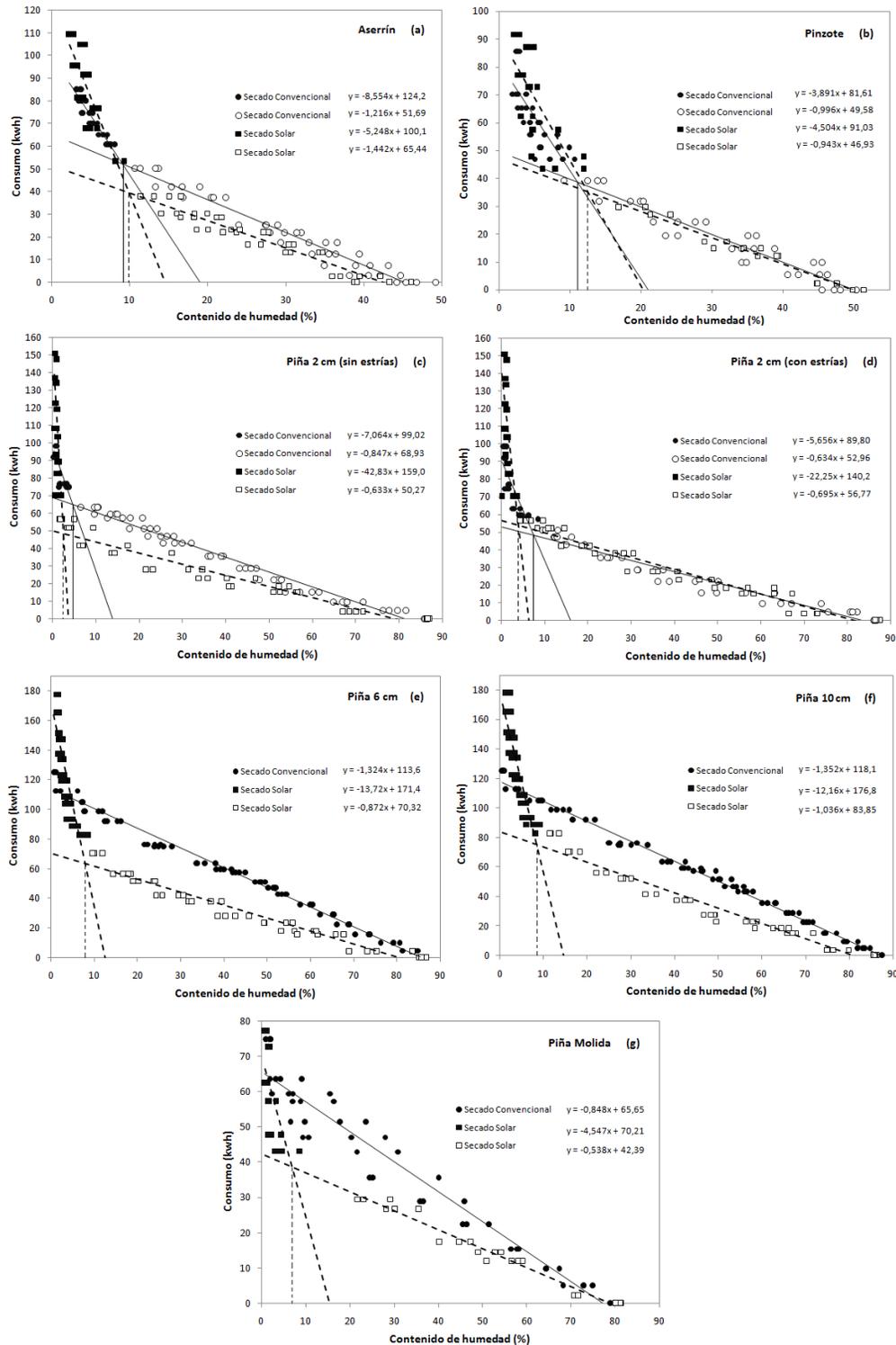


Figura 7. Punto crítico en el consumo (kwh) eléctrico del secado convencional y solar para aserrín (a), pinzote (b) y hojas de piña de 2 cm con estrías (c), sin estrías (d), cortadas en 6 cm (e), 10 cm (f) y las hojas de piña trituradas (g).

3.4. Balance energético

La variación del poder calórico con el MC para cada tipo de residuo se muestra en la figura 8. Para el aserrín de *G. arborea* el poder calórico máximo o al 0% de MC fue de 4,5 kwh/kg (Figura 8a). Para el pinzote el valor del poder calórico máximo fue de 5 kwh/kg (Figura 8b). Y finalmente para las hojas de piña fue de alrededor de 4,7 kwh/kg (Figura 8c). Para los tres tipos de residuos se puede observar como el valor del poder calórico disminuye conforme aumenta el MC.

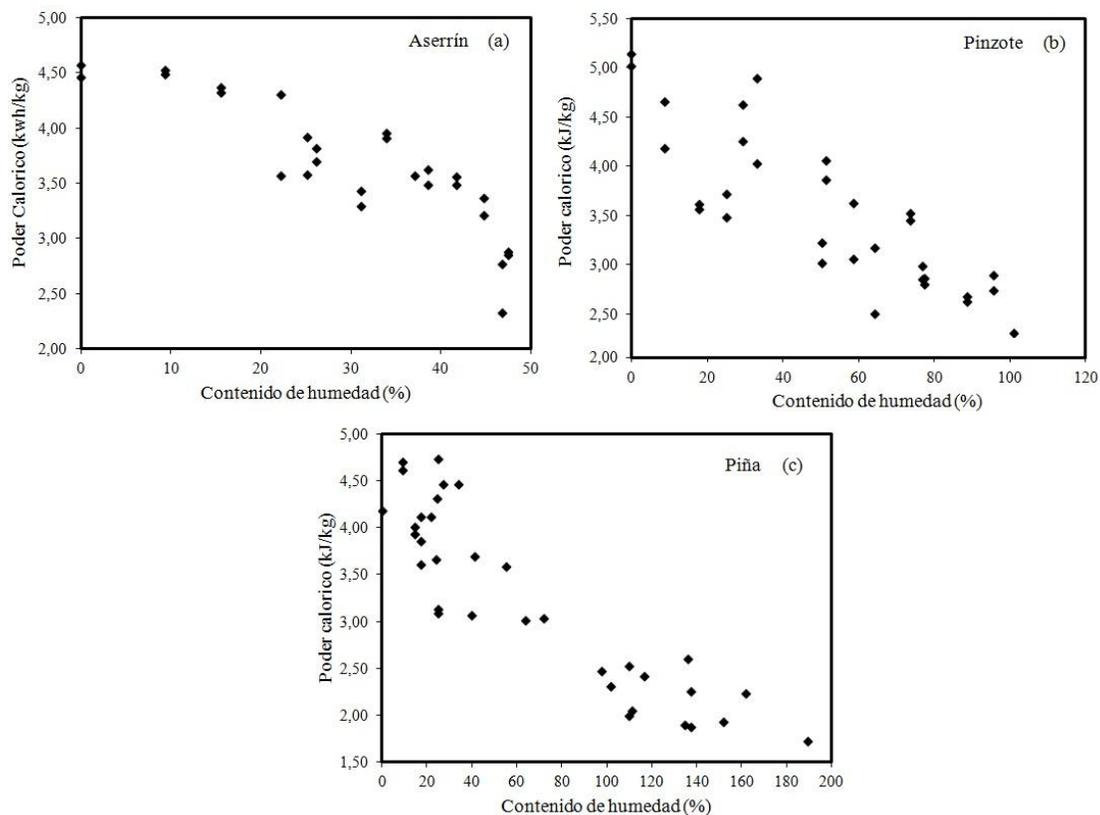


Figura 8. Variación del poder calórico con el contenido de humedad para cada tipo de residuo.

La variación del balance energético ocurrido durante el secado de los diferentes tipos de residuos es presentado en la figura 9. En términos generales el comportamiento de la ganancia energética al disminuir MC es diferente para cada tipo de secado y cada tipo de residuo.

En el caso del HAD de PL, desde la condición verde (60-70%) hasta un MC equivalente a 20% el gasto energético aumenta levemente, posterior a ese valor el balance energético disminuye entre 2 y 3 kwh/kg; no obstante, esta disminución es leve en la piña molida (Figura 9). Pero en el caso del aserrín y el pinzote este comportamiento fue diferente, el balance energético aumentó al disminuir el MC (Figura 9a). Los diferentes tratamientos de la PL, mostró que en PL molida la mayor ganancia energética se da al 25% de MC con 3,35 Kwh/kg,

en el caso de PL de 2 cm, la mayor ganancia se da a un 35% con 3,21 Kwh/kg, en la PL de 2 cm con estrías al 20% con 3,39 Kwh/kg, PL de 6 cm se produce al 50% para con 2,99 Kwh/kg y finalmente el PL de 10 cm la máxima ganancia se da al 60% para PL con una ganancia de 3,10 Kwh/kg. En el caso del aserrín el valor más alto se obtiene al 0% MC con 4,38 Kwh/kg, y para el pinzote al 5% con un valor de 4,15 Kwh/kg (Figura 9a).

En el SD (Figura 9b), PL presenta la mayor ganancia energética entre los MC de 25 a 35%. La PL molida y 2 cm presentan su máxima ganancia en 25% con 3,47 Kwh/kg y 3,64 Kwh/kg, respectivamente. La PL de 2 cm con estrías y PL de 6 cm al 30% de MC es su máxima ganancia con 3,37 Kwh/kg y 3,42 Kwh/kg respectivamente. Finalmente PL de 10 cm la máxima ganancia es de 3,46 Kwh/kg para un MC de 35% (Figura 9a). Al igual que en el secado anterior (HAD) el aserrín y el pinzote alcanza su máxima ganancia al 0% y 5%, con valores de 4,24 Kwh/kg y 3,97 Kwh/kg, respectivamente.

En relación al AD (Figura 9c), todos los residuos (PL, GAD y EFB) obtienen su máxima ganancia energética al 0% de MC, donde las PL de 2 cm con y sin estrías, 6 cm y 10 cm poseen el mismo valor de 4,18 Kwh/kg de ganancia energética, la PL molida 4,15 Kwh/kg, el aserrín 4,71 Kwh/kg y el pinzote con 4,59 kwh/kg.

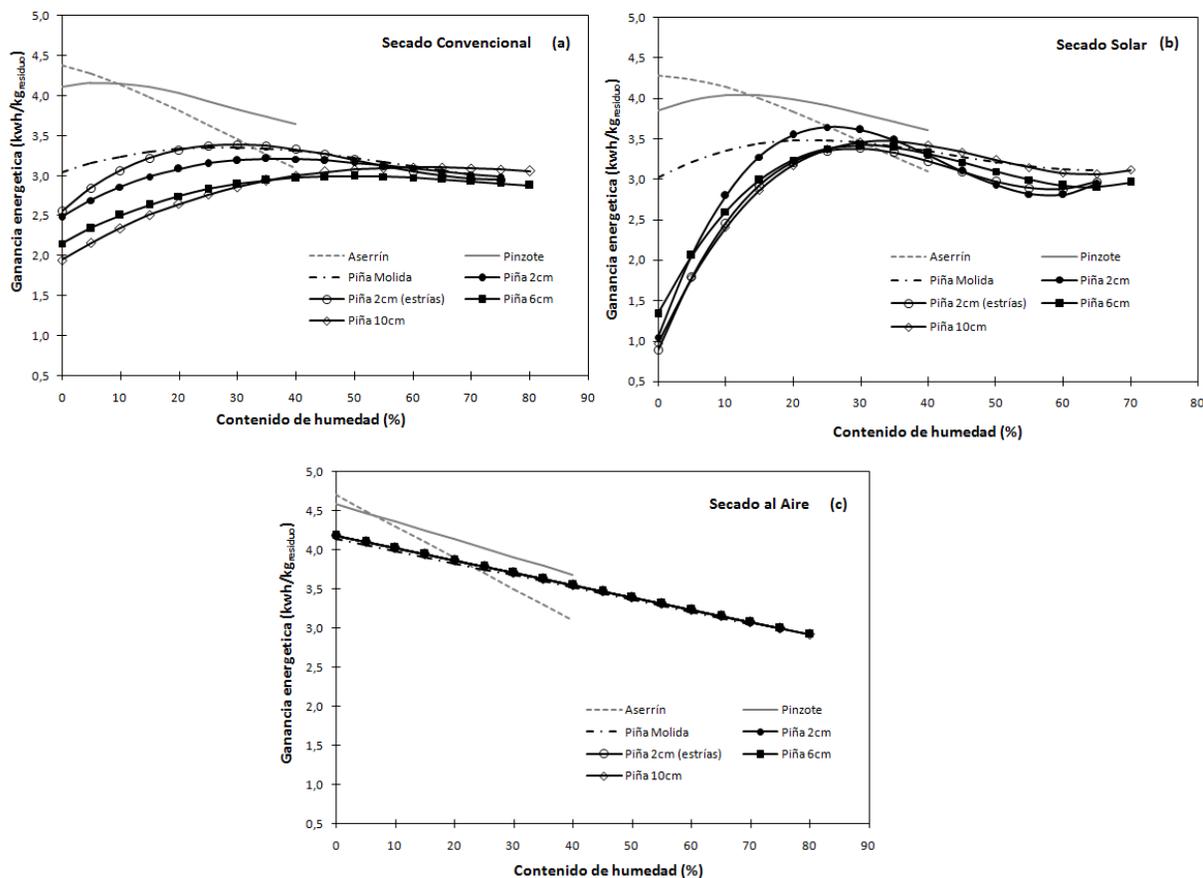


Figura 9. Ganancia energética por residuo para cada tipo de secado, secado convencional (a), secado solar (b) y secado al aire (c).

El balance energético fue diferente para tipo residuo, en todos los casos el GAD presentó similar comportamiento con EFB en los diferentes tipos de secado, debido a que dichos materiales presentan MC similar entre ellos (Cuadro 1). Así mismo, el proceso de eliminación de agua en ambos tipos de residuo, son de igual comportamiento, a diferencia de la PL que presenta una barrera natural (cutícula) para la eliminación del agua de la parte interna de la hoja.

Por otra parte, el balance energético (Figura 9) no refleja el punto crítico encontrado al medir el gasto energético (Figura 7). En el caso del gasto energético, los valores de consumo incrementan en grandes cantidades cuando el MC varió de 4% a 13% denominado como punto crítico, mientras que las tendencias del balance energético mostraron que entre 20% y 30% de PL se presentan una inflexión en la tendencia (a disminuir aceleradamente) en los secados convencional y solar (Figura 9a y 9b), a diferencia de los otros residuos y el secado al aire que no se presentan estas inflexiones, el balance energético es lineal con la disminución del MC (Figura 9).

Las implicaciones prácticas, de conocer el balance energético en el secado de los diferentes tipos de residuos, es establecer con exactitud a que MC se debe secar el residuo, en caso de que se vaya a utilizar como fuente de calor. Por ejemplo, el caso de PL aunque en todo momento se tenga un ganancia energética, el MC donde se obtiene la ganancia energético más alta es cuando el residuo está seco a un MC entre 25% y 60%, siendo el valor más bajo para PL molida y el más alto para PL cortada en largos de 10 cm en el secado HAD (Figura 4a). En tanto que en el caso de GAD y EFB se tiene el máximo valor del balance energético al 0% y 5%, respectivamente en el secado HAD.

Por otro lado, aunque todos los diferentes tipos de secado se presentan puntos máximos de ganancia energética, los valores son mayores en un tratamiento o un secado. Por ejemplo, todos los residuos se obtienen el máximo balance energético al secar al aire y en los MC próximo al 0%, resultados que es de esperar ya que este secado no demanda energía. En tanto que los otros secados (HAD y SD), en el caso de la PL, se encontró que el balance energético es máximo cuando PL es molida y está es secada en secadora solar (Figura 9b).

3.5. Temperatura y humedad relativa dentro de la cámara de secado

En la HRI en Río Cuarto, donde no se utilizó el deshumidificador, se obtuvo la HRI más altos. Pero en los sitios donde se utilizó el deshumidificador (Guácimo, Buenos Aires y Cartago), la HRI disminuyó a un promedio de 34 a 44% (Cuadro 3). En tanto la evaluación de la TI (Cuadro 3), se encontró que el promedio general fue de 34°C. El promedio más alto se presentó en Buenos Aires y el más bajo en Río Cuarto. Para Cartago se obtuvo la TI más alta (de 36°C), no obstante, hay que recordar que en este sitio se inyectó aire caliente luego de las 14 horas del día.

Cuadro 3. Condiciones de humedad relativa y temperatura dentro de la cámara, radiación solar y cambio de temperatura.

Variable	General	Río Cuarto	Guácimo	Buenos Aires	Cartago
Humedad Relativa (%)	49 (21,6) [92 - 10]	73 (10,3) [92 - 53]	44 (14,4) [92 - 24]	35 (16,9) [83 - 20]	34 (15,0) [83 - 10]
Temperatura (°C)	34 (7,5) [51 - 19]	28 (2,7) [32 - 23]	34 (5,4) [43 - 19]	40 (9,3) [51 - 20]	36 (7,5) [49 - 19]
Radiación Solar indirecta (W/m ²)	380 (317,4) [1130 - 4]	416 (280,6) [980 - 24]	410 (359,1) [1130 - 4]	544 (371,4) [984 - 5]	238 (226,0) [725 - 9]
Radiación Solar directa (W/m ²)	507 (401,1) [1220 - 4]	561 (361,7) [1175 - 48]	578 (465,2) [1220 - 4]	802 (345,3) [1053 - 5]	249 (244,0) [839 - 9]
Rango de ΔT (°C)		-6 a 4	0 - 14	0 - 14	2 - 18

Nota: (...) = desviación estándar, [...] = máximos y mínimos, ΔT = Cambio de temperatura en la parte interna y externa

Al evaluar las condiciones de la HRI en relación HRE se encontró que cuando en la secadora no se utiliza un deshumidificador, como en el caso de Río Cuarto (Figura 10a), la HRI es

mayor o muy similar a la HRE. Por el contrario, los sitios donde se utilizó un deshumidificador, la HRI siempre estuvo por debajo que la HRE, con las excepción de algunas horas en los sitios de Buenos Aires y Guácimo (Figura 10b y 10c). Es importante también observar que las mayores diferencias entre HRI y HRE se presentaron en Cartago (Figura 10d), siempre hubo una amplia diferencia entre ambas.

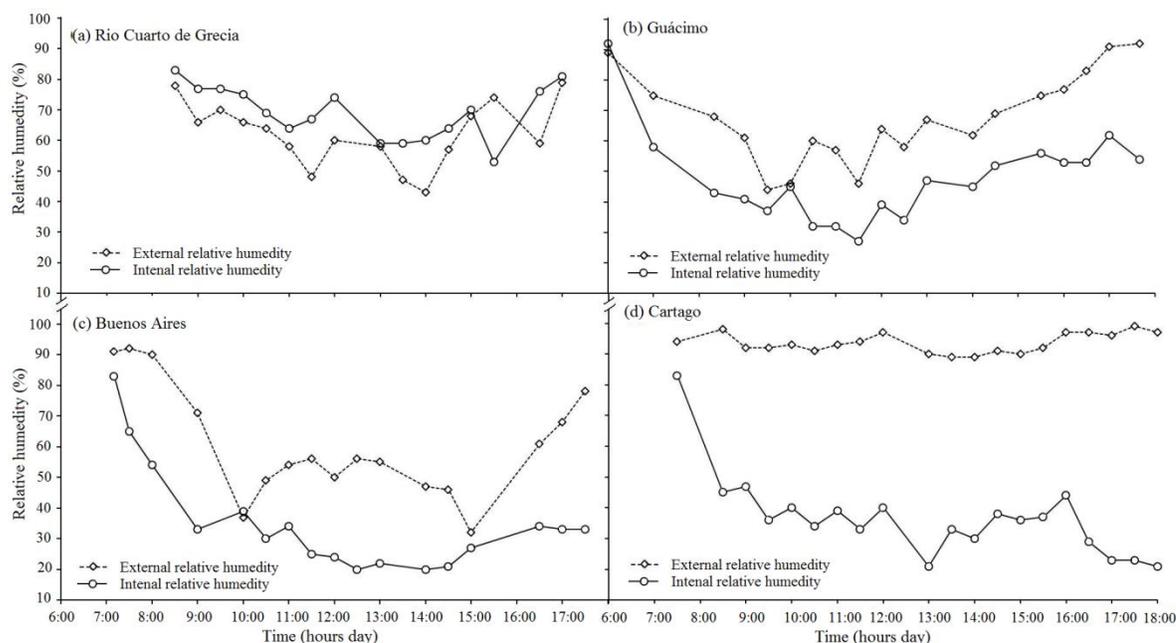


Figura 10. Humedad relativa interna y externa para cada uno de los sitios de estudio para diferentes horas del día.

El comportamiento de la TI en relación TE mostró que en Río Cuarto (Figura 11a) presenta un comportamiento similar entre ambas temperaturas. En Guácimo, y Buenos Aires (Figura 11b y 11c), ambas temperaturas tienen un comportamiento esperado, aumenta en las primeras horas de la mañana y luego decrece en las horas de la tarde. Así mismo, para un buen comportamiento de secadora, la TI es mayor que la TE en estos sitios. Finalmente en Cartago se observa nuevamente un incremento de los dos tipos de temperaturas en las horas de la mañana y luego empieza a decrecer. En este sitio se puede esperar una mayor eficiencia de la secadora, ya que la TI es marcadamente mayor a la TE (Figura 11d). Es importante hacer notar que en este sitio, con el fin de evitar el descenso de la TI dentro de la cámara de secado, como fue observado en los dos sitios anteriores, se aplicó una fuente de calor, en el momento que estaba ocurriendo el descenso de la temperatura (las 16 horas). Esto permite que TI no decaiga y más bien esta llega a alcanzar cerca de 50 °C (Figura 11d).

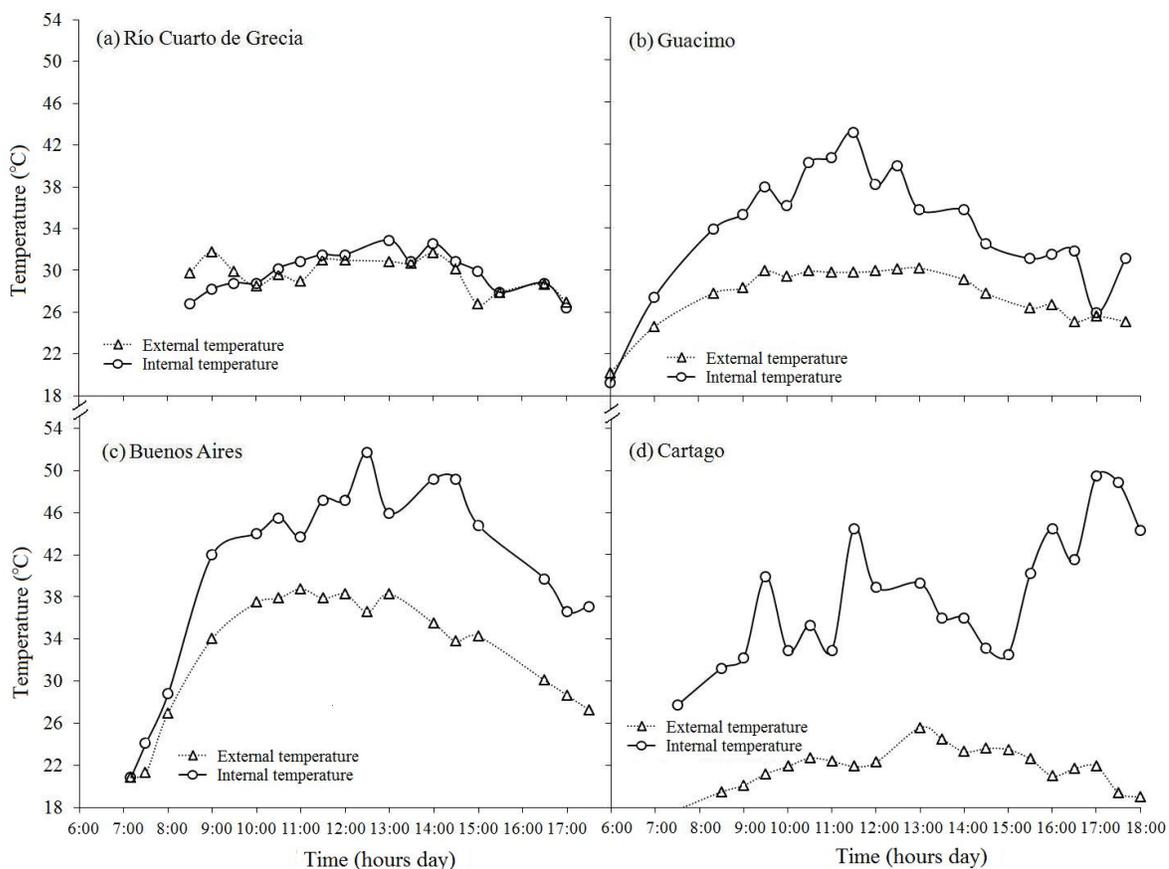


Figura 11. Temperatura interna y externa de los cuatro sitios de estudio en diferentes horas del día.

Los altos valores encontrados de HRI en Río Cuarto (73%, Cuadro 3) y su comportamiento durante el día (Figura 10), pueden ser explicados en primera instancia por la alta HRE en la región (Cuadro 3), lo que no permite disminuir la HRI por el intercambio del aire húmedo dentro de la secadora por aire más seco del exterior. En segunda instancia, se presenta la baja temperatura (28°C). Benítez y Calderón (1993) comentan que para un secado adecuado debe existir el menos 10°C de diferencia entre la TI y la TE y como se observa en la figura 5a, esta condición no se presenta en Río Cuarto. Estos dos factores, por tanto no permiten un adecuado desempeño de la secadora, resultando en un mal intercambio de la humedad interna por la externa (Solís et al., 2003 y Fuentes et al., 2003), reflejando TS más largos y altos MCF de la fibra de piña (Cuadro 4). Contrariamente, el mejoramiento de la HRI produce cortos TS y bajos MCF, como sucedió en el caso en los sitios de Buenos Aires, Guacimo y Cartago. En dicho sitios la humedad relativa promedio fue inferior a 49% (Cuadro 1) y se logra mantener esta diferencia en el transcurso del día, dando como resultado una HRI menor que la HRE (Figura 11b-11d), producto de la utilización del deshumidificador.

Otro inconveniente para un buen desempeño de la secadora solar es que luego de las 2 de la tarde (14 horas) empieza a aumentar hasta alcanzar valores muy cercanos a la saturación, provocando un aumento de la HRI luego de esta hora (Figura 10), especialmente en Guacimo

y Buenos Aires (Figura 4b y 4c). Sin embargo, este inconveniente se solucionó con la inyección de calor en el sitio de Cartago, donde la HRI fue inferior a 40% (Figura 9d), logrando una mayor eficiencia de la secadora. Dicho mejora se refleja en TS más cortos, menor a 4 horas y 43 minutos y CH de la fibra bajos, menor 6,92% (Cuadro 4) por el aumento de la temperatura (Figura 11).

La inyección de calor es una práctica común que se realiza cuando la radiación solar es baja y en horas de la noche. Por ejemplo, un diseño de secadora solar realizado por Karathanos y Belessitotis (1997) para el secado solar de diferentes productos agrícolas y el diseño de Durán et al. (2010) en Argentina para el secado de pimentones, mejoraron las condiciones de TI y HRI de la secadora con la adaptación de sistemas de calefacción auxiliares, con gas y leña respectivamente.

La TI generalmente fue mayor a la TE para el presente estudio, en promedio existió una variación de 7°C entre la TI y la TE (Cuadro 3). Las mayores diferencias se dieron entre las 10 y 14 horas del día (Figura 11), similar al periodo comprendido entre las 11 y 14 horas reportado por Solís et al. (2003) en la evaluación de su secadora para madera de 3 m³ de capacidad desarrollado en Yucatán, México. Sin embargo, los análisis de regresión mostraron que solo en Guácimo la TI está correlacionada con TE. Dichos resultados sugieren que la TI de la cámara está regulada no solo por la TE, si no que por otros factores que probablemente no fueron estudiados en el presente estudio.

Finalmente, el cambio realizado en el sistema de secado, inyección de aire caliente para mejorar la temperatura en horas que se presenta baja temperatura y alta HRI, sin duda mejora las condiciones dentro de la cámara. De esta forma este cambio permite solventar los problemas de las condiciones climáticas de Costa Rica, altos valores de humedad relativa, especialmente al inicio de la mañana y en horas de la tarde y radiación solar habitualmente irregular por la nubosidad presente.

Para la evaluación de la RS, se tiene que la diferencia entre los promedios de RSD y la RSI fue de 127 W/m². En Buenos Aires se obtuvieron los valores más elevados de RSD y RSI (802-544W/m²) y en Cartago los más bajos (249-238W/m²). Guácimo y Río Cuarto se comportaron de forma muy similar entre ellos. Diferencias debido que en estos sitios se presentaron nubosidad intermitente durante el día de las pruebas de secado. No obstante, esta condición climática es común en estas regiones ya que se caracterizan por presentar nubosidad irregular (Wright, 2002).

3.6. Efecto de la radiación solar y temperatura externa sobre la temperatura interna de la cámara.

El efecto de la radiación como se indicó, fue medido por el cambio de temperatura entre TI y TE (ΔT). El ΔT Río Cuarto fue bajo, de -6 a 4 °C, seguido de Guácimo y Buenos Aires, con un cambio de 0 a 14°C y finalmente donde se presenta la mayor eficiencia es en Cartago con un ΔT de 2°C hasta los 18°C (Cuadro 3). Por otro lado, el análisis de regresión mostró que ΔT , a pesar que se incrementa en todos los sitios, en Río Cuarto, Buenos Aires y Cartago, ΔT no es

relacionado estadísticamente con RSD o RSI y la TE (Cuadro 4). En tanto que en Guácimo si se mostró un efecto positivo y significativo entre los dos tipos de radiación solar (directa o indirecta) o TE y el ΔT (Cuadro 4).

Cuadro 4. Coeficientes del modelo de regresión ($Y = ax + b$), coeficiente de determinación y error del modelo para predecir el cambio de temperatura por la radiación solar y la temperatura interna de por la temperatura del ambiente.

Variables	Sitio	Coeficientes del modelo		Coeficiente de determinación
		a	b	
Radiación solar directa	Rio Cuarto	0.001 ^{ns}	-1.42*	0.07 ^{ns}
	Guácimo	0.004**	4.48**	0.33**
	Buenos Aires	0.001 ^{ns}	7.17**	0.01 ^{ns}
	Cartago	-0.030 ^{ns}	18.83**	0.17 ^{ns}
Radiación solar indirecta	Rio Cuarto	0.002 ^{ns}	-1.36**	0.06 ^{ns}
	Guácimo	0.060**	4.14**	0.52**
	Buenos Aires	0.004 ^{ns}	5.84**	0.14 ^{ns}
	Cartago	-0.031 ^{ns}	9.97**	0.17 ^{ns}
Temperatura ambiental o externa	Rio Cuarto	-0.101 ^{ns}	2.32 ^{ns}	0.01 ^{ns}
	Guácimo	0.972**	-19.93**	0.54**
	Buenos Aires	0.306 ^{ns}	-1.68 ^{ns}	0.23 ^{ns}
	Cartago	-0.514 ^{ns}	26.16**	0.02 ^{ns}

3.7. Prueba de secado con fibra de piña

En el cuadro 5 se muestran los promedios de contenido de humedad inicial (MCi), contenido de humedad final (MCf) y TS para cada uno de los sitios y en las diferentes horas de colocación de la fibra. En relación al MCi de la fibra de piña, los valores variaron entre 70% y 77% y en las diferentes horas y los diferentes el MCi son estadísticamente iguales (valor $p > 0.05$), excepto para las 9:30 horas de Buenos Aires, en donde el MCi fue estadísticamente diferentes al resto de las condiciones. En relación al MCf, fue encontrado que este fue diferente en cada sitio y es relativamente estable con la hora de la colocación de la fibra dentro de la cámara. El menor MCf se presentó en Cartago y el de mayor MCf en Río Cuarto. La hora de colocación de fibra, no se presentó ninguna tendencia en el comportamiento del MCf (Cuadro 5).

Cuadro 5. Contenido de humedad inicial y final y tiempo de secado de fibra de piña en secado solar y al aire según hora del día en diferentes zonas geográficas de Costa Rica.

Sitio	Hora/Día	MCi (%)		MCf (%)		T / secado (h)	
		Solar	Aire	Solar	Aire	Solar	Aire
Buenos Aires	07:00	77,47 ^A	74,67 ^A	9,32 ^A	7,48 ^A	4:56 ^B	5:32 ^A
	08:00	76,59 ^A	75,20 ^A	8,00 ^A	9,62 ^A	4:11 ^A	3:32 ^A
	09:30	73,78 ^A	70,36 ^B	8,93 ^A	8,94 ^A	4:11 ^A	2:20 ^B
	10:30	73,24 ^A	72,93 ^A	13,17 ^A	9,38 ^A	4:23 ^A	1:16 ^B
	12:30	70,78 ^A	73,23 ^A	8,95 ^B	31,87 ^A	6:40 ^A	2:02 ^A
	14:30	74,55 ^A	73,25 ^A	13,67 ^B	30,61 ^A	5:38 ^A	3:25 ^A
	Promedio	74,40	73,27	10,34^J	16,32	4:59	3:01
Guácimo	06:00	72,63 ^A	73,86 ^A	11,81 ^A	13,59 ^A	6:07 ^A	6:53 ^A
	07:00	74,14 ^A	75,84 ^A	15,16 ^A	20,36 ^A	7:28 ^A	6:45 ^A
	09:30	73,41 ^A	74,80 ^A	14,49 ^B	25,36 ^A	7:37 ^B	16:45 ^A
	11:30	74,68 ^A	74,10 ^A	8,12 ^B	13,96 ^A	11:20 ^B	21:41 ^A
	14:00	72,76 ^A	74,22 ^A	6,76 ^B	15,25 ^A	15:35 ^B	19:21 ^A
	Promedio	73,52	74,56	11,27	17,70	9:37	14:17
Cartago	07:30	74,08 ^A	74,30 ^A	5,26 ^B	12,96 ^A	3:41 ^B	27:00 ^A
	08:30	72,24 ^A	73,94 ^A	3,26 ^B	8,91 ^A	3:40 ^B	26:01 ^A
	09:30	75,05 ^A	74,25 ^A	4,91 ^B	12,14 ^A	3:36 ^B	25:30 ^A
	10:30	72,92 ^A	76,33 ^A	3,76 ^B	13,01 ^A	3:03 ^B	24:48 ^A
	11:30	74,80 ^A	74,14 ^A	4,91 ^B	12,22 ^A	3:56 ^B	23:53 ^A
	13:00	75,32 ^A	73,36 ^A	6,92 ^B	10,80 ^A	4:43 ^B	22:26 ^A
	14:00	75,26 ^A	76,32 ^A	5,47 ^B	16,81 ^A	3:33 ^B	23:11 ^A
Promedio	74,24	74,66	4,93	12,41	3:44	24:41	
Río Cuarto	06:00	75,19	-	37,98	-	9:33	-
	07:00	76,00	-	47,04	-	9:07	-
	08:00	73,03	-	35,68	-	7:37	-
	10:00	74,49	-	28,76	-	8:28	-
	11:00	71,95	-	30,49	-	8:25	-
	12:00	72,50	-	20,76	-	25:32	-
	13:00	73,98	-	20,37	-	25:18	-
	14:00	74,52	-	21,75	-	24:08	-
Promedio	73,96	-	30,35	-	14:46	-	

El TS nuevamente varió con el sitio y la hora en que se coloque la fibra a secar. En Cartago se obtuvo el menor TS con 3 horas y 44 minutos, seguido de Buenos Aires y Guácimo con 9 horas y 37 minutos y finalmente el TS más extenso se obtuvo en Río Cuarto. Por otro lado, colocar las fibras a secar dentro de la secadora antes de las 12 horas del día en todos los sitios se presentan TS más bajos. Pero si la fibra se coloca luego de esa hora, el tiempo

puede prolongarse de 1 a 5 horas (Cuadro 5). Al analizar el TS, pero estandarizando un MCf de 15%, se encontró que el TS de las fibras dentro de la secadora es relativamente constante entre la 7 y 12 horas, pero si las muestra se colocan luego de esta hora el TS tiende a aumentar en Buenos Aires (Figura 12a), Guácimo (Figura 12b) y Río Cuarto (Figura 12c), pero en Cartago el TS fue relativa constante durante las diferentes horas (Figura 12d).

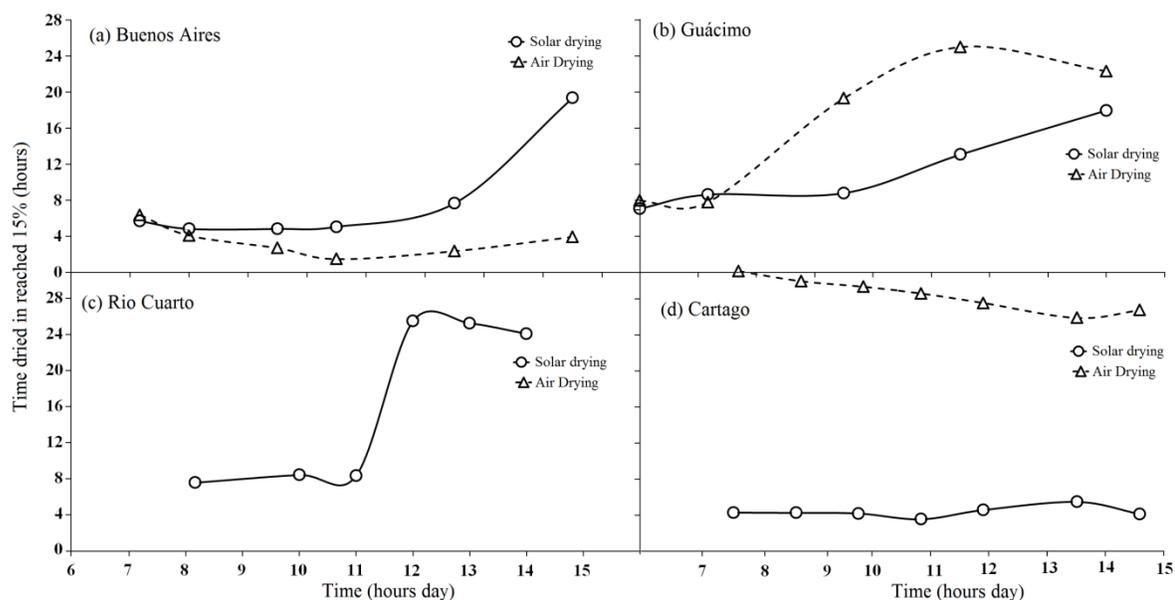


Figura 12. Tiempos de secado a diferentes contenidos de humedad a diferentes horas del día para cada sitio de pruebas.

Al comparar los resultados de MCf y el TS entre la secadora solar y un secado natural o al aire se tiene que estos parámetros tienen relación con el sitio y la hora de colocación de las muestras. En Buenos Aires y Guácimo, la fibra de piña que se coloca en la secadora solar al final de secado resulta con MCf estadísticamente iguales (valor $p > 0,05$) al que se obtiene al aire, pero en las horas de la tarde el MCf es estadísticamente inferior al aire (valor $p < 0,05$). En Cartago, en todas las diferentes horas que se coloque la fibra de piña, los promedios de secado solar son menores que los de secado al aire (Cuadro 5). En el TS, en el caso de Buenos Aires, el secado natural presentó menor TS que los obtenidos en la secadora solar (Figura 12a). En Guácimo a partir de las 9 horas comenzaron las diferencias estadísticas (valor $p < 0,05$), presentando el secado solar los menores promedios (Figura 12b). Finalmente en Cartago (Figura 12d), en todas las horas de colocación de las fibras fueron menores en el secado solar que lo que se obtiene en un secado natural.

El MCi promedio encontrado para la fibra de piña (cerca a 75%, Cuadro 5) es similar a lo reportado por Ruslan et al. (2012) y por Pangavhane et al. (2002), quienes reportan valores de entre 60 y 80%. La diferencia encontrada a las 9:30 horas en Buenos Aires (Cuadro 5) probablemente se debió a que se utilizaron hojas de piña más secas en ese momento, lo cual repercutió con un bajo MCi.

En relación al TS y MCf de la fibra se tiene que, independientemente de la región geográfica donde se coloque la secadora, la hora del día que se colocó la fibra a secar, es la de mayor influencia. Las muestras colocadas después de las 12 horas requieren más TS y se logra MC más altos que las colocadas de las 6 a las 11 horas del día (Cuadro 5). Este problema se acentúa más luego de las 14 horas en todos los sitios (Figura 12). Estos resultados confirman nuevamente que debido a las condiciones ambientales en Costa Rica, en la tarde luego de las 14 horas, las condiciones de HRE (Figura 10) y TE (Figura 11), incrementan luego de esta hora, provocando un aumento en el TS y alto MCf.

La eficiencia de la secadora solar se refleja por la reducción de TS. Según los resultados de tiempos de secado (Figura 12), la secadora diseñada presentó los mejores resultados en Cartago, sitio donde se presentó la menor TS, seguido por Buenos Aires, Guácimo y Río Cuarto (Cuadro 5, Figura 12). Río Cuarto se destacó por ser el sitio con las condiciones de HRI más altas (Cuadro 3, Figura 10), poco efecto de la radiación solar (Cuadro 5), y baja temperatura (Figura 11a), dichas condiciones hicieron por tanto aumentar el tiempo de secado (Figura 12c) y MCf de la fibra piña (Cuadro 5) de entre los sitios estudiados. Pero, cuando se mejoró la HR dentro de la cámara para Guácimo, Buenos Aires y Cartago (Figura 12) el TS disminuyó (Figura 12), especialmente en Cartago que se realizó la inyección de aire caliente durante las horas de poca eficiencia en el secado. Mostrando en este sitio que todos los cambios prácticos para mejorar la eficacia en la secadora fueron satisfactorios.

Al comparar los TS y MC de la fibra con el secado al aire, se tiene que las mayores ventajas de secar con la secadora solar se produce cuando las muestras son colocadas luego de las 12:30 horas en Buenos Aires, en Guácimo a partir de las 9:30 horas y en Cartago no importa la hora de colocación de la fibra de fibra, ya que en todo momento fue menor y se tubo bajos MCf. En el caso de fibra de piña se puede afirmar que el secado solar es más eficiente que el secado al aire. Sin embargo, en algunos sitios una combinación aire y secado solar puede ayudar a mejorar la eficiencia en el secado, ya que en algunas circunstancias el secado al aire es mejor que el secado solar, como por ejemplo en el sitio de Buenos Aires. Es interesante que en este sitio en la época de verano, época donde se probó la secadora, el secado aire produjo menores TS y bajos MCf en casi dos horas menos en relación con el secado solar (Cuadro 5), pero para secar completamente las fibra de piña no se llega a alcanzar MCf y tiempo que se logra en la secadora solar (Figura 12a-b). Entonces, para lograr la máxima eficiencia de la secadora se podría dejar la fibra secando al aire en las primeras dos horas luego de extraído la fibra de la hoja, y luego se pasa a la secadora solar, para terminar de secar la fibra a adecuados MCf.

Otro resultado importante de señalar, entre la secadora solar y su comparación con las condiciones de secado al aire, es lo ocurrido en Cartago. Acá se dieron las condiciones externas más bajas de todos los sitios donde se llegó a obtener la mejor eficiencia de la secadora solar, con marcadas diferencias entre los tiempos de secado solar y al aire (Cuadro 5). Dicho resultado nos sugiere que cuando las condiciones ambientales de baja temperatura y alta humedad relativa, la potencialidad de la secadora solar es aún mayor.

4. CONCLUSIONES

Durante el secado de los diferentes materiales ligno-celulósicos (PL, GAD y EFB) el gasto energético aumenta de la forma $\beta_1MC^3+\beta_2MC^2+\beta_3MC+\beta_4$ (ecuación polinómica) o de tipo logarítmico ($\beta_1\ln(MC)+\beta_2$). En todos los residuos se encontró que hay un MC donde ocurre a inflexión en el gasto energético. De ese MC hasta el 0% de MC, el cambio en el consumo energético es de mayor magnitud que ocurre de verde hasta el MC de punto de inflexión. En MC crítico para los diferentes tipos de residuos varió de 3 a 13%, siendo este punto crítico mayor en GAD y EFB y los menores valores en PL.

El balance energético también varió con el tipo de residuo y el tipo de secado. En el HAD, PL la mayor ganancia energética se da entre 25-60% de MC con balance de 2,99 a 4,38 Kwh/kg, en GAD el punto de mayor ganancia es a 0% MC con 4,38 Kwh/kg, y EFB al 5% con un valor de 4,15 Kwh/kg. En el SD, PL presenta la mayor ganancia energética entre los MC de 25 a 35% y balances de 3,37 a 3.64 Kwh/kg y al igual que en el secado anterior (HAD) el aserrín y el pinzote alcanza su máxima ganancia al 0% y 5%, con valores de 4,24 Kwh/kg y 3,97 Kwh/kg respectivamente. En relación al AD, todos los residuos obtienen su máxima ganancia energética al 0% de MC, con valores de 4,18 a 4,59 Kwh/kg. En la caso de PL, el tratamiento PL, haciendo estrías o moliendo, permite tener una mayor ganancia energética.

Finalmente, a pesar que existe un MC donde el consumo energético aumenta, este no correspondió con el MC de máximo balance energético, siendo éste último, mayor que los encontrados en el punto crítico. Las implicaciones prácticas de estos valores, de conocer el balance energético y el punto crítico en el secado de los diferentes tipos de residuos, es establecer con exactitud a que MC se debe secar el residuo, en caso de que se vaya a utilizar como fuente de calor.

Buenos Aires presentó las mejores condiciones ambientales para el secado solar sin la ayuda de la inyección de calor, con las temperaturas internas más altas, aparte de las humedades (interna y externa) más bajas y los índices más elevados de radiación solar. En sitios de Costa Rica, como Río Cuarto, con baja temperatura y alta HR ambiental el desempeño de la secadora solar no es eficiente, ya que el tiempo TS es largo y no se logra secar a MC inferior a 20%. Otra condición desfavorable de Costa Rica, es que luego de las 14 horas, la eficiencia de la secadora disminuye, se alcanzar altas HRI y bajas TI dentro de la secadora.

Se estableció que el cambio de temperatura (ΔT), entre la temperatura interna en relación con la temperatura externa, no tiene relación con radiación solar o temperatura externa. Dichos los resultados sugieren que la temperatura interna de la cámara está regulada no solo por las condiciones de radiación, sino que también por otros factores que se presentan en el sitio donde se coloca la cámara de secado.

La inyección de aire caliente para mejorar la temperatura en horas en que se presenta baja temperatura y alta humedad relativa interna, sin duda mejora las condiciones dentro de la cámara. Esto permite solventar los problemas de las condiciones climáticas de Costa Rica, altos valores de humedad relativa, especialmente al inicio de la mañana y en horas de la tarde y radiación solar habitualmente irregular por la nubosidad presente.

La fibra de piña es posible secar a apropiados MCf en TS menor a 4 horas cuando las condiciones de la secadora solar son favorables, alta TI y baja HRI, pero este tiempo puede aumentar hasta en 8 horas cuando las condiciones no son apropiadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los investigadores de este proyecto dan las gracias a las siguientes personas, organizaciones y empresas: a los funcionarios del Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI) por su trabajo en la ejecución de las pruebas químicas, y en la construcción de la secadora solar portátil, a la Unidad de transportes del ITCR y al CEQUIATEC por permitirnos realizar las pruebas de poder calórico con sus equipos. A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el financiamiento del proyecto. A la empresa Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A. por facilitarnos el aserrín utilizado en el proyecto. A las empresas, Palma Tica S.A. Company por facilitarnos el pinzote y las hojas de piña respectivamente. Además, a las empresas Corporación de Desarrollo Agrícola del Monte S.A. (PINDECO), Ticoverde S.A. por facilitarnos el espacio y el material para realizar los secados con la secadora solar portátil.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, L. 2001. Climatología de la Atmósfera Libre sobre Costa Rica. San José, CR. Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio del Ambiente y Energía. 8(2): 89-115
- ASTM (American Society for Testing and Materials, USA). 2003b. D 5865-04 Standard test method for gross calorific value of coal and coke. In: Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.10. Philadelphia, USA.
- Anttila, P., A. Asikainen, J. Laitila, M. Broto, I. Campanero, I. Lizarralde and F. Rodriguez, 2011. Potential and supply costs of wood chips from forests in Soria, Spain. Forest Systems 20(2), 245-254
- Andersen R, Towers W, Smith P. Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. Biomass Bioenergy 2005; 29(2): 73-82
- Askew M, Holmes C. The potential for biomass and energy crops in agriculture in Europe, in land use, policy and rural economy terms. Aspects in Applied Biology 2001; 365-374

- Azhari, A; Sopian, K; Zaharim, A; Al Ghoul, M. 2008. A new approach for predicting solar radiation in tropical environment using satellite images – case study of Malaysia. *MY. Environment and Development*. 4 (4): 373-378
- Bala, B; Woods, J. 1994. Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. *Solar Energy*. (53): 259-266
- Benítez, R; Calderón, A. 1993. Secador solar para madera. Tegucigalpa, HO, CEMAPIF - CUPROFOR. 23 p.
- Berry, S., Roderick, M.L., 2005. Plant–water relations and the fibre saturation point. *New Phytologist* 168: 25-38.
- Barrantes A, Castro G. Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2008. San Jose - Costa Rica: Oficina Nacional Forestal; 2009.
- Bauer, R., Göllés, M., Brunner, T., Dourdoumas, N., Obernberger, I., 2010. Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes. *Biomass and bioenergy* 34: 417-427.
- Bartholomew DP, Paull RE, Rohrbach KG. The pineapple: botany, production and uses. London, UK: CABI publishing, 2003
- Bismarcka, Mishra S, Lampke T. Plant fibers as reinforcement for green composites. In: Mohanty AK, Misra M, Drzal LT. Editors. *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. Florida: Taylor & Francis Group LLC; 2005, pp. 51-122
- Costales, R. 2010. Aplicación de la energía renovable en el secado. Estado del arte y su potencial en la producciones agrícolas. *Instituto Cubano de Investigación de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)*. 44 (2): 47-53
- D'Alolio, D. 2007. Algunas características del sector transporte en Costa Rica y su influencia en el consumo de hidrocarburos, 1965-2004. *Dialogos* 7(2): 22-45.
- Diario Oficial La Gaceta, 2012. Resoluciones 742 a la 745-RCR-2011. No.23 del 1 de Febrero del 2012.
- Durán, G; Condorí, M; Echazú, R; Russo, G. 2010. Secador solar híbrido para la producción continua a escala industrial de pimiento para pimentón. In “IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES), Cusco, 1 -5.11.
- Eddy, J; Grandegger, A; Esper, M; Djaya, C. 1991. Development of a multi-purpose solar tunnel dryer for use in humid tropics. *Renewable Energy*. 1(2): 167-176
- Ekechukwu, O; Norton, B. 1999. Review of solar energy systems: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*. (40): 615-655
- Fagernäsa L., Brammerb, J., Wiléna, C., Lauerc, M., Verhoeffd, F. 2010. Drying of biomass for second generation syn fuel production. *Biomass and Bioenergy* 34: 1267–1277.
- FPL (Forest Products Laboratory). *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, U.S: For. Prod. Lab. Department of Agriculture, Forest Service, 2010

- Fuentes, M; Luna, D; Osorio, J; Corona, J. 2003. Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, (2):171-176
- Gallali, Y; Abujnah, Y; Bannani, F. 2000. Preservation of fruits and vegetable using solar drier. *Renewable Energy*. (19): 203-212
- González JF, Ledesma B, Alkassir A, González J. Study of the influence of the composition of several biomass pellets on the drying process. *Biomass Bioenergy* 2011, 35: 4399-4406
- Hasibuan R, Wan Daud WR. Through drying of oil palm empty fruit bunches (EFB) fiber using superheated steam. Sao Paulo, Brazil: Proceedings of the 14th International Drying Symposium. 2004.
- Hamelinck, C.N., Roald, A.A., Suurs, A., Faaij, S P.C. 2005. International bioenergy transport costs and energy balance. *Biomass and Bioenergy* 29: 114–134.
- Janjai, S; Srisittipokakun, N; Bala, B. 2006. Experimental and modeling performances of a roofintegrated solar drying system for drying herbs and spices. *Energy*. (54): 378-391
- John J. Sabu Thomas S. Review Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers* 2008; 71: 343–364
- Karathanos, T; Belessitotis, G. 1997. Sun and artificial air drying kinetics of some agriculture products. *Food Engineering*, (31): 35-46.
- Krauss BH. Anatomy of the vegetative organs of the pineapple *Ananas comnosus* L. Merr. II. The leaf. *Botany Gazzette* 1949; 110: 333-404
- Kopyscinski, J. Schildhauer, T.J., Serge, A., Biollaz, M.A., 2010. Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass-a technology review from 1950 to 2009. *Fuel* 89: 1963-1783.
- Langrish T, Walker J. 2006. Drying of timber. In: John CF, Editor. *Primary Wood Processing: Principles and Practice*. 2da edition. Netherlands: Springer Verlag; p.251-296
- Lotfalian, A; Ghazavi, M; Hoseinzadeh, B. 2010. Reviewing drying of drill and spearmint by a solar dryer and domparing with traditional dryers. *World Applied Sciences Journal*. 8 (3): 364-368
- Mckendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technol* 2002, 83(1): 37-46
- Moya R, Esquivel E, Urueña E. Aprovechamiento e industrialización de árboles de *Alnus acuminata* Kuntz de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. *Kurú: Revista Forestal* 2009; 6(16): 1-10 (in Spanish with abstract in English)
- Moya, R; Soto, R; Mata, J; Camacho, D. Caracterización anatómica y química de las hojas de piña y el pinzote de la palma aceitera para la fabricación de tableros de partículas. In XIII Congreso Agropecuario y Forestal, CONAGROF 2010. San José, Costa Rica: Colegio de Ingenieros Agrónomos, 2010, pp. 14-15. (In Spanish)

- Moya R, Ureña E, Salas C, Muñoz F, Espinoza O. Kiln drying defects presence and grouping of wood from ten tropical species growing in fast-growth plantation. Wood material science and engineering 2012, (Accepted).
- Muller, A. 2009. Sustainable agriculture and the production of biomass for energy use. Climatic change 94: 319-313.
- Offerman R, Seidenberger T, Thrän D, Kaltschmitt M, Zinoviev S, Miertus S. Assessment of global bioenergy potentials. Mitig Adapt Strateg Glob Change 2011; 16: 103-115
- Okala, N; Chigasa, U; Cynthia, I; Chidimma, O; Chibueze, N; Onuoragbunam, O; Ogbonna, O. 2011. Analysis and survey of the application of solar dryers in eastern Nigeria. International journal of agricultural and biological engineering. 4(3): 79-82
- Pang, S., Mujumdar, AS., 2010. Drying of woody biomass for bioenergy: drying technologies and optimization for an integrated bioenergy plant. Drying Technology 28: 690-670.
- Pang, S.; Li, J., 2006. BIGCC (biomass integrated gasification combined cycle) system for New Zealand: An overview and perspective. New Zealand Journal of Forestry 51 (2), 7–12.
- Pang, S., Xu, Q. 2010. Drying of woody biomass for bioenergy using packed moving bed dryer: mathematical modeling and optimization. Drying Technology, 28: 702–709.
- Pangavhane D; Sawhney R; Sarsavadia P. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. Energy (27): 579-590.
- Py C, Lacoëuilhe JJ, Teisson C. The pineapple: cultivation and uses. Paris France: Maisonneuve et Larose; 1987
- Ratnasingam J, McNulty T, Manikam M. The machining characteristics of oil palm empty-fruit bunches particleboard and its suitability for furniture. Asian J Appl Sci 2008; 1: 253-258
- Ramírez, D, Carazo, E, Roldán, C., Villegas, G. 2007. Encuesta de oferta y consumo energético nacional a partir de la biomasa en Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía, Dirección Sectorial de Energía. Gobierno de Costa Rica, 335 p.
- RECOPE (Refinadora Costarricense de petróleo. Costa Rica). 2011. Disponible in http://www.recope.go.cr/info_clientes/cliente_directo/Manual_Productos.pdf. Access in february, 2012.
- Rhéna, C., Grefa, R.M. Sjöströmb, Wästerlunda, I. 2005. Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. Fuel Processing Technology 87: 11-16.
- Ribeiro L. Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras. Washington: Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Documento LC/MEX/L.791., 2007. (Available in <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/3/29423/L791-2.pdf>)

- Ruslan, M; Fudholi, A; Othman, M; Azmi, M; Yahya, M; Zaharim, A; Sopian, K. 2012. The double-pass solar dryer for drying palm oil fronds. MY. Int. Conf. on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE'11). pp. 143-149
- Salas, C.; Moya, R., Córdoba, R., 2008. Diseño y construcción de un secador solar para madera. Kurú: Revista Forestal 5(13) 13 p.
- Sharma, A., Chen, C.R. Vu Lan, N., 2009. Solar-energy drying systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13: 1185–1210.
- Sattar MA. 1994. Economics of drying timber in a greenhouse type solar kiln. Holz als Werk 52: 157-161.
- Shuit SH, Tan KT, Lee KT, Kamaruddin AH. Oil palm biomass as a sustainable energy source: A Malaysian case study. Energy 2009; 34: 1225-1235
- Solís, L; Cerón, M; González, I. 2003. Diseño y operación de una estufa solar para secar madera. Ingeniería Revista Académica, 7(3): 35-48
- Tenorio, C., Moya, R. Evaluation of different methods proposal for the drying of lignocelluloses residues. Waste management and research (submit)
- Tunde-Akintunde TY, Ajala A. Air drying characteristics of chili pepper. International J Food Eng 2010; 6(1): 1-17
- Ulloa JB, Weerd JH, Huisman EA, Verreth JAJ. Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: the Costa Rica situation. Waste Manag 2004; 24: 87-97
- Velázquez B. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. Ecosistemas 2006; 15: 77-86 (in Spanish with abstract in English)
- Weiner G, Liese W. Rattans – Stem anatomy and taxonomic implications. IAWA J 1990; 11:61-70
- White, JE., Catallo, W.J., Legendre, B.L. 2011. Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 91: 1-33.
- Wright, J. 2002. Mapas de radiación solar en Costa Rica. Revista Tópicos de Meteorología y Oceanográficos 9 (2): 79-87
- Zhimin, L; Zhong,H; Tang, R; Liu, T; Gao, W; Zhang, Y. 2006. Experimental investigation on solar drying of salted greengages. Renewable Energy. (31): 837-847