

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 II)

INVESTIGADORES:

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

Setiembre, 2012

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS**

**INFORME FINAL DE PROYECTO
(N° 5402-1401-1016)**

1. DATOS GENERALES

1. Nombre del Proyecto **“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”**.

2. Departamento académico o Centro responsable: Escuela Ingeniería Forestal / CIIBI.

3. Otros departamentos participantes:

4. Investigador(a) responsable: Ing. Roger Moya. Ph.D.

5. Investigadores participantes:

Nombre del(la) investigador(a) y grado académico	Jornada en el proyecto (hrs/sem)	Período	Nº de meses en el proyecto	Tipo de plaza*
Ing. Roger Moya Ph.D.	8	Enero-2010 Diciembre-2012	24	Docencia
Ing. Carolina Tenorio Lic	20	Enero-2010 Diciembre-2012	24	VIE

6. Fecha de inicio: 1° enero 2010

7. Fecha de finalización: 31 diciembre 2012

8. Sesión y fecha de aprobación de Escuela: Sesión ordinaria:

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

2. FUNDAMENTOS DEL PROYECTO O ANTECEDENTES

2.1. Objetivo General:

Establecer el balance energético del secado de 3 residuos agro-forestales plantados en Costa Rica en relación al grado de humedad para 3 tipos el secado natural, secado solar y secado con horno de tipo caldera, así como establecer un modelo modular de baja capacidad y baja consumo energético para el secado de residuos ligno-celulósicos.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar el consumo de energía en el secado con 3 tipos formas diferentes de secar (al aire, solar y caldera) de 3 tipos de residuos ligno-celulósicos provenientes de cultivos agro-forestales plantados en Costa Rica.
- Determinar la capacidad calórica de 3 tipos de residuos ligno-celulósicos provenientes de cultivos agro-forestales plantados en Costa Rica en diferentes contenidos de humedad.
- Determinar el balance energético real para utilizar como fuente de calor 3 tipos de residuos ligno-celulósicos provenientes de cultivos agro-forestales plantados en Costa Rica en diferentes contenidos de humedad.
- Diseñar, validar y socializar una secadora solar de baja escala (3 m³ de capacidad) en el secado de residuos agro-forestales

3. PLAN DE ACCIÓN

Objetivo	Cumplimiento	Productos	Observaciones
Determinar el consumo de energía en el secado con 3 tipos formas diferentes de secar (al aire, solar y caldera) de 3 tipos de residuos ligno-celulósicos provenientes de cultivos agro-forestales plantados en Costa Rica.	100%	Artículo científico que detalla los diferentes métodos de secado utilizados para los tres tipos de residuos (Anexo 1). Artículo científico que detalla el consumo de energía en kWh durante el secado de los residuos (Anexo 2).	Los artículos científicos detallan los métodos de secado utilizados: solar, aire y en horno convencional; sus tiempos de secado y contenidos de humedad, para los residuos de piña, pinzote de palma africana y aserrín. Además, el segundo artículo detalla el consumo de cada tipo de secado por residuo.
Determinar la capacidad calórica de 3 tipos de residuos ligno-celulósicos provenientes de cultivos agro-forestales plantados en Costa Rica en diferentes contenidos de humedad.	100%	Artículo científico que señala el uso de la capacidad calórica o el poder calórico que poseen cada uno de los residuos utilizados en el cálculo de la ganancia energética (Anexo 2).	Los resultados de este objetivo se utilizaron para realizar el cálculo del balance energético o ganancia energética del secado de cada uno de los residuos.
Determinar el balance energético real para utilizar como fuente de calor 3 tipos de residuos ligno-celulósicos provenientes de cultivos agro-forestales plantados en Costa Rica en diferentes contenidos de humedad.	100%	Nota técnica para la revista INVESTIGATEC, que resume los resultados obtenidos en este objetivo y en los anteriores (Anexo 3). Artículo científico que señala la ganancia energética obtenida en el secado de los residuos (Anexo 2).	La nota para INVESTIGATEC es un resumen de los primeros 3 objetivos del proyecto, y posee un formato más técnico. En el artículo también reúne los resultados de los 3 primeros objetivos, pero con el formato de revista científica.
Diseñar, validar y socializar una secadora solar de baja escala (3 m ³ de capacidad) en el secado de residuos agro-forestales	100%	Secadora solar portátil para el secado de diferentes Tesis de licenciatura de la EIFO. Artículo científico que resume el trabajo de la tesis (Anexo 4).	Como parte de este objetivo que fabrico una secadora solar portátil, la cual se transporto a 4 regiones del país para realizar el secado de las hojas de piña molidas. Como parte de este objetivo se desarrollo una tesis de licenciatura, la cual cubre el proceso de evaluación de la eficiencia de la secadora solar. De esta tesis se elaboro un artículo científico.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

4. GESTIÓN DEL PROYECTO E INCONVENIENTES

En el estudio del gasto energético al secar los residuos ligno-celulósicos fue necesario instalar en la entrada principal de corriente eléctrica un medidor de consumo en kwh. Este instrumento fue comprado e instalado de acuerdo con la fecha propuesta en la planificación. Sin embargo, se realizó la instalación con el personal de administración de mantenimiento de la institución, pero luego de las primeras pruebas se observó que este no estaba bien instalado, y no estaba marcando los valores de consumo reales. De tal forma que fue necesario contactar a un especialista para que realizara la instalación adecuada, para obtener los datos correctos. De forma tal que el proyecto se atrasó algunas semanas en la toma de datos de los secados solar y en el horno convencional.

5. APORTE DE INFRAESTRUCTURA: DOCENCIA DEL CENTRO O LA ESCUELA

1. Mantenimiento y reparación del vehículo Mitsubishi L200 placa # 265-183, utilizado durante el desarrollo del proyecto, así mismo como el combustible para otros vehículos.
2. Dos medidores de consumo, instalados en la entrada principal de corriente eléctrica de la secadora solar y de la secadora convencional marca Nardi.
3. Secadora solar portátil, con capacidad para 3 m³.

6. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

Fueron generados diferentes artículos científicos, notas técnicas y tesis de licenciaturas, los cuales se detallan a continuación:

6.1. Artículos científicos:

- Tenorio, C; Moya, R. 2012. Evaluation of different approaches for the drying of lignocelluloses residues. *Bioresources* 7(3): 3500-3514.

- Moya, R; Tenorio, C. 2012. Energy balance for three drying techniques of three agroforestry lignocelluloses residues. (Bioresources a someter).
- Solano, M; Moya, R. 2013. Behavior of a portable solar dryer for pineapple fiber. Ciencia e Agrotecnología. (Aceptado).

6.2. Notas técnicas

- Moya, R; Tenorio, C. 2011. Trabajos en secado de residuos forestales y agrícolas. InvestigaTEC

6.3. Divulgación externa nacional

- III Encuentro de Investigación, llevado en la Ciudad de Cartago en Abril de 2012.

6.4. Divulgación externa internacional

- No se realizó ninguna divulgación internacional, sin embargo la información se ha puesto a disposición a nivel internacional a través de los artículos científicos.

6.5. Tesis llevadas a cabo

- Solano, M. 2012. “Evaluación de la eficiencia de una secadora solar portátil para biomasa, evaluada con fibra de piña, en cuatro sitios de Costa Rica”. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR, Cartago, Costa Rica.

7. 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 permitimos 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. 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.

8. ANEXOS

ANEXO 1: Tenorio, C; Moya, R. 2012. Evaluation of different approaches for the drying of lignocelluloses residues. *Bioresources* 7(3): 3500-3514.

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

EVALUATION OF DIFFERENT APPROACHES FOR THE DRYING OF LIGNOCELLULOSE RESIDUES

Carolina Tenorio and Roger Moya *

The main objective of this study was to evaluate three methodological approaches for the drying (air drying, solar drying, and hot-air drying) of three lignocelluloses residues in Costa Rica, namely the empty fruit bunches of oil palm (EFB), pineapple plant leaves (PL) with different treatments on this leaf, and sawdust from *Gmelina arborea* (GAD). The initial moisture content (MC_i), the drying times, and the variation of moisture content (MC) with time were determined. A mathematical model of the relation between MC and drying time was also established. The results showed that the MC_i was the highest in PL (over 79%), followed by EFB (over 47%), and GAD (lower than 47%). Drying times were higher for air drying, followed by solar drying, and finally hot-air drying. PL showed the longest drying times, followed by GAD and EFB. However, it can be reduced by shortening strands, application of grooves in the cuticle, or crushing the leaf. The MC variation model revealed that the function was $Y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ for all three drying techniques, and the weather conditions where the drying was tested. This model presents high coefficients of determination (over 0.97) and low percentage of errors (1.85-4.73%).

Keywords: Agriculture waste; Mathematical model; Costa Rica; Drying method

Contact information: Instituto Tecnológico de Costa Rica; Escuela de Ingeniería Forestal; P.O. Box: 159-7050 Cartago-Costa Rica; Phone: (506) 550-2433 / Fax: (506) 591-3315;

* *Corresponding author:* rmoya@itcr.ac.cr

INTRODUCTION

The generation of lignocellulose residues is a considerable problem in Costa Rica (Ulloa *et al.* 2004). Lignocellulose residues from agriculture and forestry constitute a high percentage. Particularly, the forestry industry produces 500,000 m³ in residues (Barrantes and Castro 2009). The production of palm oil and pineapple has shown an upturn in the last few years. The production of oil generates a set of residues from which the empty fruit bunch (EFB) constitutes an average of 26% of the total weight from harvested palms. For instance, in the year 2003, the production was 800 tons, out of which 200 tons were unused waste. Furthermore, the production of pineapple offers potentially more favorable results towards the better use of its residues, considering that aside from the fruit, 133 tons/hectare were comprised by the other parts of the plant (leaves, trunk, and roots) providing the promising amount of 3600 tons/hectare of residues to be used (Ulloa *et al.* 2004).

Over the last few years, with problems associated with the environment and global warming in many regions of the world, better uses of residues have been developed in energy sources for the lumber industry transformation processes (sawdust),

Tenorio and Moya (2012). "Drying biomass residues," *BioResources* 7(3), 3500-3514. 3500

INFORME FINAL DE PROYECTO

"Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica"

and in agricultural crop residues (Shuit *et al.* 2009; Velázquez 2006). Furthermore, for Costa Rica and several other developing countries, the use of these residues would constitute an innovative alternative for the secondary use of these kinds of materials. For the utilization of residues for mushroom production, biogas, and direct combustion for drying agricultural products, continuous feeding of animals and combining composted residues and inorganic fertilizers should be evaluated for mixed and plantation cropping systems (Thiagalingam and Sriskandarajah 1987).

Energy recovery from lignocellulose residues as secondary material brings about many advantages, such as having components from renewable sources with relatively low energy consumption to obtain them (McKendry 2002a). However, it is important to point out that one of the greatest limitations faced by these sectors is regarding the development of a system that truly uses those residues. This is because said materials are from a biological origin with inherent high moisture contents (McKendry 2002a). Hence, for future use, elimination of moisture or water is eminently necessary (McKendry 2002b).

To dry lignocellulose products, several techniques have been traditionally used, from very simple to very complex approaches. The first group is air drying, which does not require any specialized equipment (FPL 2010). Among the sophisticated techniques there are those that require specialized equipment such as rotating drums or conventional drying chambers with boilers (González *et al.* 2011). Solar drying is considered intermediate, or low technology development. It has some advantages, such as a shorter drying time and low moisture contents compared with air drying, in addition to the cost (Langrish and Walker 2006; Skaar 1972) and the minimum energy consumption (Sattar 1994) compared to hot air drying. Biomass drying has received wide interest from researchers worldwide, not just for residues mentioned in this study, but for many other kinds of residues (McKendry 2002b). Studies have covered, besides the design of excellent dryers, the development of very tight drying models and quite real drying kinetic curves (McKendry 2002a). However, the real drying techniques are more complex than those drying systems and models. For example, Muñoz and Moya (2008) found that the drying time was affected by the tree diameter. Wang *et al.* (2005) researched a drying experiment of pineapple leaf wet fibers with a hot airflow drying device, and they chose different drying characteristics, different air flow temperatures, and velocities. However, this research was carried out by chemical analysis for nutrient elements in a laboratory. In EFB residues, Shuit *et al.* (2009) found that fresh EFB became reduced in volume and weight by 85% and 50%, respectively, after ten weeks in composting.

In the case of Costa Rica, there are no official reports on whether lignocellulose residues are being used for energy-related purposes. Thus, methodology for their use is urgently required, and the drying of said residues constitutes a key problem to be solved. In addition, Costa Rican industries can no longer afford to go on without using residual products from their plantations or from crop processing. Therefore, this study has as its objective the presentation of a methodological approach for the drying of lignocellulose residues (empty fruit bunch, pineapple leaves from plants, and *Gmelina arborea* sawdust) according to three techniques: air drying, solar drying, and hot-air drying. This study

Tenorio and Moya (2012). "Drying biomass residues," *BioResources* 7(3), 3500-3514. 3501

gives information on the determination of drying times for each residue when different drying techniques are applied, and thus generate strategies for possible uses.

EXPERIMENTAL

Materials and Origin

Three different lignocellulose residues from agricultural and forestry activities were investigated for drying: pineapple leaves (PL) from plant, fibers from the empty fruit bunch of oil palm (EFB), and sawdust of *Gmelina arborea* (GAD). These residues were chosen as they are currently produced in considerable amounts, and not used by any industry in Costa Rica. PL came from 18-month-old, second harvest plants located in the southern area of Costa Rica. The EFB was collected in the central Pacific area of the country. Finally, GAD came from a sawmill located in the northern area of Costa Rica.

Material Characteristics

Pineapple leaves

Pineapple leaves were processed under two different methods considering the possibilities that currently exist to use them and process them. With the first method, the leaves were cut in strands of three different lengths (Fig. 1a). With the second method, pineapple plants were crushed in a shredder, or miller, commonly used for the extraction of sugar cane juice (Fig. 1b). In the first method, PL were separated from the base of the plant and cut in strands of three different lengths (Fig. 1a): 2 cm (2-strand), 6 cm (6-strand), and 10 cm (10-strand). For the 6-strand and 10-strand, the epidermis and cuticle layer (lower and upper) were maintained. However, for the 2-strand, two treatments were tested: (i) the epidermis and cuticle layer were maintained (2 strand without grooves) and (ii) grooves were opened in the underside to break the cuticle (2-strand with grooves) and determine how it affected the water flow during drying (Fig. 1a). Leaves in the bromelia family have a layer of cells called the cuticle whose function is that of a protective tissue that avoids moisture loss from the leaf (Bartholomew *et al.* 2003). The grooves were drawn 5 mm apart with nails. For the second method (leaf shredding), plants were totally pulled up from the ground, their roots were eliminated, and then they went through a shredder or miller for sugar cane juice extraction. The shredder had a 34 KW, 1725 rpm motor for a linear speed of 90 m/min (Fig. 1b). The apparent density of PL for all of the conditions was 95 kg/m³ in green conditions.

Sawdust

Sawdust was directly extracted from the sawdust evacuation systems of a circular saw (Fig. 1c). The distribution of the length and the percentage of the total weight of the sawdust was: particles larger than 6.7 mm (2%), between 4.00 and 6.70 mm (4%), between 2 and 4 mm (11%), between 1 and 2 mm (31%), between 0.43 and 1.00 mm (36%), between 0.25 and 0.43 mm (11%), and finally with 6% corresponding to particles smaller than 0.25 mm. This distribution of the particles produces an apparent density of 158 kg/m³ in green conditions.

Empty Fruit Bunch

During the process of oil extraction, the EFB with the fruit was heated, and after being separated, the EFB was ground and milled to extract the oil adhering to it during the cooking process. Then, they were milled in length from 6 to 9 cm, which produced a separation of the vascular beams that comprise these types of monocotyledons, and therefore, this type of residue comes in a fibrous shape (Fig. 1c). The fiber length and its distribution were not possible because the milled material did not present vascular separation. The apparent density was 70 kg/m^3 in green conditions.

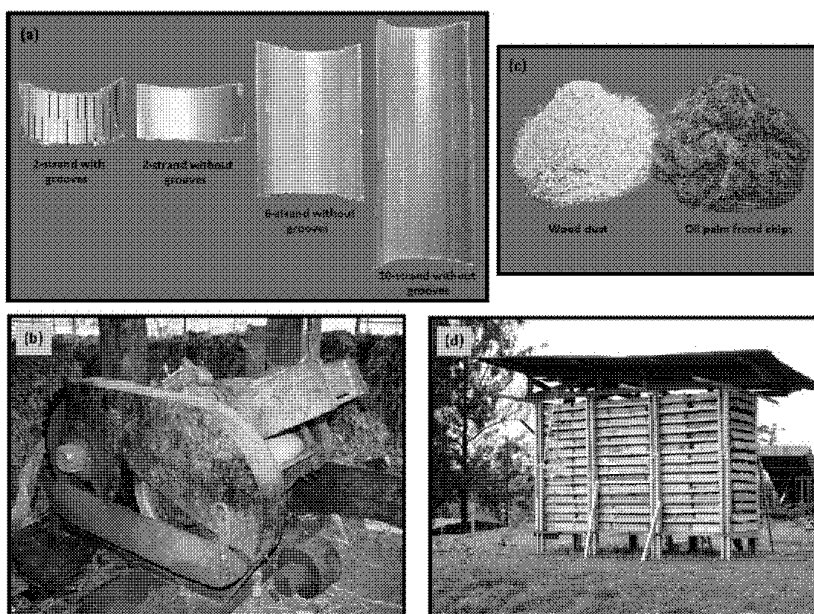


Fig. 1. Different lengths and treatment tested in pineapple leaves (a), shredder for sugar cane juice extraction used in pineapple leaves (b), shape of sawdust of *Gmelina arborea* and empty fruit bunches of oil palm (c), and wood trays used for stack of residues during air drying (d)

Drying Techniques

Air drying

Air drying (AD) took place during the months of February and April at the Costa Rica Institute of Technology campus (Cartago, Costa Rica), at an altitude of 1380 meters above sea level. The temperature during those months was between 17.6 and 19.3 °C, and the relative humidity was 88% and 89.9%; precipitation was between 0 to 50 mm/month, and the average wind speed varied between 12 and 13.8 km/h.

Solar drying

The solar drying (SD) was performed in a 6 m^3 solar dryer (Salas *et al.* 2008). The dryer had a temperature collector (iron sheet) whose function was to capture solar energy

and turn it into heat. Then, this heat moved inside the dryer through fans that move hot air around materials to be dried. The average air speed in this dryer varied from 1.5 to 2.0 m/s (Salas *et al.* 2008). In addition, the chamber had an electronic device that measured the temperature, as well as the external and internal relative humidity conditions.

Hot-air drying

The hot-air drying (HAD) of the materials was carried out in an experimental 2 m³ capacity NARDI dryer. In this dryer, the speed of air movement through materials was 2 to 2.5 m/s.

Stacking the Residues during Drying and Conditions of Drying test

For stacking the residues during drying, containers were designed (trays) that allowed air circulation both under and over the materials. The trays were built from wood with 19 mm x 19 mm mesh bottoms. The dimensions of the trays were 50 cm in length, 67 cm wide, and 7 cm high. The stacking was done in such a way as to ensure a space of 25.4 mm between trays to allow for air passage between them in all three drying processes. To this end, a wooden device was built where the trays were placed with the material. The dimensions of this pile device were 180 cm high, 85 cm wide, and 250 cm long, which were located sufficiently far from the walls for a good air circulation in the AD and HAD. Even though the devices were built to place the trays residues in the trays, their volume and weight varied with the type of drying. In AD only one device was placed with 75 trays (Fig. 1d), and for SD and HAD two devices were placed with 75 trays each, or 150 trays total. The amount of material to be dried in each tray varied according to the material to be dried; 3.35 kg of GAD per tray, 2.11 kg of EFB per tray, 2.24 kg of stranded PL per tray, and finally 2.06 kg of PL crushed per tray. All of these weights were determined with materials in green conditions.

AD and SD were performed simultaneously so that there were no variations caused by climate conditions between both types of drying. Said processes took place during the months of February and April, which correspond to the dry season in the area of Cartago, Costa Rica. HAD was programmed at 80°C and 5% in equilibrium moisture content into the chamber. The external temperature average was 24°C with a maximum of 27°C, and a minimum of 15°C. The relative humidity was about 90% with a maximum of 100% and a minimum of 39%. The internal conditions in the SD chamber were 52% average relative humidity, with maximum and minimum values of 71% and 19%, and an average temperature of 29°C with 57°C as the maximum and 20°C as the minimum.

Humidity Control

For the control of moisture content (MC) variation in the different residue types, four dry samples were used for testing per material and per type of drying technique. Since a granulated material was being tested, a textile bag was used to avoid material loss and allow air circulation. These bags were placed in trays at different heights in the drying devices to be able to monitor the MC in different parts of the chamber (3 bags in each side of the devices at lower, upper, and middle heights). The samples were weighed at the beginning of each drying process and twice throughout the day in the case of AD and SD. For HAD, the MC control samples were weighed every two hours with a

precision of ± 0.05 . Subsequently, at the end of the drying process, these samples were placed in an oven at 103°C (± 1) for 24 hours. The MC of the samples was calculated according to Equation 1. All of the determinations for different residues were determined according to ASTM E1756 (Standard test method for determination of total solids in biomass).

$$\text{Moisture content (\%)} = \frac{\text{green weight} - \text{oven dry weight}}{\text{green weight}} \times 100 \quad (1)$$

Statistical Analysis and Mathematical Modeling

A descriptive analysis was performed (average, standard deviation, maximum, and minimum values) for all of the response variables. Also, variable compliance with normal distribution supposition, homogeneity of variance, as well as the non-presence of extreme data was analyzed. Subsequently, an analysis of variance (ANOVA) was applied to test the differences in MC_i , MC_f , and drying time between the different types of drying techniques for each residue. The mixed linear model was used in the analysis of variance of the wood properties. The model included the following sources of variation: type of drying (d) in three level (AD, SD, and HAD), type of residue (r) in three levels (GAD, EFB, and PL), and the interactions between the type of drying technique and the type of residue. Four dry samples were used for testing per residues and per type of drying (3 type of residue, 3 types of drying, and 4 dry samples = 36 samples). The GLM procedure from SAS (SAS Institute Inc. Cary, N.C) was applied to estimate the significance of the sources of variation. The existence of the significant differences between the averages from MC_i , MC_f , or drying time were verified through Tukey's test ($P < 0.01$). The drying time was evaluated for the total drying time (at the moment it reaches total of drying) and the time when it reached 13% (moisture content corresponding to equilibrium moisture content in the air drying system).

The relationship between the MC and the drying time was modeled applying a polynomial dependency (Equation 2), through a regression analysis. To carry out these analyses, the SAS 8.1 statistical program for Windows was used (SAS Institute Inc. Cary, NC),

$$\text{Moisture content (\%)} = a * (\text{time in h})^3 + b * (\text{time in h})^2 + c * (\text{time in h}) + d \quad (2)$$

where a , b , c , and d are coefficients of the model.

RESULTS AND DISCUSSION

Moisture Content of Lignocellulose Residues

The MC_i for each type of residue varied from 41.8% to 47.1% for GAD, from 51.0% to 53.9% for EFB, and from 87.6% to 79.9% for PL (Table 1). The highest MC_i values were shown by PL in the different drying conditions, followed by EFB, and the

lowest MC_i value was found in GAD, with a MC_i lower than 47% (Table 1). Regarding the MC_i for each type of residue, it was not found statistically different (value $p>0.05$) in the different drying techniques used. The PL in general, show a similar MC_i when they were cut into different strand lengths (Table 1). When being grooved to break the cuticle in the PL, the MC_i remained statistically the same (value $p>0.05$) as when not being grooved. But, when the PLs were shredded, the MC_i is statistically lower (value $p<0.05$) than the PL with or without grooves for all drying techniques (Fig. 2a).

Table 1. Initial and Final Moisture Content and Drying Time for Three Different Lignocellulose Residues Treated by Three Different Kinds of Drying Techniques

Residues		Type of drying	Initial moisture content (%)	Final moisture content (%)	Drying time (hours)	Drying Time reached 13% in MC
<i>Gmelina arborea</i> sawdust		Air	47.1A ± 7.1	13.0A ± 1.2	220 ^A	220 ^A
		Solar	41.9A ± 3.5	4.9B ± 0.7	150 ^B	106 ^B
		Hot air	46.4A ± 2.2	6.6B ± 0.4	35 ^C	28 ^C
Empty fruit bunch		Air	51.0A ± 0.6	6.1A ± 0.6	147 ^A	114 ^A
		Solar	53.9A ± 4.4	7.9A ± 4.3	106 ^B	68 ^B
		Hot air	52.8A ± 2.0	5.9A ± 1.8	32 ^C	27 ^C
Pineapple leaves	2-strand with Grooves	Air	87.4A ± 0.3	5.4A ± 1.8	222 ^A	166 ^A
		Solar	87.0A ± 0.4	2.2B ± 1.6	125 ^B	65 ^B
		Hot air	86.4A ± 0.3	4.8AB ± 1.0	26 ^C	21 ^C
	2-strand without grooves	Air	86.8A ± 0.5	5.7A ± 0.9	222 ^A	171 ^A
		Solar	86.7A ± 0.2	2.8B ± 1.6	125 ^B	62 ^B
		Hot air	86.1A ± 0.4	3.2B ± 1.0	33 ^C	26 ^C
	6-strand without grooves	Air	86.5A ± 1.2	6.9A ± 2.2	314 ^A	242 ^A
		Solar	86.1A ± 0.6	5.7A ± 0.6	167 ^B	70 ^B
		Hot air	86.4A ± 0.4	5.5A ± 2.0	50 ^C	45 ^C
	10-strand without grooves	Air	87.6A ± 0.2	7.7A ± 1.3	342 ^A	277 ^A
		Solar	85.9A ± 0.3	7.9A ± 1.4	167 ^B	134 ^B
		Hot air	86.6A ± 0.8	8.7A ± 1.4	50 ^C	47 ^C
	Leaves shredding	Air	79.9A ± 1.0	4.8A ± 0.4	123 ^A	79 ^A
		Solar	80.7A ± 0.7	2.6A ± 1.4	77 ^B	60 ^B
		Hot air	80.5A ± 1.1	4.8A ± 3.2	35 ^C	21 ^C

Legend: Note: the values after ± are standard deviation and different letters between different drying methods are statistically different at 99%.

Regarding the MC_f , it was found that it varied from 2.3 to 14.0%. The lowest value was found in the SD of the 2-strand with grooves in the PL and the highest for GAD in the AD (Table 1). The different techniques of drying were applied to these residues and resulted in a MC_f that was statistically the same for EFB (6.6% on average), in the PL cut into 6-strand and 10-strand, and when the leaves were shredded. A statistical difference was found in the 2-strand with and without grooves in the PL. AD resulted in a MC_f statistically higher (value $p<0.05$) than SD, but statistically the same as HAD (value $p>0.05$) for the 2-strand with grooves in PL. Also, AD resulted in a MC_f

Tenorio and Moya (2012). "Drying biomass residues," *BioResources* 7(3), 3500-3514. 3506

statistically higher (value $p < 0.05$) than SD and HAD, these two being statistically the same in the case of the 2-strand with grooves in the PL (Table 1).

Regarding PL, there was no significant difference whether it was grooved or shredded (value $p > 0.05$) compared to PL with no treatment (Fig. 2b); however, when the leaf was cut into 2-strand, 6-strand, and 10-strand without any treatment, the MC_f increased with the length increment (Fig. 2c).

Residues come from plants where water is necessary for the cellulose formation, which makes water a natural plant component (McKendry 2002a). But the amount of water for necessary growth varies with the type of plant (John and Thomas 2008). This can be proven in the results obtained with the three types of investigated residues. PL, being a plant with a fibrous beam, has fewer fiber bundles inside its structure and greater parenchyma tissue (Bismarck *et al.* 2005). The tissue where water is maintained produces a higher MC_i , whereas EFB, being a member of the Arecaceae family, has a structure of vascular beams with a moderate parenchymal tissue (Weiner and Liese 1990). Wood, on the other hand, features a fibrous cellular tissue in its structure (Skaar 1972), and therefore it has fewer spaces to store water, thus showing a lower MC than the other residues.

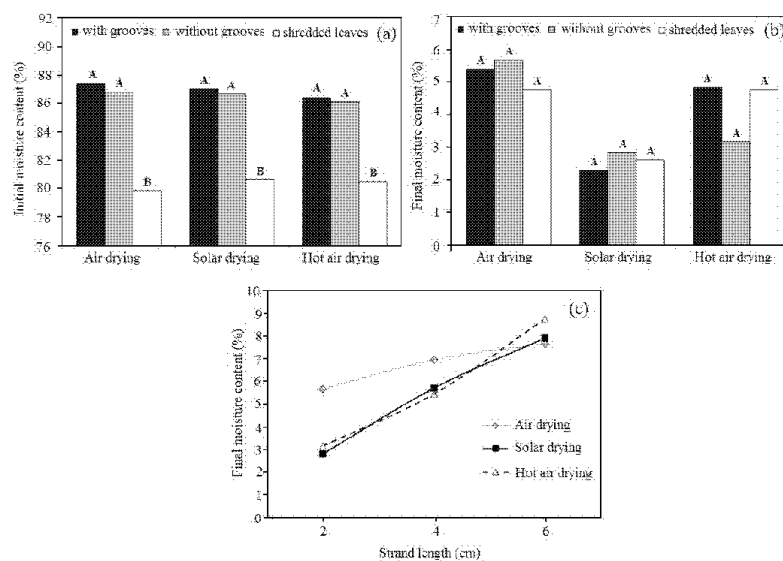


Fig. 2. Initial (a) and final moisture content (b) of pineapple leaves with and without grooves, crushing of leaves, and variation of final moisture content for different strand length (c). Legend: different letters between different drying methods in (a) and (b) are statistically different at 99%

When comparing these results to other studies on EFB, Ratnasingam *et al.* (2008) reports an MC of 67%, a value higher than the one obtained in this study (53.9%). Furthermore, in EFB drying studies using overheated steam, a 50% MC is reported (Shuit *et al.* 2009); this is higher than the present study as well. This difference in MC_i

(approximately 33%) is due to the fact that in previous studies, samples were collected from the fruit of the palm and immediately measured, whereas in this study, EFB was ground and then sampled after being milled.

In the case of PL, studies report a MC_i of 86% (Py *et al.* 1987), a value similar to the one obtained in the present study for PL without any treatment on the cuticle layer. For GAD, Muñoz and Moya (2008) report MC_i values of 170% on over-dried weight (approximate value between 60 and 70% on green weight base) for solid wood of *G. arborea*, this value being higher than the one found for GAD of the same species in this study. The difference can be explained by the fact that during the logging process, hardwood turns into a granulated material separated by the high speed of the tools, which aids in the humidity elimination at that moment, and therefore, in the reduction of MC between hardwood and granulated material. The lowest MC_i in shredder PL with respect to the strand PL of different lengths (Table 1) is attributed to the plant being crushed and shredded, and during this process a portion of water in the plant is lost or eliminated.

Regarding the MC_f , for all types of drying, values lower than 8% were reached with the exception of air-dried GAD, where the highest MC_f was reached (Table 1). This difference can be explained as the equilibrium moisture content (EMC) of each type of drying is different. HAD presented EMC conditions of 4%, while SD presented an EFB of approximately 8% for the site where it took place, whereas the environmental conditions for AD were between 13 and 16% of EMC. In the cellular structure and chemical constituents of wood or sawdust, a balance is established with the EMC of the environment, reaching, in this case, a MC_f on a dry base approximately similar to the environmental EMC. In the case of PL or EFB, the MC_f was lower than 8% for this type of drying technique; however, if the MC_f calculated on an over-dried weight was used instead of a green weight, as in this study, then the MC_f obtained was similar to GAD of 12.4% and 50% for EFB and PL, respectively. These results show that for PL and EFB, the rate of drying is very low in relation to the green weight, and thus low MC_f is to be expected.

Drying Times and Reduction of Moisture Content in Relation to Drying Time

As was expected, the drying times (total and reach 13% in MC) for all three types of residues were longer in AD, followed by SD, and finally HAD. For AD, the drying time in the 2-strand and 10-strand in PL produced longer drying times, but when PL was processed by the shredder, the air drying time was reduced (Table 1). It was observed that when PL were grooved, the water flowed through the cuticle; it did not affect the air drying time compared to samples without grooves. In the case of GAD, air drying times were longer than for EFB, and EFB time was similar to those in the cut PL (Table 1). For AD, the shortest time was found in the shredded PL (Table 1).

SD showed the same behavior as AD, but if the PL were shredded, the drying time will be shortened (Table 1). The grooves of the cuticle did not increase or reduce the drying time of PL (Table 1). The GAD drying time in SD was longer than the drying time for EFB. For HAD, the drying time for 2-strand with grooves in PL was shorter in relation to other strand lengths (2 cm, 6 cm, and 10 cm), and very similar to the one obtained when PL was shredded (Table 1). Also, an increase in the cut strand length increased the drying time in HAD. The GAD drying time was longer than EFB's; it was

similar to the times obtained for PL with grooves and the hours of the shredded PL, but it still had a shorter drying time in relation to PL cut in 2-strand, 6-strand, and 10-strand. The EFB was the residue that showed the shortest drying time for HAD (Table 1).

It was observed that the drying time was related to the temperature in all of the three drying techniques. The shortest time was that for HAD, followed by SD, and finally AD (Table 1). The difference in the drying times can be explained by the fact that at higher temperatures, the MC was quickly reduced as a consequence of a higher evaporation of moisture, and a higher water movement speed inside the material, whereas for lower temperatures there was little evaporation and a lower water movement speed inside the materials. According to this, it is to be expected that AD had the longest drying time for all residues. Also SD had lower temperatures than HAD, and therefore a longer drying time.

A relationship between longer drying times and high MC_i was also observed. PL with high MC_i values presented the longest drying time out of all of the drying techniques (Table 1). However, this behavior was different for EFB. These differences may be explained by the morphology of particles comprising each type of residue. The EFB has an apparent density of 70 kg/m^3 and GAD has a density of 158 kg/m^3 . The lowest density allows a higher circulation of air, which does not happen with sawdust, a much denser, granulated material.

Longer drying times for PL can be attributed to specialized tissues that avoid moisture loss, like the cuticle, which is a water resistant and a protective tissue (Bartholomew *et al.* 2003). This tissue is accountable for the slow loss of moisture during the drying process of PL, for a longer drying time. It is there to favor water elimination in the case of PL, and consequently it is necessary to make modifications such as the following:

1. Grooves or incisions on the leaf cuticle that will aid in water elimination from the surface by reducing the waterproof barrier. However, for low temperatures and slow drying, as happening in AD or SD, these kinds of incisions apparently did not favor the drying times because no statistical differences were found between leaves with or without grooves. On the other hand, for conventional drying, grooves on PL reduced drying time by 7 hours in relation to leaves of the same size without grooves (Table 1).
2. Reducing the strand leaf length; obtained results showed that by reducing the strand length, drying time was also reduced (Table 1) because water flowed easily lengthwise, thus avoiding water trying to go through the cuticle.
3. Shredding in PL; this procedure produced a fully ripped cuticle, thus considerably reducing drying time (Table 1). With the exception of the 2-strand with grooves in PL in HAD, which presented a shorter drying time than that of the shredded PL. Hence, this treatment obtained the best results for PL in MC_f as well as drying times.

Mathematical Modeling of the MC Variation in Relation to Time

The MC reduction with time depends on drying conditions. The reduction was different in each of the tested materials and type of drying (Fig. 3). A lower drying rate was shown in low-temperature drying (AD), but it increased when the temperature was increased, such as for SD and HAD. Among them, SD had the lowest temperature, and

therefore, a lower drying rate for moisture compared to HAD. The highest reduction in the drying time was achieved by EFB, followed by GAD, and then PL (Fig. 3).

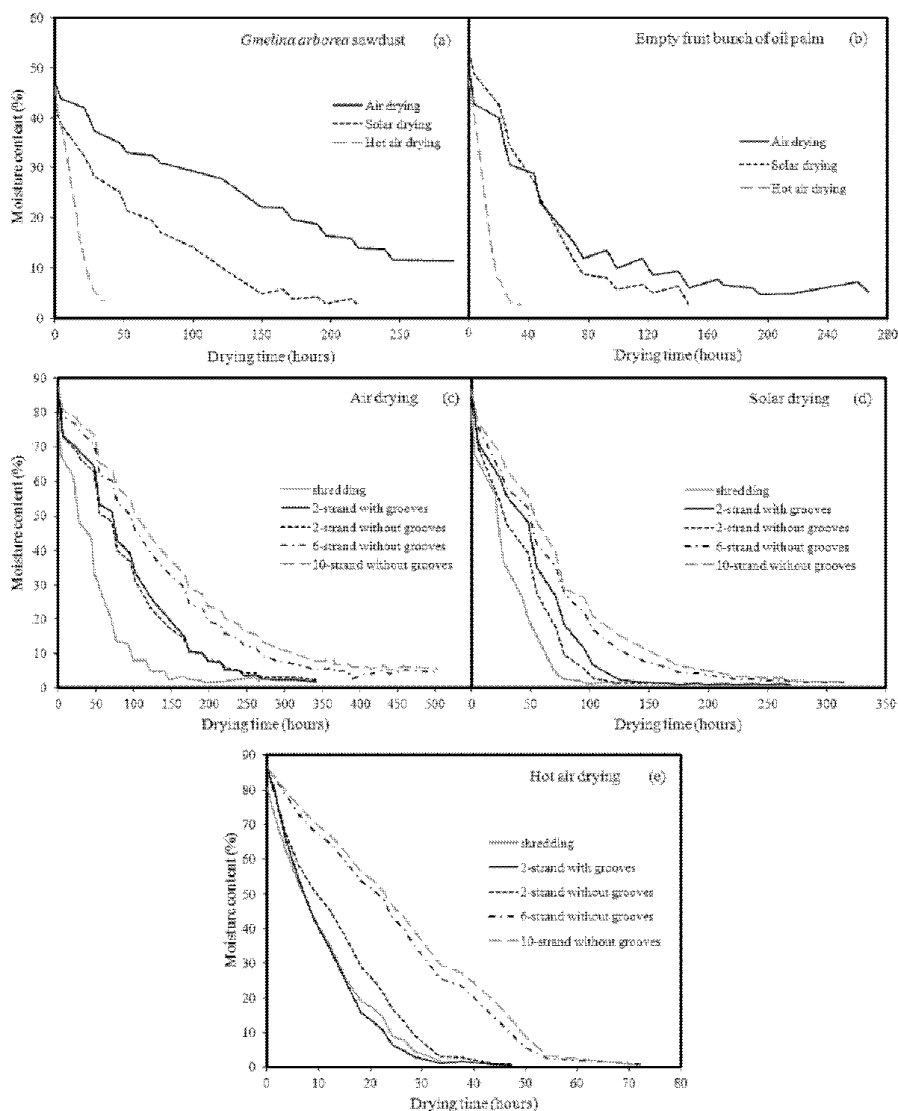


Fig. 3. Variation of moisture content during three different drying methods for *Gmelina arborea* sawdust (a) y empty fruit bunch (b) and pineapple leaves with different treatments during air dry (c) solar dry (d) and hot air dry (e)

For the different kinds of residue, it was found that the MC can be modeled with respect to time with a polynomial function having the following form: $MC = ax^3 + bx^2 + cx + d$. In Table 2, the different coefficients of the model are shown; the determination coefficients (R^2) as well as the percentage error for the different agro-forestry residues. In general, the different residues showed high R^2 (more than 0.97) with the exception of GAD in AD, which presented a value of 0.90 only. The percentage error of the residue models varied from 1.85% to 4.73%. The highest values were those for shredded PL in HAD and in 2-strand without grooves in PL cuts in SD, with an error of 4.73% and 3.84%, respectively. On the other hand, the lowest percentage errors were for GAD and 6-strand for HAD, which presented 1.86% and 1.85%, respectively.

Previous results showed that the proposed model ($MC = ax^3 + bx^2 + cx + d$) provided the best curve fitting for all three drying techniques. In this regard, Diamante *et al.* (2010), adjusting a mathematical model for the MC in relation to time for kiwi and apricots, established polynomial models similar to the one presented in this study. They describe their advantage in the following terms: "the proposed equation uses three constants that can easily be obtained through polynomial regression using statistical packages or even a programmable calculator. This is quite useful for researchers in developing countries with limited computer facilities. It should be noted however, that there is no theoretical base for a good equation curve fitting".

The decrease in the MC for solid wood has been modeled (De Souza *et al.* 1995) using an exponential relationship ($MC = a * e^{-t^b}$), known as the Henderson and Pabis model. For instance, Moya *et al.* (2012), for *G. arborea* solid wood, reported the following model: $y = 69.19e^{-0.009x}$, with a coefficient of determination of 0.88 and an error of 35%, for HAD, a model different than the one found in this study for sawdust of the same species with a coefficient of determination of 0.99 and an error of 1.86%.

An important study in pineapple (Wang *et al.* 2005) found that the relationship between the MC and the time can be modeled by $MC = a * e^{-t^b}$. However, these studies were carried out with a different part of the pineapple plant or different drying methods. Wang *et al.* (2005) dried fibers extracted from PL with a hot airflow drying device. Meanwhile, Wang *et al.* (2005) studied pineapple peel by varying the temperature and material thickness, and they utilized hot airflow drying again.

PL shows certain similarities with many vegetables. For this type of product in general, it is pointed out that the time variation with respect to drying can be modeled by the "Page Model" (Tunde-Akintunde and Ajala 2010). However, in spite of its similarity, the drying variation model is different from the Page model. The said difference can once more be attributed to the PL cuticle, which does not allow for water to be eliminated easily, and therefore, a different variation model may be applied.

Table 2. Coefficient of Model ($MC = ax^3 + bx^2 + cx + d$), Determination Coefficient, and Error of Mathematical Model for Drying of Different Lignocelluloses Residues

Lignocellulose residues	Type of drying	Coefficient of model				Determination coefficient (R^2)	Error (%)	
		a	b	c	d			
<i>Gmelina arborea</i> sawdust	Air	-0.0000* (± 0.0000)	0.0006** (± 0.0002)	-0.21** (± 0.02)	41.02** (± 0.74)	0.9579	1.99	
	Solar	-0.0000 ^{NS} (± 0.0000)	0.0015** (± 0.0003)	-0.41** (± 0.03)	40.73** (± 0.71)	0.9760	2.06	
	Hot air	0.0010** (± 0.0002)	-0.0311** (± 0.0129)	-1.37** (± 0.19)	45.52** (± 0.72)	0.9854	1.86	
Empty fruit bunch	Air	-0.0000** (± 0.0000)	0.0033** (± 0.0002)	-0.65** (± 0.03)	48.19** (± 0.74)	0.9709	2.42	
	Solar	-0.0000 ^{NS} (± 0.0000)	0.0039** (± 0.0011)	-0.82** (± 0.07)	50.28** (± 1.05)	0.9826	2.29	
	Hot air	-0.0005 ^{NS} (± 0.0004)	0.0221 ^{NS} (± 0.0201)	-2.65** (± 0.30)	48.96** (± 1.13)	0.9691	2.91	
Pineapple leaves	2-strand with grooves	Air	-0.0000 ^{NS} (± 0.0000)	0.0012** (± 0.0002)	-0.60** (± 0.03)	84.21** (± 1.19)	0.9815	3.79
		Solar	-0.0000** (± 0.0000)	0.0057** (± 0.0003)	-1.22** (± 0.04)	84.99** (± 1.17)	0.9834	3.50
		Hot air	-0.0010** (± 0.0002)	0.1365** (± 0.0113)	-5.98** (± 0.21)	86.79** (± 1.01)	0.9900	2.93
	2-strand without grooves	Air	-0.0000** (± 0.0000)	0.0017** (± 0.0002)	-0.66** (± 0.03)	83.90** (± 0.95)	0.9873	3.04
		Solar	-0.0000** (± 0.0000)	0.0075** (± 0.0004)	-1.39** (± 0.04)	83.19** (± 1.28)	0.9781	3.84
		Hot air	-0.0000 ^{NS} (± 0.0001)	0.0456** (± 0.0099)	-3.83** (± 0.19)	83.42** (± 0.89)	0.9916	2.58
	6-strand without grooves	Air	-0.0000** (± 0.0000)	0.0009** (± 0.0000)	-0.49** (± 0.01)	87.13** (± 0.76)	0.9892	2.80
		Solar	-0.0000** (± 0.0000)	0.0039** (± 0.0002)	-0.98** (± 0.03)	84.67** (± 0.90)	0.9890	2.79
		Hot air	0.0002** (± 0.0000)	-0.0123** (± 0.0026)	-1.57** (± 0.07)	85.01** (± 0.56)	0.9956	1.85
	10-strand without grooves	Air	-0.0000** (± 0.0000)	0.0007** (± 0.0000)	-0.44** (± 0.01)	88.32** (± 0.67)	0.9916	2.47
		Solar	-0.0000** (± 0.0000)	0.0027** (± 0.0002)	-0.82** (± 0.02)	85.43** (± 0.72)	0.9937	2.24
		Hot air	0.0002** (± 0.0000)	-0.0150** (± 0.0028)	-1.37** (± 0.08)	85.28** (± 0.61)	0.9947	1.99
	leaf crushing	Air	-0.0000** (± 0.0000)	0.0058** (± 0.0003)	-1.16** (± 0.04)	77.65** (± 0.97)	0.9845	3.16
		Solar	0.0000* (± 0.0000)	0.0024 ^{NS} (± 0.0019)	-1.31** (± 0.09)	79.32** (± 1.22)	0.9892	3.12
		Hot air	0.0007 ^{NS} (± 0.0008)	0.0126 ^{NS} (± 0.04)	-3.55** (± 0.55)	78.81** (± 1.81)	0.9722	4.73

Legend: **statistically different at 99%, * statistically different at 95% and NS=not statistically different.

CONCLUSIONS

1. Out of the residues investigated, EFB presented the shortest drying times (with the exception of ground PL in AD and SD) for the three types of drying techniques applied, turning it into a material with great potential for future uses, such as fuel for heat production.
2. By reducing the length of the PL, there was a higher water flow in a longitudinal direction, which resulted in a shorter drying time; specifically leaves cut in 2-strands length had the shortest drying times. Furthermore, by applying some kind of treatment to the PL, such as grooves to the cuticle or shredding of the leaves, the drying times were reduced.
3. For the MC variation modeling, it was found that the 3 degree polynomial model ($MC = ax^3 + bx^2 + cx + d$) provided the best curve fitting for residues in all three drying processes. The application of this experimental model can be used to predict drying curves for GAD, PL, and EFB.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank The Vicerrectoria de Investigación y Extensión of the Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), and Cooperación de Desarrollo Agrícola del Monte S.A. (PINDECO), Palma Tica S.A. Company and Maderas Cultivadas S.A. for its support in sampled trees.

REFERENCES CITED

- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). (2003) E-1756-200. "Standard test method for determination of total solids in biomass," (Reproved 2003).
- Barrantes, A., and Castro, G. (2009). *Usos y Aportes de la Madera en Costa Rica: Estadísticas 2008*, pp 1-27, San Jose - Costa Rica: Gobierno de Costa Rica. Oficina Nacional Forestal.
- Bartholomew, D. P., Paull, R. E., and Rohrbach, K. G. (2003). *The Pineapple: Botany, Production and Uses*, CABI publishing, London, UK pp. 45-85.
- Bismarck, S., Mishra, S., and Lampke, T. (2005). "Plant fibers as reinforcement for green composites," In: Mohanty, A. K., Misra, M., and Drzal, L.T. (eds), *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, Taylor and Francis, Florida, USA, pp. 51-122.
- De Souza, A., Simpson, W. T., and Verril, S. P. (1995). "Laboratory test for grouping tropical species for kiln drying," *Wood Sci. Tech.* 29, 353-362.
- Diamante, L. M., Ihns, R., Savage, G. P., and Vanhanen, L. (2010). "A new mathematical model for thin layer drying of fruits," *Inter. J. Sci. Tech.* 45, 1956-1962.
- FPL (Forest Products Laboratory) (2010). *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*, Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. For. Prod. Lab. Department of Agriculture, Forest Service, Madison, U.S.

Tenorio and Moya (2012). "Drying biomass residues," *BioResources* 7(3), 3500-3514. 3513

- González, J. F., Ledesma, B., Alkassir, A., and González, J. (2011). "Study of the influence of the composition of several biomass pellets on the drying process," *Biomass Bioenergy* 35, 4399-4406.
- John, M. J., and Thomas, S. (2008) "Review biofibres and biocomposites," *Carbohydrate Polymers* 71, 343-364.
- Langrish, T., and Walker, J. (2006). "Drying of timber," In: Walker, J. F. (ed.) *Primary Wood Processing: Principles and Practice*, 2nd Ed., Springer, New York, 251-296.
- McKendry, P. (2002a). "Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass," *Bioresource Tech.* 83, 37-46.
- McKendry, P. (2002b). "Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies," *Bioresource Tech.* 83, 47-57.
- Moya, R., Ureña, E., Salas, C., Muñoz, F., and Espinoza, O. (2012). "Kiln drying defects presence and grouping of wood from ten tropical species growing in fast-growth plantation," *Wood Mat. Sci. Eng.*, (Accepted).
- Muñoz, F., and Moya, R. (2008) "Moisture content variability in kiln-dried *Gmelina arborea* wood: Effect of radial position and anatomical features," *J. Wood Sci.* 54, 318-322.
- Py, C., Lacoëuilhe, J. J., Teisson, C. (1987). *The Pineapple: Cultivation and Uses*, Maisonneuve et Larose, France, 568 pp.
- Ratnasingam, J., McNulty, T., and Manikam, M. (2008). "The machining characteristics or oil palm empty-fruit bunches particleboard and its suitability for furniture," *Asian J. Applied Sci.* 1, 253-258.
- Sattar, M. A. (1994). "Economics of drying timber in a greenhouse type solar kiln," *Holz als Roh- Werks.* 52, 157-161.
- Skaar, C. (1972). *Water in Wood*, 1st Ed., Syracuse Univ. Press, NY, USA, pp. 34-56.
- Salas, C., Moya, R., and Córdoba, R. (2008). "Diseño y construcción de un secador solar para madera," *Kurú: Revista Forestal* 5(14), 1-13.
- Shuit, S. H., Tan, K. T., Lee, K. T., and Kamaruddin, A. H. (2009). "Oil palm biomass as a sustainable energy source: A Malaysian case study," *Energy* 34, 1225-1235.
- Thiagalagam, K., and Sriskandarajah, N. (1987). "Utilization of agricultural wastes in Papua New Guinea," *Resources Conserv.* 13, 135-143.
- Tunde-Akintunde, T.Y., and Ajala, A. (2010). "Air drying characteristics of chili pepper," *International J. Food Eng.* 6(1), 1-17.
- Ulloa, J. B., Weerd, J. H., Huisman, E. A., and Verreth, J. A. J. (2004). "Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: The Costa Rica situation," *Waste Manag.* 24, 87-97.
- Velázquez, B. (2006). "Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética," *Ecosistemas* 15, 77-86.
- Wang, J., Deng Y., and Huang, H. (2005) "Experimental research on drying characteristics of pineapple fiber," *Trans. CSAE*, 2005, 21(10), 151-154.
- Weiner, G., and Liese, W. (1990). "Rattans – Stem anatomy and taxonomic implications," *IAWA J.* 11, 61-70.

Article submitted: April 24, 2012; Peer review completed: June 10, 2012; Revised version received and accepted: June 14, 2012; Published: June 21, 2012.

ANEXO 2: Moya, R; Tenorio, C. 2012. Energy balance for three drying techniques of three agro-forestry lignocelluloses residues. Bioresources a someter.

Balance energético para 3 sistemas de secado de hojas de piña, pinzote molido y aserrín de *Gmelina arborea*

Roger Moya, Carolina Tenorio

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio fue establecer el balance energético que ocurre al secar el pinzote de la palma africana (EFB), hojas de las plantas de piña (PL) de diferentes longitudes y aserrín de *Gmelina arborea* (GMA) en 3 tipos de secado (aire, solar y alta temperatura). Se determinó el contenido de humedad inicial (MCi), tiempos de secado, la variación del contenido de humedad (MC) con el tiempo, el gasto energético por transformación, transporte y secado, punto crítico de secado (cambio en la tendencia del consumo energético) y la ganancia energética. Los resultados mostraron el MCi fue mayor en PL (sobre 79%), seguidas del EFB (sobre 47%), y GAD (menor a 47%). El tiempo de secado fue de 27 a 342 horas y varió según el tipo de secado. La PF presentó los tiempos de secado más largos, seguidas GAD y finalmente EFB. El gasto energético por transformación fue solamente aplicado a PL y sus valores fue de 0.041 a 0.09 kwh/kg. El gasto energético por transporte varió de 0.051 a 0.090 kwh/kg. El gasto energético varió de 0.20 a 1.90 kwh/kg y su modelo matemático en relación con el MC es $\beta_1MC^3+\beta_2MC^2+\beta_3MC+\beta_4$ (polinómico) o $\beta_1\ln(MC)+\beta_2$ (logarítmico). En todos los diferentes tipos de residuos presenta un punto crítico de secado, en GAD fue de 10%, en EFB varió de 11 a 13% y PL varió de 4% a 13%. El balance energético en GAD y EFB fue de 4.0 a 4.5 kwh/kg secado en MC menor a 10%, en PL el mejor balance energético se presenta cuando el MC varía 30 a 40%. Estos resultados permiten establecer que en el caso de secar estos residuos para la producción de calor se debe secar hasta los MC indicados ya que se tienen el valor más alto en el balance energético.

Palabras clave: gasto energético, poder calórico, ganancia energética, secado, secado al aire, secado solar, secado a alta temperatura.

INTRODUCCION

Los desechos orgánicos es 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 se 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, genera alrededor 26% del peso total del fruto en desechos, aproximadamente 200 toneladas/año de este desecho en Costa Rica (Rebeiro, 2007). Por

otro lado, la producción de piña se genera aproximadamente 3600 toneladas/hectárea de residuos en la mata que no es aprovechada (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 en industriales 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 humedad al salir del proceso 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 hasta de 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 por 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 por los investigadores en 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 están involucrado, además del gasto energético para generar el calor para remover el agua

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

(Muller, 2009), debe agregarse otros gastos energéticos como por ejemplo el 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 debe agregarse los gastos de transporte, que en general, para este país, son altos ya que no se cuenta con una estructura vial adecuado 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, y sobre todo el balance energético que se presentan los residuales de las plantaciones o los diferentes cultivos agrícolas. De forma tal que el presente estudio tiene como objetivo establecer el balance energético de 3 tipos de residuos lignocelulósicos 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. Dicha información permitirá los rangos óptimos de secado y los contenidos de humedad de máximo balance energético para cada sistema de secado o residuo y de esta manera generar posibles estrategias para su utilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

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.

Características del material

Hojas de piña: La transformación de las hojas de piña se realizó para dos procesos diferentes: (i) el primer proceso la mata es 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 es 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).

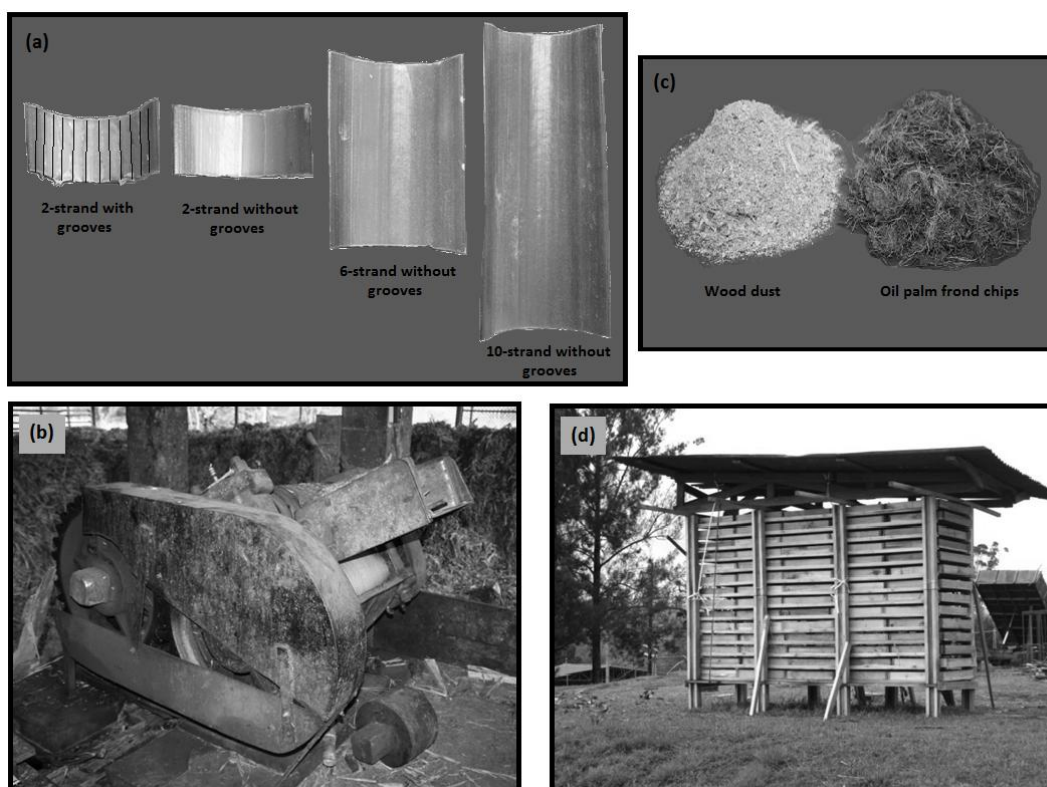


Figura 1. Diferentes longitudes utilizadas en las hojas de piña(a), molino de extracción de jugo de caña utilizado para moler las matas de piña (b), forma de los residuos de aserrín y pinzote utilizados (c) y dispositivo diseñado para colocar las muestras granuladas o molidas durante los procesos de 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 granuladopresentaba 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/m^3 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

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

de los haces vasculares que componen este tipo de monocotiledoneas, por lo que este tipo de residuo tiene forma de 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.

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.

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.

Colocación de los residuos o apilado 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).

Condiciones de 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.

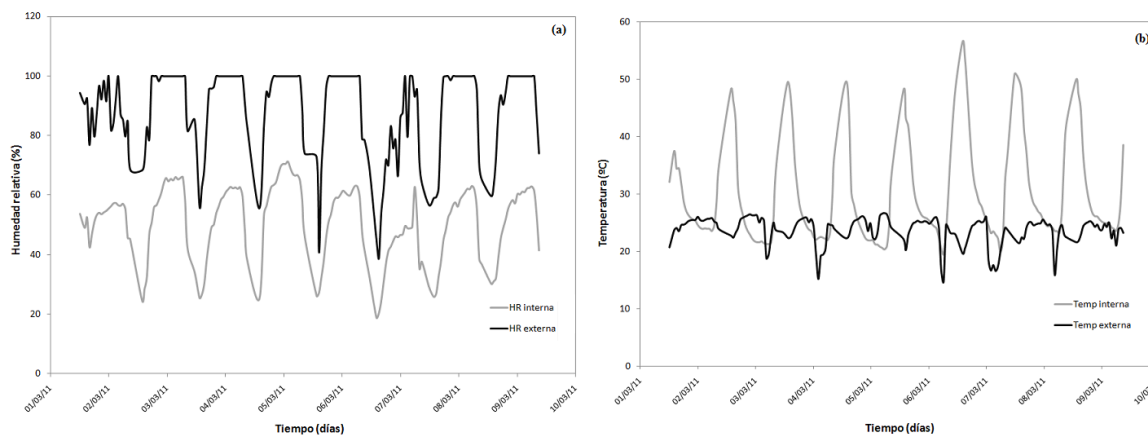


Figura 2. Condiciones internas y externas de humedad relativa (a) y temperatura (b) de la cámara de secado solar.

Aunque fueron construidos 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.

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 pila 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

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.

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

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 kilometro 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 transporto 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.

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

Donde:

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

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.

Ganancia energética

Este parámetro energético fue medido por el poder calórico en diferentes grados de humedad. Para realizar dicho ensayado 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).

Balance energético

Se estableció el gasto energético total a determinado MC por cada unidad de peso de material secado (Ecuación 4). Primeramente fue modelado la relación matemática entre el consumo energético por secado por unidad de peso del residuo (kwh/kg) y el contenido 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 contenido de humedad 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 genero 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).

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

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 se le aplicó 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 ($P < 0,01$).

Punto crítico de secado

Así mismo con el fin de establecer aquel contenido de humedad donde ocurre una inflexión es 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.

RESULTADOS

Contenido de humedad de los desechos agro-forestales 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).

Tiempos de secado en los 3 sistemas de secado

Como de 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, el 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, para alcanzar 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

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 tiene 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 altos consumo energético en el SD se dio para GAD y EFB PL-2 cm sin estrías el con valores de 0,22, 0,36, y 1,46 Kwh/kg respectivamente. Mientras que en el HAD otros consumno energéticos altos se presentó 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 3). 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 3a), pero en el caso de la piña puede alcanzar gasto de energía cercano a 4 kwh/h (Figura 3c). 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 3a). 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 3b). Para el secado solar las PL de 2 cm con y sin estrías son las presentan los valores más altos de gastos de secado, seguidas por las PL de 10 cm, 6 cm y finalmente las PL molidas (Figura 3c).

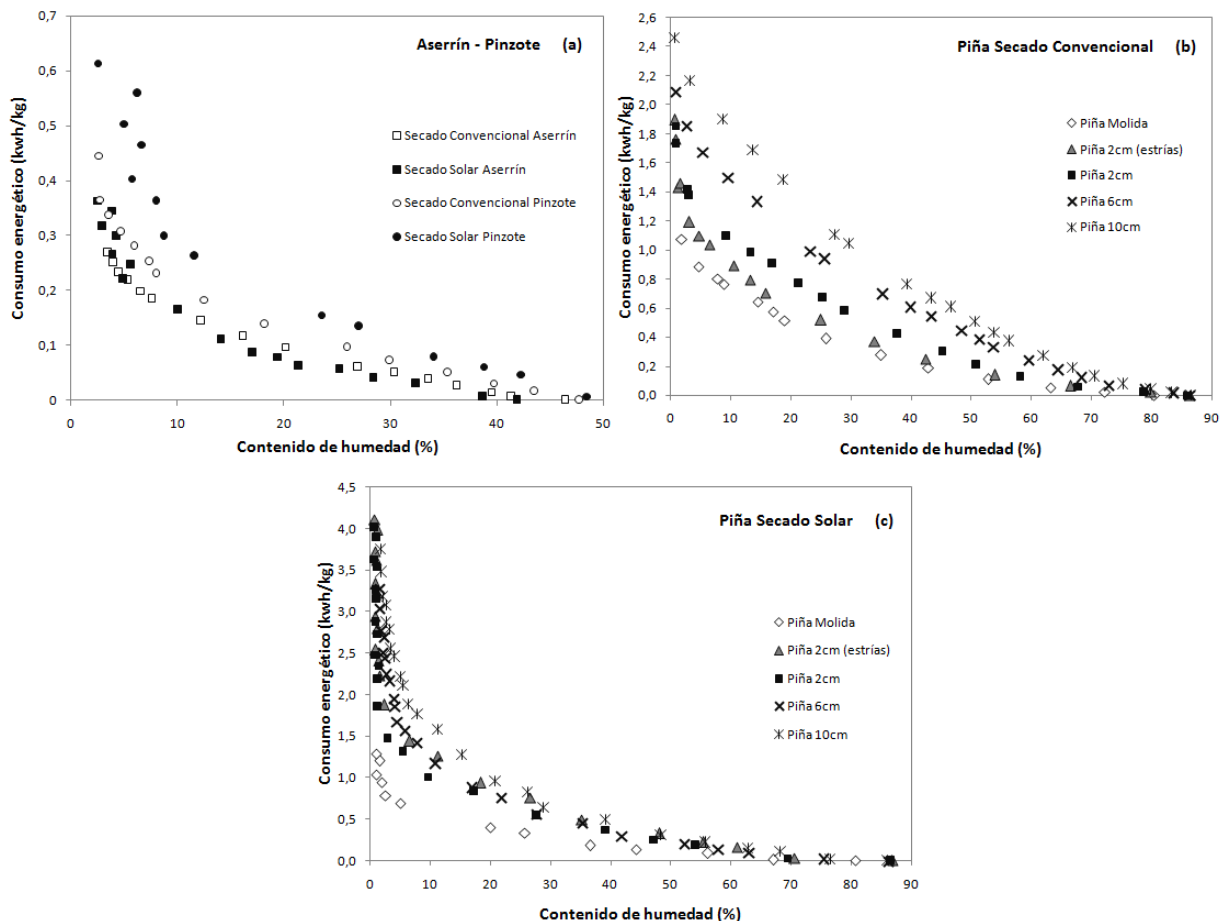


Figura 3. Gasto energético (kwh/kg) para cada residuo por tipo de secado, secado convencional y solar para aserrín y pinzote (a), secado convencional (b) y secado solar para las hojas de piña (c).

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 2, 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

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

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

Model	Residues	Type of drying	Coefficient of model				Determination coefficient	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		-0,00**	0,00**	-0,08**	1,61**	0,95	14,27
			HAD	-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
	Logarithmic $\beta_1 \ln(MC) + \beta_2$	SD	PL 2 cm (estrías)	-0,68**	0,03**	-	-	0,82	58,54
PL 2 cm			-0,71**	2,93**	-	-	0,84	52,48	
HAD		PL 6 cm	-0,74**	3,08**	-	-	0,97	19,63	
		PL 10 cm	-0,89**	0,02**	-	-	0,97	19,90	
		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 2). 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 4a),
- 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 4b).
- PL de 2 cm sin estrías, es de 5% para el HAD y MC menor en el SD, con 3% (Figura 4c).
- En las PL de 2 cm con estrías 8% para HAD y 4% para SD, valores muy similares (Figura 4d).
- 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 4e,f,g).

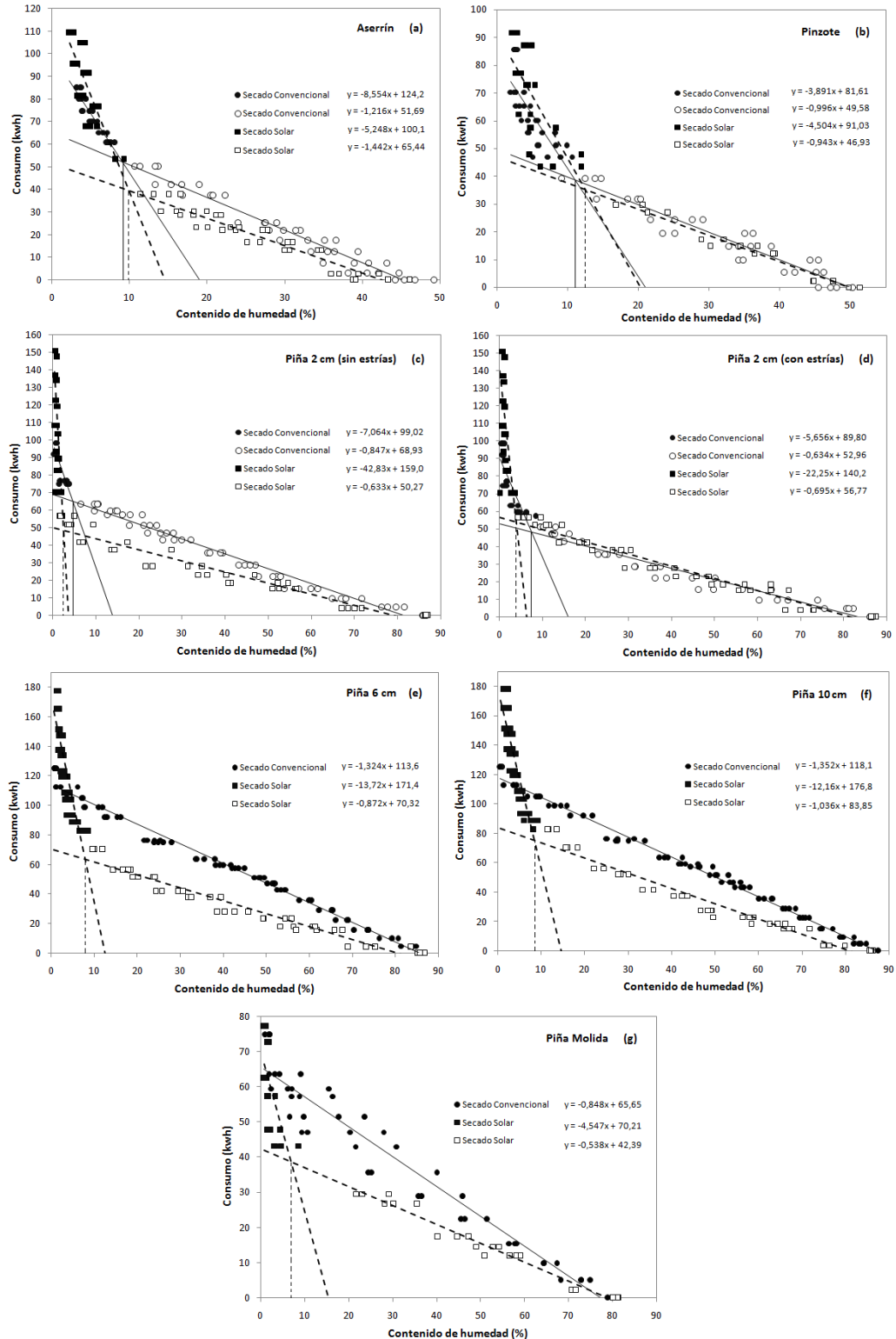


Figura 4. Punto crítico en el consumo (kwh) eléctrico del secado convencional y solar para aserrín (a), pinzote (b) y hojas de piña de 2 cm con estrías (c), sin estrías (d), cortadas en 6 cm (e), 10 cm (f) y las hojas de piña trituradas (g).

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

Balance energético

La variación del balance energético ocurrido durante el secado de los diferentes tipos de residuos son presentado en la figura 5. 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 balance energético disminuye entre 2 o 3 kwh/kg, no obstante esta disminución es leve en la piña molida (Figura 4). Pero en el caso del aserrín y el pinzote este comportamiento fue diferente, el balance energético aumento al disminuir el MC (Figura 4a). Los diferentes tratamientos de la PL, mostró que 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 5a).

En el SD (Figura 5b), 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 5a). 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 3c), 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.

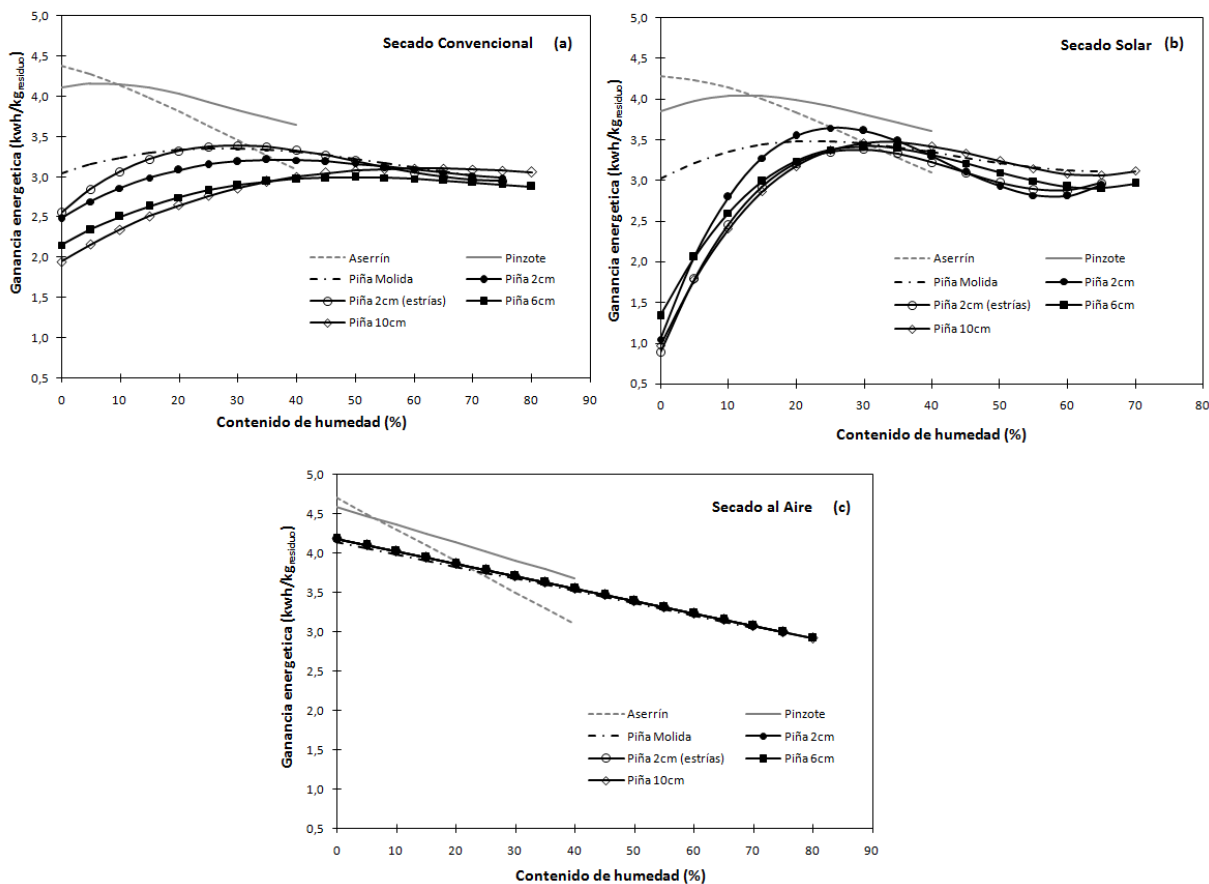


Figura 5. Ganancia energética por residuo para cada tipo de secado, secado convencional (a), secado solar (b) y secado al aire (c).

Análisis de resultados

Contenido de humedad de los desechos agro-forestales en los 3 sistemas de secado

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 presento 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 CHf 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, si se obtienen MCf similar al GAD, de 12,4% y 50%, para el EFB y PL, respectivamente. Estos resultado muestras que en el caso de PL y EFB la proporción del peso seco y es muy baja en relación al peso húmedo, por lo que es de esperar bajos MCf.

Tiempos de secado en los 3 sistemas de secado

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 presento 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 perdida 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 perdida 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 ser el tratamiento que obtuvo mejores resultados para las hojas de piña, tanto en MCf como en tiempos de secado.

Gasto energético, su variación y punto crítico en secado

El gasto energético por transformación es solamente atribuido a PL, esto porque luego de cosechar estas, estas deben triturarse o bien astillarse para facilitar el transporte. A diferencia de biomasa de GAD y EFB, que estos son los residuos de procesos industriales, los cuales ya 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 3).

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 3). Por el contrario, el mayor gasto energético total (Cuadro 1) y en los diferentes MC (Figura 3) 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 3). 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 cuando las hojas no son 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 el gasto energético no ocurre este comportamiento. 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 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 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 ($\text{Gasto energético} = \beta_1 \text{MC}^3 + \beta_2 \text{MC}^2 + \beta_3 \text{MC} + \beta_4$) 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 ($\text{MC} = a * \varepsilon^{-t*b}$) (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 en el modelo logarítmico difiere del modelo polinómico en que el primero al en MC menor a 10% este gasto energético es muy alto con poco cambio de la humedad del residuo (Figura 3c).

Por otra parte, aunque fue posible establecer los modelos para el gasto energético (en Kwh) para los diferentes tipos de biomasas 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 3). 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 en 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 biomasas estudiado. 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 otras 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. Así mismo por debajo de ese valor de MC, el cambio de 1 porcentaje (%) en la humedad, conllevará a un alto consumo de energía.

Balance energético

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 5) no refleja el punto crítico encontrado al medir el gasto energético (Figura 4). En el caso del gasto energético, los valores de consumo incrementan en grandes cantidades cuando el MC varío 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 5a y 5b), 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 5).

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 energética 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 5b).

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 $(\beta_1\ln(MC)+\beta_2)$. 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 este 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.

Bibliografía

- 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
- 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., Gölles, 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
- 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.
- Fagnäsa 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
- 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
- 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, TJ., 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.
- John J. Sabu Thomas S. Review Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers* 2008; 71: 343–364

- 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.
- 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
- 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
- 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.
- Py C, Lacoeylle 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>)
- 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
- 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.

Anexo 3: Moya, R; Tenorio, C. 2011. Trabajos en secado de residuos forestales y agrícolas. InvestigaTEC.

Trabajos en secado de residuos forestales y agrícolas

Roger Moya Roque
Carolina Tenorio Monge

Los residuos provenientes de las actividades agrícolas y del sector forestal constituyen un alto porcentaje, por ejemplo en la industria de forestal se estima que solamente el 20% de la biomasa en las plantaciones forestales llega al mercado. En tanto que en los cultivos agrícolas como la piña, solamente el fruto es aprovechado, dejando de lado la mata, que representa un alto porcentaje de la biomasa, provocando un problema ambiental en el momento de su eliminación.

La utilización de estos residuos, en muchas partes del mundo está orientada a la producción de fuentes energéticas. Sin embargo en el medio costarricense, aún es un tema muy insipiente. Esto porque dichos materiales se caracterizan por presentar un alto grado de humedad, haciendo necesario que para la futura utilización, se deba eliminar el agua contenida en ellos por medio de calor o del tiempo (en el caso del secado natural), con el fin de tener una mayor eficiencia energética (aumento de la capacidad calórica).

Como se menciono anteriormente, en Costa Rica el conocimiento de las propiedades y de los consumos de energía provenientes de residuos agroforestales son desconocidos y poco desarrollados. En este sentido, durante el presente año, investigadores y personal técnico de la Escuela de Ingeniería Forestal, han venido trabajando en establecer: (1) los gastos de energía durante el secado (cantidad de Kwh: kilowatts hora), (2) la capacidad de energía de estos en diferentes grados de humedad (producción de Kwh) y (3) el balance energético entre los gastos y la capacidad energética al secar los residuos agroforestales. Al evaluar el consumo de energía por secado, se consideraron como gastos energéticos: el transporte del material (150 km aproximadamente), la transformación en el caso de la piña y el proceso de secado.

En el proyecto de investigación denominado “Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno-celulósicos producidos en Costa Rica” se estudiaron tres tipos de residuos: aserrín de madera, rastrojo de piña y pinzote palma aceitera. En dicho proyecto se determinó que pueden ser utilizados tres diferentes sistemas de secado: (1) al aire libre, pero protegido del sol y el agua, (2) utilizando una secadora solar y (3) con caldera. En el caso del rastrojo de piña, se trabajó de dos formas: picado a una longitud de 2 cm y la mata de piña molida (por medio de un molino utilizado para extraer el jugo de la caña de azúcar, conocido comúnmente como trapiche).

En las pruebas de secado llevadas a cabo se encontró que:

- a. El agua representa aproximadamente el 46 % en el aserrín de madera de melina, 44 % de su peso en el pinzote de la palma y el 86 % en el rastrojo de la piña (en todos los casos utilizando como base de cálculo del agua el peso del material en verde).
- b. La cantidad de días en eliminar esta cantidad de agua en los diferentes tipos de secado es variable acorde al tipo de residuo (Tabla 1).

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

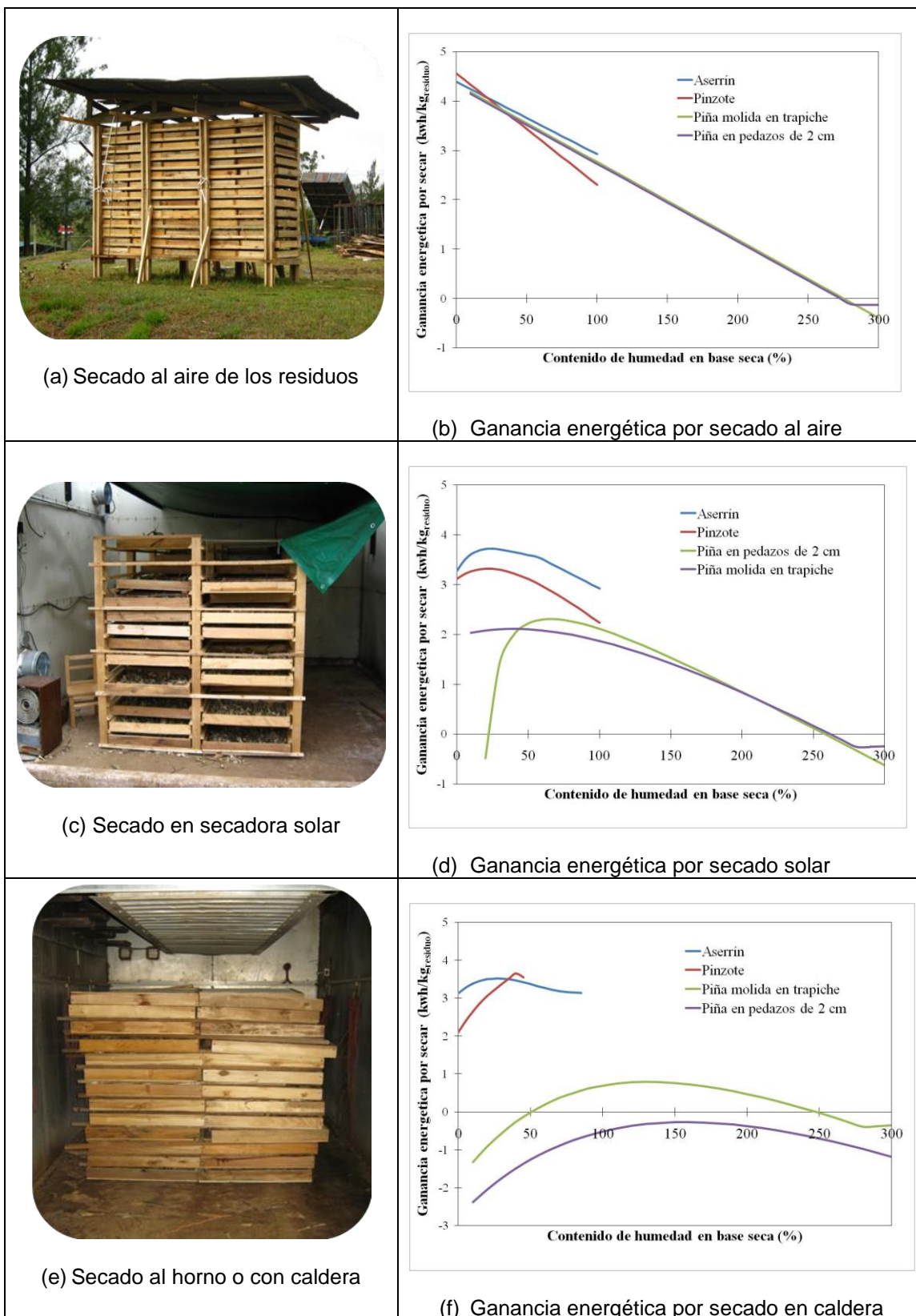


Figura 1. Tipos de sistemas utilizados para secar los residuos agroforestales.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

- c. Si los residuos son secados al aire, en el caso del rastrojo de la piña previamente cortada o picada, se tiene una duración aproximada de 342 horas (equivalente a 14 días), la piña molida de 267 horas (aprox 11), en tanto que el pinzote de la palma aceitera (directamente de las maquinas de aserrío) tarda 267 horas (aprox 11 días) y en el caso del aserrín (una vez que se ha extraído su aceite) tarda 289 horas (aprox 12 días) (Tabla 1).
- d. Al utilizar una secadora solar para secar estos residuos estos tiempos disminuyen a 269 horas, 123 horas, 147 horas y 220 horas para rastrojo de la piña, piña molida, pinzote y aserrín respectivamente.
- e. Sin duda alguna utilizar una fuente de calor mayor como una caldera provoca que los tiempos de secado sean los más bajos, 47 horas para la piña, 33 horas para la piña molida, 35 horas para el pinzote y 35 horas para el aserrín (Tabla 1).

Tabla 1. Tiempos de secado (horas) por residuo y tipo de secado.

Tipo de secado	Piña		Pinzote	Aserrín
	Trozos de 2 cm de largo	Molida		
Aire	342	267	267	289
Solar	269	123	147	220
Caldera	47	33	35	35

- f. El de mayor consumo de energía por secar, como era de esperar, fue medido en el secado con caldera, seguido del secado solar y finalmente el secado al aire.
- g. Los valores de ganancia energética por cada kilogramo de residuo para diferentes porcentajes de humedad presentan un máximo de 4,5 Kwh para sistemas de secado de bajo consumo energético como lo son el secado al aire y el secado por medio de secadora solar (Figura 1b y 1d). No obstante, en un sistema de secado de alta demanda energética como una caldera, la ganancia energética es solo producida en residuos de baja humedad inicial como el aserrín o pinzote, en tanto que en residuos de alta humedad como el rastrojo de piña esta ganancia es limitada (Figura 1f).
- h. Al evaluar la ganancia energética del aserrín de melina o del pinzote, en el secado al aire y en el secado solar se obtienen valores cada vez más favorables al secar a bajos contenidos de humedad (Figura 1b y 1d). Sin embargo, cuando se requiere de una alta cantidad de energía para secar como una caldera eléctrica, la ganancia energética para el caso del pinzote es cada vez menor con forme disminuye el contenido de humedad, pero en el caso del aserrín de melina dicha ganancia es la relativamente constante (Figura 1f).
- i. La ganancia energética del rastrojo de piña es el más sensible de los residuos estudiados. En el secado al aire y con la ayuda de una secadora solar para lograr tener una ganancia positiva se debe secar al menos hasta 270 % de humedad (Figura 1b y 1d), la ganancia energética aumenta con forme disminuye la humedad en el residuo. Sin embargo, en el

secado solar si a la mata de piña no le es extraída previamente el agua, como por ejemplo en un molino de caña, si se seca a un contenido de humedad inferior a 50 %, la ganancia energética tiende a disminuir (Figura 1b). Este tipo de sistemas de secado, a pesar que son eficientes en humedades inferiores a 270 %, tienen el inconveniente de que se necesita mucho tiempo en alcanzarlas.

- j. Cuando la piña es secada con una caldera, la máxima ganancia energética es menor a 1 Kwh por cada Kg de rastrojo que se queme, pero para lograr estos valores la mata de piña tiene que previamente haberse molido y secado en un rango de humedad de entre 100 y 150 % (Figura 1f). No obstante si esta mata de piña se pica en pedazos de 2 cm a pesar de que se obtenga calor del residuo, este no compensa las inversiones en energía en secar (balance energético negativo).

- **Anexo 4:** Solano, M; Moya, R. 2013. Behavior of a portable solar dryer for pineapple fiber. Ciencia e Agrotecnologia. (Aceptado).

BEHAVIOR OF A PORTABLE SOLAR DRYER FOR PINEAPPLE FIBER **Comportamento de um secador solar para fibras de abacaxi**

Abstract

In Costa Rica, there has been a growing interest to use pineapple fiber from plant, for which current processes need to be improved or new processes need to be developed, with emphasis on drying methods. This work presents the design and evaluation of the efficiency of a prototype portable solar dryer in four sites of Costa Rica. The design describes the main parts of the dryer, as well as how they were constructed. The behavior was evaluated according to temperature and relative humidity inside the chamber, and the influence of direct and indirect solar radiation, relative humidity and temperature outside chamber. In order to achieve improved dryer efficiency, a dehumidifier was used to control relative humidity, and a heating system was implemented during the hours of low temperature, low solar radiation and high relative humidity. Based on drying time, final moisture content of fibers of pineapple leaves from plant, and the varying hours when fibers were put to dry, the evaluation of the dryer revealed that the best fiber-drying interval is from 6h00 to 14h00, and after that, it is convenient to inject hot air and use a dehumidifier in the dryer in order to increase its efficiency.

Index terms: Air drying, Relative humidity, Moisture content, Temperature, Solar radiation.

Introduction

Costa Rica has recently developed an interest in using the pineapple plant (ULLOA et al., 2004). However, for its proper usage it is necessary to have a drying process. Traditionally, Costa Rica has used different drying systems such as drying with electric ovens, or from the combustion of gas, petroleum or firewood (COSTALES, 2010). However, air drying is the most widely used system, with the disadvantage of reaching moisture content (MC) levels between 18 and 24%, depending on the geographic region (SALAS et al., 2008).

Nowadays, solar energy drying systems have gained popularity (EKECHUKWU & NORTON, 1999), since it is an ecological alternative in agricultural production (COSTALES, 2010). There are many solar drying examples, such as for timber (SALAS et al., 2008) and for a great variety of food commodities (JANJAI et al., 2006; ZHIMIN, 2006; LOTFALIAN et al., 2010).

However, solar dryers have one drawback: they are dependent on solar radiation and on the variability of environmental conditions during the day, particularly regarding the presence or absence of clouds. Clouds may reflect up to 70% of solar radiation (AZHARI et al., 2008). Other factors may affect, such as the latitude, topography, soil reflectivity, water vapor content, aerosols in the atmosphere and day of the year (WRIGHT, 2002; AZHARI et

al., 2008). In areas where solar light is abundant, the use of solar dryers reduces energy costs associated with conventional sources (OKALA et al., 2011).

Costa Rica has an average temperature of 14-27 °C and an average relative humidity of 68%, although these conditions may vary during the day: between 01h00 and 8h00 and after 15h00, environmental humidity can be over 90%, increasing during the rainy season (ALVARADO, 2001). Such climatic conditions do not allow for efficient solar drying systems, since there is constant need to exchange the air in inside chamber of the dryer with dry air from the outside chamber. Introduction of air with low relative humidity inside drying chamber permits efficient drying of the material.

In view of the problems of high relative humidity in the environment and the need to search for low-cost drying equipment to dry pineapple fiber for subsequent use, the present work's objective is to evaluate the efficiency on the field of a versatile solar dryer, as a proposal for fiber drying in different climatic scenarios.

Materials and methods

Portable solar dryer proposal: the dryer was designed to use materials that are commonly found in construction materials distributors (Figure 1a). The dryer has 3.0 m wide, 1.7 m deep and 1.9 m tall (Figures 2a and 2b) and it is easy to transported and assembled anywhere. The dryer is made of two walls, four doors, a foldable top, a wooden base and floor, a baffle and a metallic solar collector.



INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

Figure 1. General view of portable dryer pilot for drying pineapple leaves fiber (a) and localization of fiber samples inside (b) and outdoor (c) the chamber.

Additionally, fans are needed for air circulation and a dehumidifier to decrease relative humidity (RH) inside the chamber. Following are general specifications for the construction: *Base and floor*: a wooden base was constructed and prefabricated floor was placed on it (Figure 2c). *Walls*: they are made of wood, fiberglass as an isolator in the internal area, and flat zinc plates on the internal and external parts. One of the walls has four windows (40 cm wide and 40 cm tall) to allow air exchange within the chamber. Conventional lattice was installed in the vents to open and close them. *Roof*: it is made of aluminum tubes with 3 mm thick polycarbonate plates (Figure 2d). It can be folded into two halves; this design facilitates its manipulation and transportation. Also, a grid was built to give it further support and resistance (Figure 2d). *Doors*: they are covered internally and externally with flat zinc plates, with fiberglass filling in between. The dryer parts are assembly, firstly base and floor are located (Figure 2c), afterwards two walls are fixed in the floor and joint with two boards in the top (Figures 2g). The fiberglass roof is displayed (Figure 2d) and located in the top (Figure 2g).

The chamber is composed by a black painted iron plate and is placed within the dryer. Beneath the collectors is a baffle, to re-direct air currents within the drying chamber. Two fans, are found close to the vents on the upper side and they are directed towards the solar collectors, to form an air current. *Control of relative humidity and temperature*: to address the high RH conditions in Costa Rica a dehumidifier is proposed, which works with a solar panel. With regard to low temperature, a heat injection method was designed (Figure 2f), which consists of a gas burner that can either use Liquid Petroleum Gas (LPG) or otherwise be adapted for biogas.

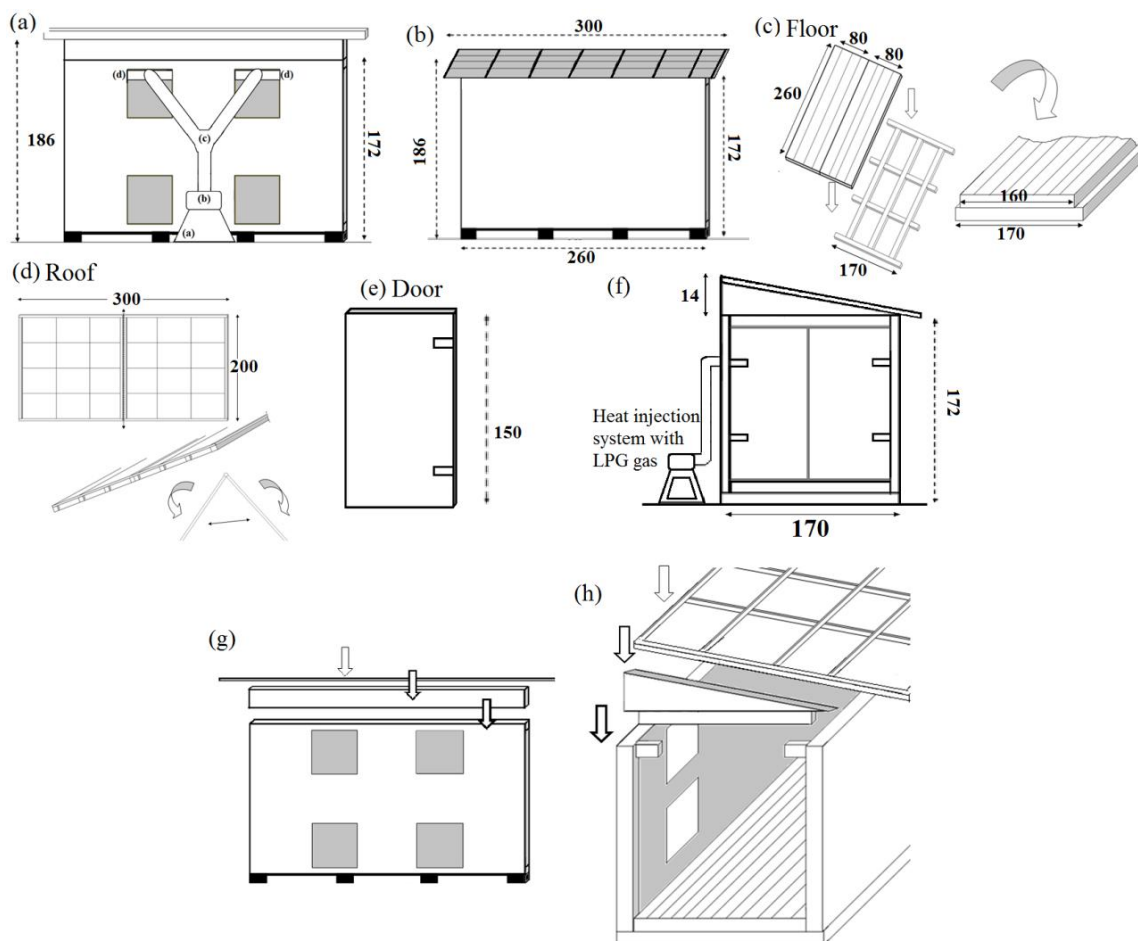


Figure 2. Dimension (cm) and assembly of portable pilot kiln (a and b). (a) heat injection system inside chamber by lateral side (c) wood floor assembly, (d) Fiberglass roof, (e) door (f) heat injection system (box burner and turbine pipe extractor) in side view, (g) lateral assembly.

Evaluation of dryer efficiency with pineapple fiber

Four tests to check the functioning of the dryer were carried out in four sites with diverse climatic conditions in Costa Rica (Figure 3). Efficiency evaluation considered: (i) temperature (IT) and relative humidity (IRH) inside the chamber; temperature and relative humidity (ET and ERH, respectively) outside chamber; (iii) direct and indirect solar radiation (DSR and ISR, respectively). To evaluate fiber drying, moisture content (MC) and drying time (DT) were considered, and ultimately the drying efficiency was compared with natural condition (outside) or air fiber drying.

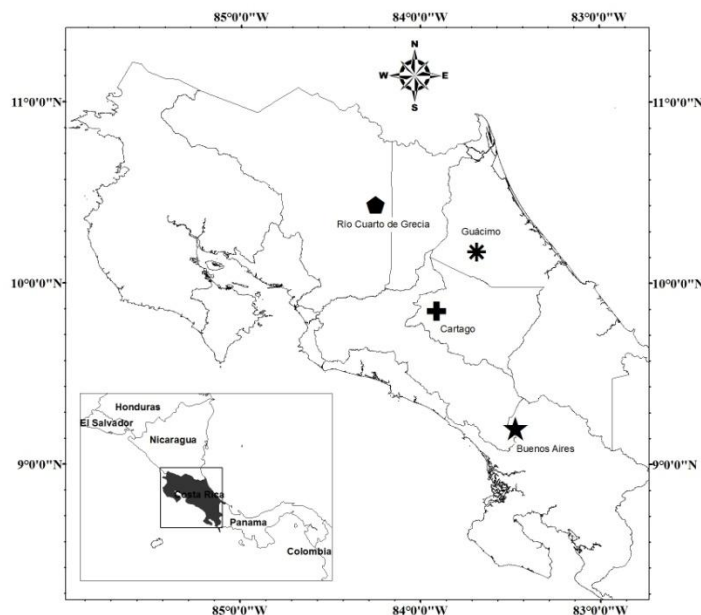


Figure 3. Localization of site studied in Costa Rica-Central America

Temperature, relative humidity inside and outside the chamber and radiation measurements: measurements of environmental variables were performed at 30 minutes intervals. A hygrometer was used for IT, ET and IRH measurements (Shack brand, Cat No 63-1032 model). ERH was determined with a portable meteorological station (Kestrel 3000). A pyranometer was used to measure DSR and ISR (Daystar's brand, DS-05A model). To take DSR measurements, the instrument was perpendicular to sun rays, while ISR measurements were taken on the dryer's top, maintaining the instrument with the same inclination and position of the roof.

Study sites and drying conditions: in four sites, a flat, open-spaced location was chosen. The dryer was positioned in a north (highest section) to south direction (lowest section) to obtain the highest solar radiation possible. The test dryings were carried out on Feb to Mar. Following is an outline of the order and conditions established for the drying tests:

- Río Cuarto of Grecia- Alajuela (10°26'09 N and 84°14'58 W). Fans were placed on the floor of the drying chamber and the dehumidifier was not used to control IRH. Vents were opened and closed according to the chamber's IRH in order to regulate it (Figure 3).
- Guácimo-Limón (10°10'25 N and 83°41'10 W) and Buenos Aires- Puntarenas (9°12'07 N and 83°28'19 W): Fans were placed on the upper side of the chamber and the dehumidifier was used to control IRH. Vents were not opened (Figure 3).
- Cartago on the campus of the Instituto Tecnológico de Costa Rica-Cartago (9°50'59 N and 83°54'37 W) (Figure 3): Fans were used on the upper side, and the dehumidifier was used on the lower side. Additionally, the hot air system was implemented with the LPG gas burner (Figure 2f).

Pineapple fiber: Pineapple plants without fruit were used for fiber extraction. It was used their leaves with a length of 60-80 cm. The fiber was extracted using a machine similar to that used for cabuya (*Furcraea andina*) fiber extraction (<http://www.youtube.com/watch?v=AWBg80ZSUQU>). Evaluation of the drying process was done during one work day per site, from 06h00 am to 14h00 pm. In order to evaluate drying at

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

different times of day, 6 samples were extracted every 1 or 2 hours within the work day. The samples had a varying weight of 250 to 350 g. Each sample was divided into two lots; one for evaluating the solar dryer and the other served as a blank sample to evaluate air drying, except in the Río Cuarto. The fiber samples in the air drying were not tested because we had problem with this.

Variation of the moisture content (MC) and drying time (DT): fiber samples were weighed at intervals. When temperature raised over 26°C, they were weighed every hour; meanwhile, if the temperature was below 26°C, the sample was weighed every 2 hours. Drying concluded once the samples reached their constant weight inside the chamber. Afterwards these samples were placed inside an oven at 103°C for 24 hours to determine MC (Equation 1), according to Samuelssona et al. 2006. DT was calculated by the amount of time required for samples to achieve 15% MC.

$$\% \text{ Moisture Content} = \frac{\text{Green Weight} - \text{Dry Weight in Oven}}{\text{Green Weight}} * 100 \quad (1)$$

Material placement inside the chamber and outside: the material was placed under two conditions: inside or outside the dryer (control); the latter of which called air drying. Inside and outside the chamber the samples were placed on nylon racks (Figure 1b and Figure 1c).

Statistical analysis: A descriptive research was performed on all studied variables. Maximum and minimum values, averages and standard deviations were calculated. Likewise, variables were tested to ensure they had normal distributions and homogenous variance. Next, an analysis of variance was done to verify differences between initial MC, final MC and DT in the different study sites and hours. Significant differences between the average were verified through Tukey's test ($P < 0.01$). Furthermore, the temperature change (ΔT) between IT and ET was calculated; following which a regression analysis to correlate this parameter with ET, DSR and ISR was performed.

Results

Temperature and relative humidity conditions within the drying chamber

The highest IRH was obtained in Río Cuarto, where dehumidifier was not used. IRH diminished to an average of 34 to 44% in sites where dehumidifier was used (Guácimo, Buenos Aires and Cartago) (Table 1). The highest average TI was found in Buenos Aires, whereas the lowest was found in Río Cuarto.

Table 1. Relative humidity and temperature conditions inside the chamber, solar radiation and temperature change.

Variable	General	Río Cuarto	Guácimo	Buenos Aires	Cartago
Relative humidity inside the chamber (%)	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]
Temperature inside the chamber (°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]
Indirect solar radiation ($W m^{-2}$)	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]
Direct solar radiation ($W m^{-2}$)	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]
Variation of ΔT (°C)		-6 a 4	0 - 14	0 - 14	2 - 18

Legend: (...) = standard deviation, [...] = maximum and minimum, ΔT = Temperature change between inside and outside

A comparison between IRH and ERH conditions revealed that when dehumidifier was not used in the dryer, such as in the case of Río Cuarto (Figure 4a), IRH was higher or very similar to ERH. Contrariwise, in sites where dehumidifier was used, IRH was always below ERH (Figures 4b, 4c and 4d). It is also important to observe that the maximum differences between IRH and ERH were found in Cartago (Figure 4d).

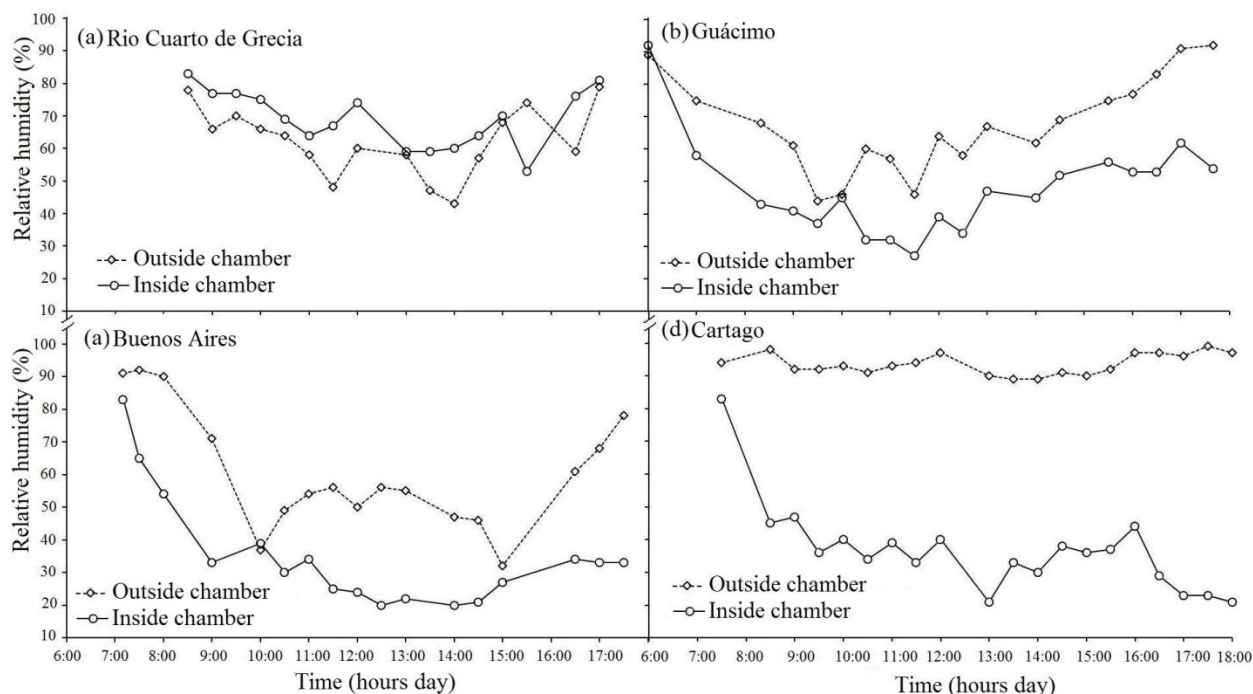


Figure 4. Relative humidity inside and outside of chamber for four sites during different time days.

IT and ET shared a similar pattern in Río Cuarto (Figure 5a). In Guácimo (Figures 5b), both temperatures behaved as expected, increasing during the first morning hours and decreasing during the afternoon. Also, for the dryer to function optimally, IT was higher than ET in these sites. Lastly, in Cartago an increase in both temperatures was observed during the morning hours, and then it began to decrease. In this site the dryer can be expected to be more efficient, since IT was distinctly higher than ET (Figure 5d). It is important to note that in this site, with the aim to avoid IT decreasing within the drying chamber –as was observed in the two aforementioned sites- a heat source was applied when temperature started descending (at 16h00). This prevented IT from decreasing, and actually it rose close to 50 °C (Figure 5d).

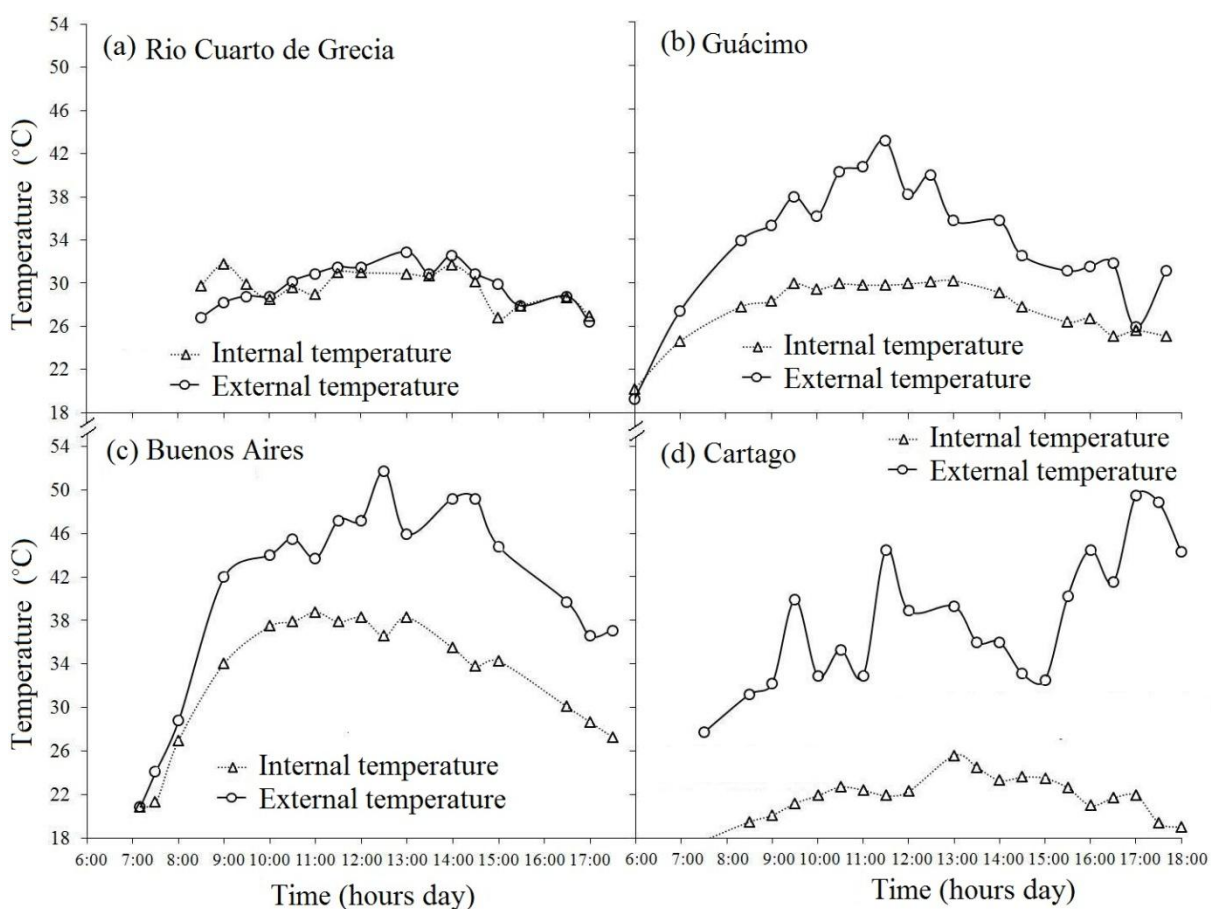


Figure 5. Temperature inside and outside of chamber for four sites during different time days.

Effect of solar radiation and external temperature on the chamber's internal temperature

As mentioned earlier, the effect of solar radiation was measured with the change of temperature between IT and ET (ΔT). The ΔT in Río Cuarto was low, from -6 to 4 °C, followed by Guácimo and Buenos Aires, with a change from 0 to 14 °C, and then by Cartago with a ΔT from 2 to 18 °C (Table 1).

Pineapple fiber drying test

Table 2 shows average initial moisture content (IMC), final moisture content (FMC) and DT for each site and time when fiber was placed. With regard to pineapple fiber IMC, values ranged between 70 and 77%, where average IMC was statistically equal ($p > 0.05$ value) in all sites and different hours day, except at 9h30 in Buenos Aires, where IMC was statistically different to all the other conditions. Moreover, FMC varied in every site and was relatively stable regarding the time fiber was placed in the chamber. The lowest FMC was found in Cartago, and the highest FMC in Río Cuarto. Not differences were found in FMC with respect to time of fiber placement in Cartago, but some differences were found in their sites (Table 2).

DT varied according to the site and the time when the fiber was placed to dry. Cartago presented the lowest DT, 3 hours and 44 minutes; followed by Buenos Aires and Guácimo with 4 hours and 59 minutes and 9 hours and 37 minutes, respectively. The longest DT was obtained in Río Cuarto. On the other hand, DT had the lowest values when fiber was placed within the dryer before 12h00 in all sites. After that hour, the time needed may extend from 1 to 4 hours (Table 2). When analyzing DT, if a 15% FMC was standardized, it was found that DT within the dryer was relatively constant between 07h00 and 11h00-12h00; if samples were placed after that hour, DT tended to increase in Buenos Aires (Figure 6a), Guácimo (Figure 6b) and Río Cuarto (Figure 6c), but in Cartago DT was fairly constant during the different hours (Figure 6d).

Table 2. Initial and final moisture content and drying time of pineapple leaves fiber in solar drying and natural dry for different hour's day in four sites of Costa Rica.

Site	Hour's Day	Initial moisture content (%)		Final moisture content (%)		Drying time (h)	
		Solar drying	Air drying	Solar drying	Air drying	Solar drying	Aire drying
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
	Average	74.40	73.27	10.34 ^l	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
	Average	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
	Average	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	-
	Average	73.96 ^l	-	30.35	-	14:46	-

Legend: Different letters between solar and air drying are statistically different at 99%.

*The fiber samples in the air drying were not determined because some problems were presented.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

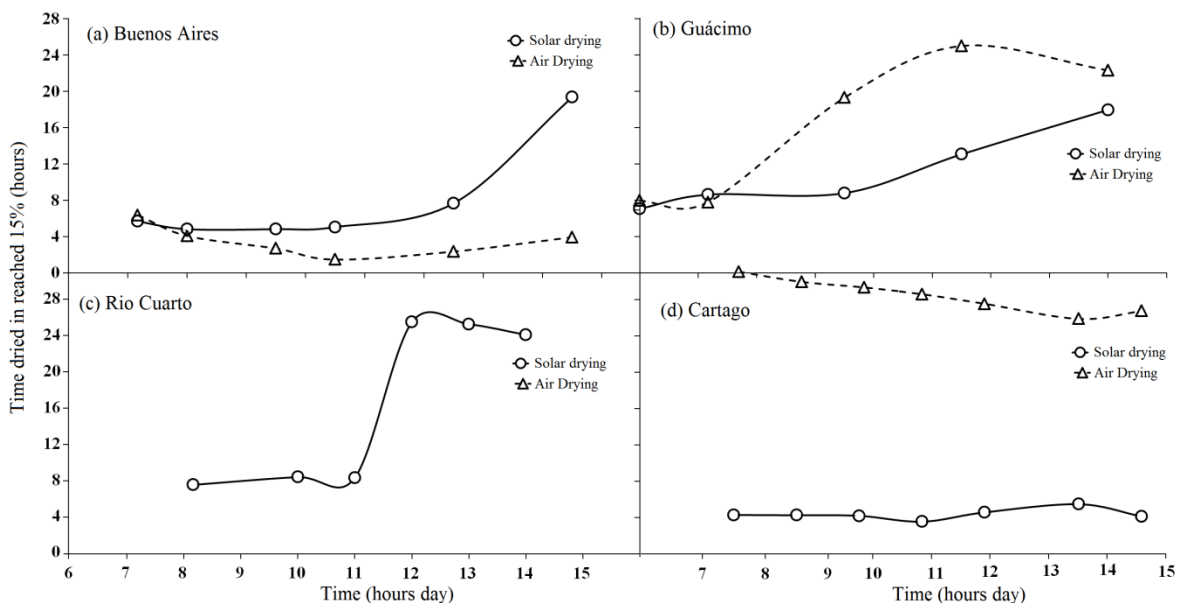


Figure 6. Drying time at different moisture content in different time across day in four site of Costa Rica.

It was found that there was not visual difference between fiber quality dried in solar and natural condition. But when comparing FMC and DT results of solar drying and air drying, these parameters were related to the site and time of sample placement. In Buenos Aires, pineapple fiber placed inside the solar dryer when finalizing the drying had statistically equal FMC values ($p > 0.05$ value) to that obtained in air drying, but FMC was statistically inferior to air drying at 10h30. In Cartago, all solar drying averages were lower than air averages, regardless of the time when pineapple fiber was placed (Table 2). As for DT, in Buenos Aires air drying had lower DT than those obtained with the solar dryer (Figure 6a). In Guácimo statistical differences were obtained from 9h00 onwards ($p < 0.05$ value), and solar drying presented the lowest averages (Figure 6b). Finally, in Cartago (Figure 6d), solar drying had the lowest values at all fiber placement times than what was obtained by air drying.

Analysis of results

High IRH values found in Río Cuarto (Table 1) and their daytime behavior can be explained mainly by the region's high IRH, so IRH cannot be lowered by exchanging humid air within the dryer for drier air in the exterior. Another contributing factor is the low temperature found (28 °C). Another inconvenience for the solar dryer performance is that after 14h00, the RH starts to increase reaching values close to saturation (close to 100%) and causing IRH to rise after this hour (Figure 4), especially in Guácimo and Buenos Aires (Figure 4b and 4c). However, heat injection resolved this issue in the Cartago site, where IRH was below 40% (Figure 4d), and better drying efficiency was achieved. Such an improvement translated into shorter DT of less than 4 hours and 43 minutes, and less than 6.92% fiber MC (Table 2) due to the rise in temperature (Figure 4). Heat injection is a common practice that is carried out for low solar radiation conditions and during night hours.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Balance energético en dos sistemas de secado de residuos ligno celulósicos producidos en Costa Rica”

The present study found that IT was normally higher than ET (Figure 5), the average variation being of 7°C between both. Major differences occurred between 10:00 and 14:00 hours (Figure 5). Finally, by changing the drying system and injecting hot air to increase temperature in low temperature hours and high ERH, conditions within the chamber were undoubtedly improved. Therefore, it solves the climatic condition problems of Costa Rica of high relative humidity values, especially early in the morning, during the afternoon, and with irregular solar radiation due to the presence of clouds.

Average moisture content and drying times of Pineapple fiber

Average IMC found for pineapple fiber (Table 2) was similar to that reported by Pangavhane et al. (2002), who found values between 60 and 80%. The difference found at 9h30 in Buenos Aires was probably due to using drier pineapple leaves at the time, which resulted in low IMC.

DT and FMC are mostly influenced by the time of day when fiber is put to dry, independently from the geographic region where the dryer is located. Samples placed after 12h00 require more DT, and higher MC levels are reached, than those placed from 6h00 to 11h00 (Table 2). This problem accentuates further after 12h00 in Buenos Aires, Guácimo and Río Cuarto (Figure 6). Once again results confirm that, due to environmental conditions in Costa Rica, after 14h00 the ERH conditions (Figure 3) and ET (Figure 4) increases, causing an increase in DT and a high FMC.

Solar dryer efficiency is evidenced by DT reduction. According to DT results (Figure 5), the dryer designed presented the best results in Cartago, where DT was lower; followed by Buenos Aires, Guácimo and Río Cuarto (Table 2, Figure 5). The site at Río Cuarto stands out for having the highest IRH (Table 1, Figure 3), low indirect and direct solar radiation (Table 2), and low temperature (Figure 4a). These conditions increased DT (Figure 5c) and FMC for pineapple fiber (Table 2) compared to the other study sites. Notwithstanding, when RH was improved within the chamber for Guácimo and Cartago, DT fell (Figure 5), particularly in Cartago, when hot air was injected during low efficiency drying hours. This site showed that all the practical modifications implemented to improve drying efficiency had a satisfactory outcome.

When comparing DT and fiber MC with air drying, solar drying proved advantageous when samples were placed after 10h30 in Buenos Aires, 9h30 in Guácimo, and at any time in Cartago since it presented lower values at all times and had low FMC. For pineapple fiber it can be affirmed that solar drying is more efficient than air drying. However, in some sites a combination of the two may help to improve drying efficiency, since under certain circumstances air drying is better than solar drying; i.e. in the Buenos Aires site. Interestingly, during the dry season when the test was carried out in this site, air drying lowered DT and FMC by almost two hours compared to solar drying (Table 2). Nonetheless, to dry pineapple fiber completely, with air drying it does not reach the FMC and time achieved with the solar dryer (Figure 6a and 6b). Therefore, to achieve maximum dryer efficiency, fiber can be left out to dry in the during the first two hours after it has been extracted from the leaf, and then it may be introduced in the solar dryer, to finish drying at adequate FMC.

Another major outcome when comparing solar dryer with air drying was evidenced in Cartago. This site had the unfavorable temperature and RH outside chamber in all sites, and obtained the best solar drying efficiency, with significant differences between solar and air drying (Table 2). This suggests that when environmental conditions are of low temperature and high relative humidity, the solar dryer's potential is much greater.

Conclusions

In Costa Rican locations of low temperature and high environmental RH, such as Río Cuarto, the solar dryer's performance is lacking, because the DT is extended and MC cannot be taken to less than 20%. Another unfavorable condition in Costa Rica, is that after 14h00, the dryer's efficiency decreases, as high IRH and low IT are found within the dryer. But, for improving the chamber's conditions, it possible used hot air injection to improve temperature in hours where low temperatures and high relative humidity are present, improves the chamber's conditions. With this improving, it is possible to dry pineapple fiber to optimal FMC values in DT less than 4 hours, but the time may stretch to 8 hours when conditions are unfavorable.

Acknowledgements

The authors wish to thank The Vicerrectoría de Investigación y Extensión of the Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), and Cooperación de Desarrollo Agrícola del Monte S.A. (PINDECO), Ticoverde S.A., Fiffes for their support in supplying material tests.

References

- ALVARADO, L. Climatology of the free atmosphere over Costa Rica. **Revista Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos**, Costa Rica, vol. 8, p. 89-115, 2001.
- AZHARI, A.; SOPIAN, K.; ZAHARIM, A.; AL GHOUL, M. A new approach for predicting solar radiation in tropical environment using satellite images – case study of Malaysia. MY. **Environment and Development**, Netherlands , vol.4, p. 373-378, 2008.
- COSTALES, R. Application of renewable energy during drying. State of the art and its potential in agricultural production. **Instituto Cubano de Investigación de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)**, Cuba, vol.44, p. 47-53, 2010.
- EKECHUKWU, O.; NORTON, B. Review of solar energy systems: an overview of solar drying technology. **Energy Conversion and Management**, Netherlands, vol.40, p.615-655, 1999.
- JANJAI, S.; SRISITTIPOKAKUN, N.; BALA, B. Experimental and modeling performances of a roof integrated solar drying system for drying herbs and spices. **Energy**, Netherlands, vol.54, p.378-391, 2006.
- KARATHANOS, T.; BELESSITOTIS, G. Sun and artificial air drying kinetics of some agriculture products. **Journal of Food Engineering**, Netherlands, vol.31, p.35-46, 1997.
- LOTFALIAN, A.; GHAZAVI, M.; HOSEINZADEH, B. Reviewing drying of drill and spearmint by a solar dryer and comparing with traditional dryers. **World Applied Sciences Journal**, Dubai, vol.8, p. 364-368, 2010.

- OKALA, N.; CHIGASA, U.; CYNTHIA, I.; CHIDIMMA, O.; CHIBUEZE, N.; ONUORAGBUNAM, O.; OGBONNA, O. Analysis and survey of the application of solar dryers in eastern Nigeria. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, China, vol.4, p.79-82, 2011.
- PANGAVHANE, D.; SAWHNEY, R.; SARSAVADIA, P. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. **Energy**, Netherlands, Vol. 27, p.579-590, 2002.
- SALAS, C; MOYA, R; CÓRDOBA, R. Design and construction of a solar drier for lumber. **Kurú: Revista Forestal**, Costa Rica, vol.13, p.1-13, 2008.
- SAMUELSSONA, R.; BURVALLA, J.; RAIDA, J. Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass. **Biomass and Bioenergy**, Netherlands, vol.30, p. 929–934, 2006.
- ULLOA, J.; WEERD, J.; HUISMAN, E.; VERRETH, J. Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: the Costa Rica situation. **Waste management**, Netherlands, vol.24, p.87-97, 2004.
- WRIGHT, J. 2002. Maps of solar radiation in Costa Rica. **Revista Tópicos de Meteorología y Oceanográficos**, Costa Rica, vol.9, p.79-87, 2002.
- ZHIMIN, L.; ZHONG, H.; TANG, R.; LIU, T.; GAO, W.; ZHANG, Y. Experimental investigation on solar drying of salted greengages. **Renewable Energy**, Netherlands, vol.31, p.837-847, 2006.