

APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTARIZADA PARA LA DETECCIÓN DE BOLSAS DE HUMEDAD EN MADERA SECA DE *Gmelina arborea* (Roxb.).

Róger Moya, R^{1*}, Freddy Muñoz A.¹, Iván Escalante²

1. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Apdo. 159-7050, Cartago 7050, Costa Rica,
2. Clínica Santa Fe, San José, Costa Rica.

Recibido: 8 de agosto, 2006; aceptado: 12 de diciembre, 2006

Abstract

Due to its excellent growth rate and productivity, *Gmelina arborea* (Roxb.) is widely used for commercial reforestation in Costa Rica. However during the lumber drying process, the wooden boards show non-uniform values of final moisture content (MC). The low uniformity in final MC is caused by the presence of “wet pockets”, originated during the growing process of the tree. During the wood drying process, the regions with wet pockets present zones with a high MC, which are hard to detect with traditional methods for MC measurements. This article shows that it is possible to detect and to set the limits of the presence of wet wood in *Gmelina arborea* boards using scanning computed tomography (CT-scanning), a technique applied in medical diagnostic.

A board with wet pockets is shown in the CT-scanning images in clear color and with low values of the Hounsfield Unit (HU) or “CT number”. When these values were transformed to wood density, it was determined that wet pockets present a density of around 190 kg/m³, a value higher than normal wood. Also, it was possible to observe growth rings trees in the CT-scanning images, an important feature for dendrocronological research. The obtained results allowed showing that it is possible to apply this technique in the process of lumber production, to detect the zones with high MC in kiln dried *Gmelina arborea* wood.

Key words: wood, wood drying, non-destructive test, x ray, infection, moisture content.

I. Introducción

En la actualidad gran cantidad de la madera que es comercializada en Costa Rica proviene de plantaciones forestales [1], producto de un programa de reforestación nacional iniciado en los años 1980, con el fin de abastecer la demanda de madera [19].

*rmoya@itcr.ac.cr

Varias especies forestales fueron utilizadas en este programa, entre las que destacan, *Gmelina arborea* (melina), *Tectona grandis* (teca) y *Cupressus lusitanica* (ciprés), entre otras [19].

La melina, por su parte, es una especie con hábitat natural en Asia, sin embargo, fue utilizada ampliamente en los programas de reforestación nacional, por su excelente crecimiento y rendimiento. No obstante, a pesar de su gran éxito, por muchos años se ha señalado el proceso de secado como el principal problema de esta especie, para su continuidad en los programas de reforestación comercial de los países tropicales [15]. Una investigación reciente, realizada en el marco del proyecto "Secado de madera de melina (*Gmelina arborea*) procedente de dos zonas de Costa Rica", desarrollada por el Instituto Tecnológico de Costa Rica, ha señalado la presencia de las bolsas de humedad en madera luego del proceso de secado.

Estas bolsas son la principal causa de la falta de uniformidad en el contenido de humedad final en madera que ha sido secada y son producidas por la madera "wetwood"¹. Este tipo de madera es un tejido leñoso del árbol, producido por bacterias de tipo anaeróbico, donde la región afectada se caracteriza por poseer un alto grado de humedad, alto pH, presencia de olores desagradables (similares a los que se presentan en un proceso de fermentación), coloración diferente, disminución de la concentración de gases de nitrógeno y oxígeno y baja resistencia eléctrica [14, 20].

Durante el proceso de secado, en este tipo de madera disminuye notablemente la velocidad de eliminación de humedad, debido a su baja permeabilidad [20], por lo que la madera que presenta este problema al finalizar un proceso de secado, resulta con un mayor contenido de humedad final en comparación con la madera considerada como normal [13], dando como resultado las popularmente conocidas bolsas de humedad en madera (Figura 1).

El control o verificación del contenido de humedad final, luego del proceso de secado en la madera de melina en Costa Rica, es realizado comúnmente con medidores eléctricos portátiles (método electrónico). El procedimiento de medición consiste en introducir a cierta profundidad los *pinos* del medidor y posteriormente se realiza la lectura del contenido de humedad (CH). Este método se caracteriza porque la medición es puntual, dejando sin considerar otras regiones que pueden tener madera con bolsas de humedad; por ello es poco efectivo y confiable, además de que involucra mayor cantidad de tiempo.

En el ámbito internacional, varios métodos han sido implementados en la detección de la madera de "wetwood" y las bolsas de humedad para diferentes especies, entre ellas se destaca: propagación de ondas, materiales dieléctricos, análisis químico, sensores de oxígeno, análisis de emisión acústicos-ultrasónicos, espectrómetros de masa y detección mediante rayos-x y ultrasonido [14, 18]. Dentro de las principales técnicas de detección de las propiedades de la madera se encuentra la tomografía axial computarizada (TAC), la cual es utilizada por su alto poder y

1 Término utilizado en la lengua inglesa que traducido a español no dimensiona verdaderamente este problema, por lo que se mantiene el término.

versatilidad para la caracterización de los materiales [4]. Esta técnica tiene la ventaja de ser un método no destructivo y altamente eficiente, debido a que se obtienen imágenes con alta resolución.

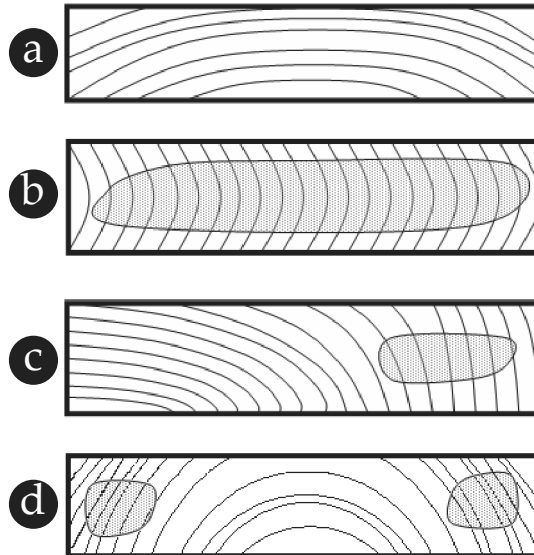


Figura 1. Patrones de distribución de las bolsas de humedad producidas por la presencia de "wetwood" en madera seca de melina: (a) madera totalmente tangencial con ausencia de bolsas de humedad; (b) madera totalmente radial; (c) madera con dos tipos de cortes: radial y tangencial y (d) madera combinada con 2 tipos de corte: radial-tangencial-radial.

Nota: Las bolsas de humedad son representadas por el tramado en los diferentes cortes.

Esta técnica se empezó a emplear en investigaciones y aplicaciones tecnológicas, principalmente en diagnósticos médicos [11]; en la década de 1990 fue utilizada para análisis de las propiedades de otros materiales, como la madera [16]. Principalmente se ha usado en aspectos que van desde la detección de defectos o enfermedades en las trozas, hasta para determinar el flujo de savia dentro del árbol [17]. Sin embargo, a pesar de su amplia utilización en productos provenientes de la industria de la madera, esta técnica ha sido poco usada en la detección de madera "wetwood", y su uso se ha limitado al estudio de árboles de regiones templadas [8], careciendo completamente de información para especies de regiones tropicales.

Contenido de humedad y densidad de la madera

En el momento de la corta de un árbol, los tejidos xilemáticos poseen una gran cantidad de agua, la cual le permite al árbol en pie ejecutar los diferentes procesos fisiológicos para su crecimiento; una vez talado el árbol y aserrado empieza el proceso de eliminación de agua, por lo que al transcurrir determinado tiempo es posible

encontrar diferentes grados de humedad en una misma pieza de madera, proceso en el que hasta que la madera llega a un contenido de humedad en equilibrio, donde no intercambia ni absorbe humedad con el ambiente [9]. La cantidad de humedad dentro de la madera, se refiere a la proporción de agua asociada o contenida en la estructura anatómica de este material, en relación con la cantidad de material leñoso en condición anhidra (sin presencia de humedad), esta relación se expresa como un porcentaje (Ecuación 1) y comúnmente se conoce como contenido de humedad de la madera (CH). La densidad de la madera, por su parte, se refiere a la relación que existe entre el peso de una muestra de este material a un CH y el volumen de la madera a ese CH. El peso, en este caso específico, incluye la masa del material neto de la madera, más la masa del agua incluida en esa estructura, dividido entre el volumen que presenta esa misma pieza (Ecuación 2).

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{(\text{peso agua + madera}) - \text{peso de la madera anhidra}}{\text{peso de la madera anhidra}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Densidad de madera} = \frac{(\text{Peso neto del material} + \text{peso del agua incluido en la madera})}{\text{volumen}} \quad (2)$$

Técnica de Tomografía Axial Computarizada (TAC) aplicado en madera

Esta técnica consiste en un análisis no destructivo por medio del TAC, en donde se coloca una pieza de madera en la posición longitudinal en la camilla del equipo. La posición de la tabla es muy importante a la hora de realizar el estudio, ya que de esta manera se logra notar las diferencias en la estructura de la madera, resultando una imagen más detallada.

El TAC, como se mencionó es una técnica no destructiva, que consta de un tubo de rayos-x y una faja de detectores colocados perpendicularmente (Figura 2a). Durante el análisis, estos detectores giran sobre rieles alrededor de la cama y esta a su vez avanza milimétricamente en un tiempo determinado. La aplicación de estos avances, permite realizar barridos sobre el objeto de estudio (madera), sin perder espacios dentro de los tramos (Figura 2b). Además, el equipo posee un panel de control, en donde se programa la intensidad de radiación, tiempo de exposición y la velocidad de rotación del tubo.

Durante el análisis, la fuente de rayos-x irradia la muestra, en este caso madera; los detectores, al otro lado, miden tanto la intensidad de rayos-x emitida por la fuente, como la intensidad que pasa a través del material. El avance axial de la muestra produce seccionamientos de la muestra cada cierta distancia, que son definidos como "cortes" (Figura 2b). Los valores de radiación transmitida y de incidencia son procesados en un computador, que calcula el coeficiente promedio de atenuación lineal (4) para cada elemento de volumen (voxel) de absorción, que es definido como el producto del área de sección transversal y el ancho del "corte" (Figura 2b).

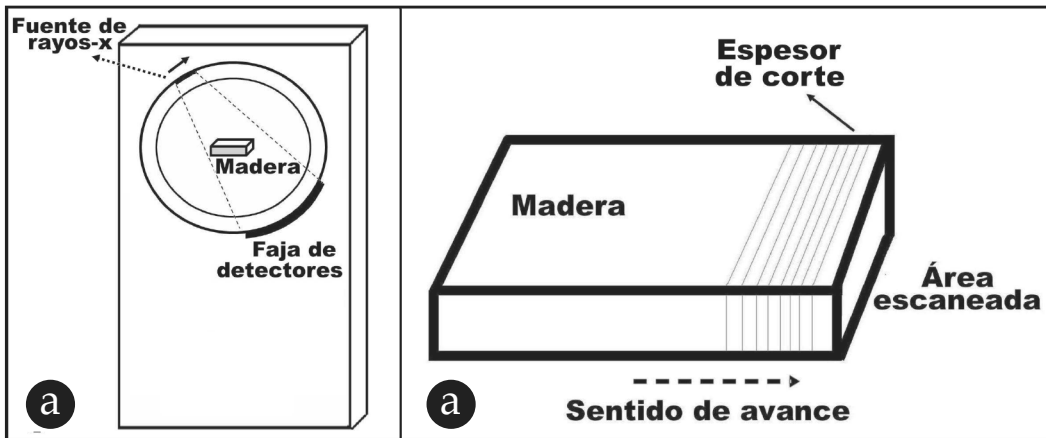


Figura 2. Elementos básicos del TAC (a) y condiciones de la zona escaneada por el TAC (b).

La relación entre la intensidad de incidencia de los rayos-x, la intensidad transmitida, la densidad del material y el espesor de la muestra esta dada por la siguiente ecuación matemática:

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (3)$$

donde:

I = intensidad de rayos-x transmitida

I_0 =intensidad de rayos-x de incidencia

μ = Coeficiente de atenuación lineal

t = Espesor del material

El cálculo del coeficiente de atenuación lineal en cada elemento de volumen es normalizado dentro del computador y luego con la ayuda del coeficiente de atenuación del agua (μ_w) se calcula el "número de CT" ó número de Hounsfield (Ecuación 4):

$$\text{Número de CT} = 1000 * \frac{[\mu_x - \mu_{\text{agua}}]}{\mu_{\text{agua}}} \quad (4)$$

donde:

μ_x = coeficiente de atenuación lineal para determinado elemento de volumen.

μ_{agua} = coeficiente de atenuación del agua que corresponde a -1000.

El "número de CT" para el agua y el aire son 0 y -1000, respectivamente; aquellos materiales que durante el análisis con el TAC muestran un valor cercano a -1000 poseen una densidad parecida al agua (1 g/cm³), y por el contrario, objetos con

número de CT próximos a cero tienen una densidad parecida a la densidad del aire [10]. Finalmente se reconstruye una imagen digital con la ayuda de los coeficientes de atenuación o densidad, donde estos valores son presentados en la escala lineal de grises (256 tonos). Esta imagen digital es una representación en dos dimensiones del elemento analizado y la imagen tiene como referencia los píxeles. Generalmente las imágenes son reconstruidas en una matriz de tamaño 512 x 512 píxeles [16].

Objetivo

El objetivo de este trabajo es investigar la posibilidad de usar la tomografía axial computarizada (TAC), en la detección, de una forma no destructiva, de la presencia y distribución de las bolsas de humedad producidas por la madera “wetwood” en melina (*Gmelina arborea*), luego del proceso de secado en horno industrial.

II. Materiales y métodos

Material ensayado

Fue utilizado material proveniente del proyecto de investigación “Secado de madera de melina (*Gmelina arborea*) procedente de dos zonas de Costa Rica”, el cual se está desarrollando en el Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). La madera provenía de árboles de melina, de plantaciones de rápido crecimiento de 10-12 años de edad (Cuadro 1), ubicados en la Zona Sur (Latitud norte 10° 47' 19,32" - Longitud oeste 83° 57' 07,20", con precipitación media de 4878 mm/año y temperatura media de 27,5°C) y el Pacífico Norte de Costa Rica (Latitud norte 11° 53' 10,22" - Longitud oeste 86° 35' 34,07", con temperatura media anual de 28,7°C y una precipitación media de 2281,3 mm/año).

CUADRO 1.
CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTACIONES UTILIZADAS EN EL ESTUDIO DE SECADO.

Plantación	Edad (años)	Densidad plantación (árboles/ha)	Área basal/ha (m ² /ha)	Volumen (m ³ /ha)	Altura total promedio (m)	Diámetro promedio altura pecho (cm)
Barca S.A. ¹	12	368	23,1	228,5	25,1	28,0
Racsa ²	10	368	27,9	280,2	25,0	30,7

¹ Finca Salamá, Piedras Blancas. Osa-Puntarenas. ² Las Juntas de Abangares, Guanacaste.

Durante los ensayos de secado al horno de la madera de melina, se encontró para las dos procedencias que una gran cantidad de piezas presentaban regiones con bolsas de humedad, debido a la presencia de la madera de "wetwood". Las bolsas de humedad fueron identificadas en las tablas secas usando la siguiente metodología: (i) se midió el contenido de humedad de la tablas con un medidor eléctrico; (ii) en aquellas regiones donde se presentó una humedad superior a 50% se cortó una tabla de aproximadamente 60 cm de longitud, (iii) en cada extremo, de esta muestra, se tomó una pequeña sección transversal de 1,5 a 2,0 mm de espesor con la ayuda de una sierra radial de 300 cm de diámetro, dientes calzados con carburo de tungsteno, paso de 18 mm, espesor de diente 3 mm y altura de diente 10 mm; (iv) en las pequeñas láminas transversales se aplicó el método propuesto por Coutts y Rishbeth [5], en donde las muestras son observadas a trasluz. Al observar esto se tiene que aquellas áreas con presencia de "wetwood" o bolsas de humedad, se observan traslúcidas y las áreas sin presencia de bolsas de humedad aparecen opacas con el color natural de madera en condición seca.

De cada una de las procedencias se tomó una tabla para realizar los ensayos de tomografía axial computarizada. En la tabla procedente de Las Juntas de Abangares, la bolsa de humedad estaba presente en casi toda la sección transversal (Figura 4a), entre tanto, en la madera de Salamá la bolsa de humedad estaba presente sólo en un lado de la tabla (Figura 4b).

Equipo y procedimiento de TAC

En cada uno de los extremos de las piezas de madera se escanearon 10 secciones transversales, utilizando un tomógrafo axial computarizado de rayos-x, marca Siemens Somatom AR. START (Figura 3), propiedad de la Clínica Santa Fe, ubicada en La Sabana, San José, Costa Rica. Las condiciones utilizadas fueron: tensión de aceleración del tubo o voltaje de 130 kV, corriente de calentamiento del catodo de 63 mA, el programa de columna fue utilizado como "protocolo", línea de escaneo de 3 segundos, espesor de escaneado de 10 mm y reconstrucción de imágenes = 3 mm.

Detección de la madera "wetwood" y variación de la densidad de la madera.

Las imágenes de las secciones transversales de cada "corte" fueron convertidas a una matriz de 512 x 512 píxeles y sobre el monitor se identificó en la madera, las bolsas de humedad producidas por la madera "wetwood". Este tipo de madera se presenta con un color traslúcido o blanco, y la madera sin este problema es presentada de una forma más oscura u opaca. En la determinación de la variación de la densidad de la madera "wetwood", se utilizó el procedimiento comúnmente empleado en estos equipos médicos, en donde se marca un área y el equipo determina el número CT de esa área. El área de medición en todos los casos fue 0,04 mm² y el valor de densidad

de la madera fue calculado aplicando la fórmula propuesta por Lindgren [16] para la madera con un contenido de humedad variable (Ecuación 5).

$$\text{Densidad de madera (kg / m}^3\text{)} = 1015 + 0,993 \times \text{número de CT} \quad (5)$$

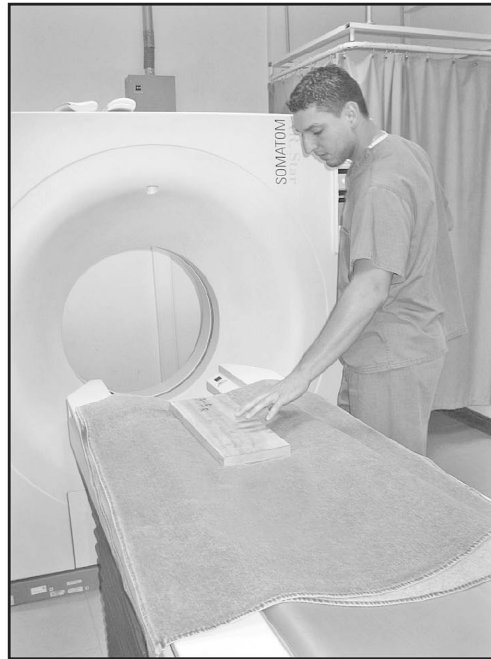


Figura 3. TAC utilizado en el estudio (Clínica Santa Fe, San José, Costa Rica).

III. Resultados y discusión

En la Figura 4 se muestran dos ejemplos de la imagen de tomografía axial. En ella es posible observar diferentes tonalidades de grises. Las zonas oscuras presentan bajos valores de “número de CT” o unidad de Hounsfield, y por el contrario, en las zonas más claras los valores del “número de CT” son más altos. También es posible observar semicírculos en la parte central de la tabla y secciones de círculo en ambos lados de la tabla de la Figura 4a. En tanto que en la Figura 4b nuevamente se observan secciones de círculo. En ambos casos en el límite del semi-círculo o la sección del círculo se presenta una tonalidad ligeramente más brillante (ver flechas en la figuras), indicando un alto valor de “número CT”, estos semicírculos o secciones del círculos representan los anillos de crecimiento de los árboles. Un aspecto importante de destacar de dichas figuras, es que en la sección transversal de la madera proveniente de las Juntas de Abangares (Guanacaste) los anillos son más nítidos (Figura 4a), en comparación con los que se presentan en las secciones de la madera proveniente de

Salamá (Zona Sur de Costa Rica). Para esta última procedencia, a pesar de que se observan las regiones claras que evidencian los anillos de crecimiento, estos no fueron tan nítidos (Figura 4b).

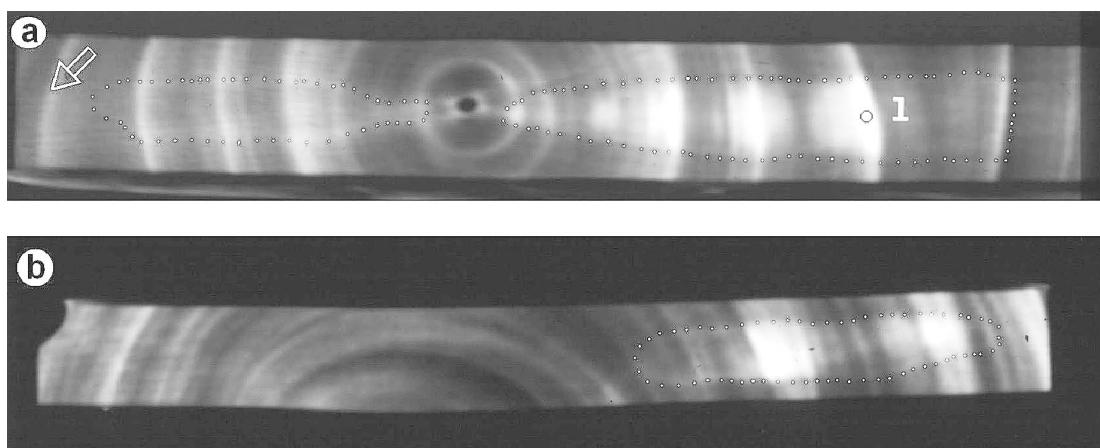


Figura 4. TAC de dos secciones transversales de melina seca procedente de dos regiones de Costa Rica: (a) Pacífico norte y (b) Pacífico sur. Los semicírculos y partes de circulares marcados por zonas claras y opacas muestran los anillos de crecimiento, ayudado por la flecha que indica el límite del anillo. La línea punteada indica la presencia de bolsas de humedad producto de la madera de "wetwood".

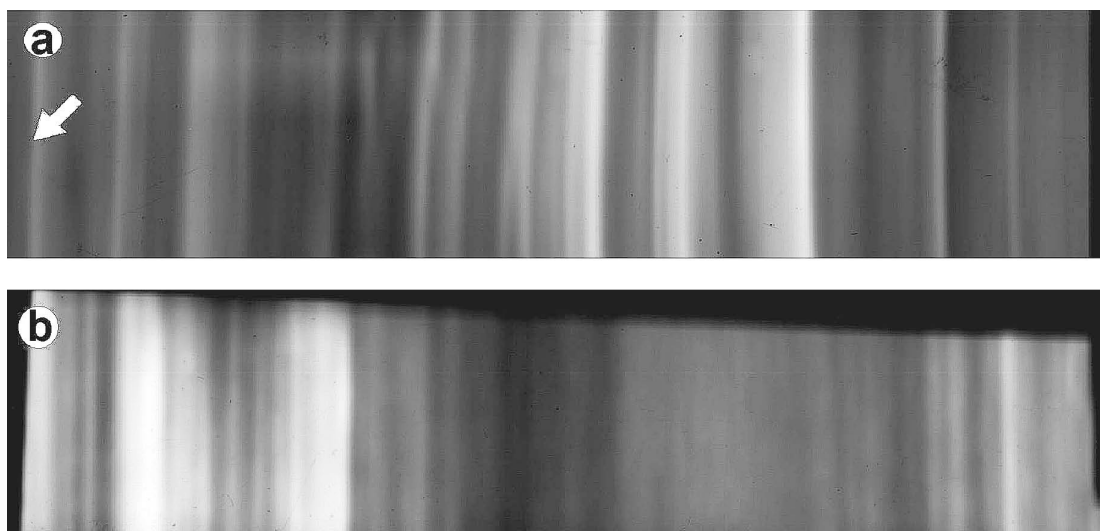


Figura 5. Reconstrucción longitudinal del TAC de melina seca procedente de dos regiones de Costa Rica: (a) Pacífico norte y (b) Pacífico sur. La secuencia de claro-oscuro muestra los anillos de crecimiento de los árboles, ayudado por la fecha que indica el límite del anillo en la muestra del Pacífico norte.

La reconstrucción longitudinal de los cortes (Figura 5) permite observar varias tonalidades, indicando diferentes valores en la unidad de Hounsfield o "número de CT". En esta diferencia de tonalidades es posible observar los anillos de crecimiento que componen la tabla (Figura 5a resaltada con la flecha). Al igual que sucedió con los cortes transversales, en la reconstrucción longitudinal, la madera con anillos nítidamente marcados son fácilmente observables en la imagen digital de la tomografía axial (Figura 5a). Y por el contrario, la madera con los anillos poco marcados, son difíciles de observar en esta reconstrucción (Figura 5b).

Los anillos de crecimiento se forman por alteraciones en la distribución, dimensiones y abundancia de los elementos celulares que componen la madera durante el crecimiento del árbol [7]. Dichas alteraciones son producto de las variaciones estacionales que se presentan durante el año, principalmente la precipitación en los climas tropicales [21]. En algunos árboles, los anillos de crecimiento se presentan anualmente cuando la distribución de lluvias es cíclica, es decir las estaciones seca y lluviosa están bien definidas. No obstante, cuando la distribución de las lluvias es uniforme durante el año (poca marcación entre la estación seca y lluviosa), no se producen anillos nítidamente marcados en los árboles [3]. Los árboles creciendo en Guanacaste (Costa Rica) presentan anillos de crecimiento fácilmente distinguibles, producto de que en esa región la distribución de lluvias es bien definida durante el año; a diferencia de los árboles de Salamá (zona sur de Costa Rica), donde los anillos en la madera no son fácilmente visibles en la tomografía axial, debido a que en esa región existe alta precipitación y un verano poco definido.

Al asociar el "numero de CT" con los posibles valores de densidad en la marcación de los anillos de crecimiento, se tiene que las zonas claras al finalizar los anillos, presentan los valores de densidad más altos y por el contrario, luego de pasado el límite del anillo, las zonas más opacas ú oscuras presentan valores de densidad más bajos. Este comportamiento es el esperado en *Gmelina arborea*, ya que dentro de un mismo anillo al iniciar el periodo de crecimiento se presentan los valores de densidad más bajos, debido a que los poros son más grandes, las fibras tienen paredes celulares más delgadas y presentan un mayor diámetro de las fibras. En tanto que al finalizar el anillo, la densidad es mayor debido a la presencia de una menor cantidad de poros, fibras con paredes celulares más gruesas y menor diámetro de lumen, en relación al tejido leñoso que se presenta al iniciar los anillos de crecimiento [2].

Respecto a la presencia de las bolsas de humedad, la tomografía axial computarizada refleja nítidamente las regiones afectadas, siendo éstas las zonas con menores tonalidades grises o más claras, a diferencia de la madera sin este problema, que se presenta con colores que van de grises altos a colores más oscuros (Figura 6). No obstante, esta diferencia en el color es menos visible cuando se considera en sentido perpendicular a la dirección médula-corteza. La formación de los anillos de crecimiento produce alteraciones en el color de la imagen, dando como resultado la poca marcación de las bolsas de humedad en sentido médula - corteza.

Las mediciones de los valores de la unidad de Hounsfield o "número de CT" llevado a cabo en paralelo a la dirección médula-corteza, (Figura 6a) y en el sentido

perpendicular a esta dirección (Figura 6b), mostraron que las regiones afectadas con la presencia de bolsas de humedad presentan un “número de CT” de -423 en promedio, valor menor que -612, el cual fue medido en las zonas de madera normal (Cuadro 3). Al convertir estas cifras en valores de densidad de la madera, se tiene que las regiones con bolsas de humedad presentan una densidad promedio de 595 kg/m^3 , entre tanto que las regiones sin este tipo de madera presentan una densidad promedio de 407 kg/m^3 , valores que son estadísticamente inferiores a la densidad de la madera con bolsas de humedad señaladas anteriormente (Cuadro 3).

Nuevamente la medición del “número de CT”, muestra que las zonas con una tonalidad muy blanca, indicadora de la presencia de bolsas de humedad, producidas por la madera tipo “wetwood”, presentan los valores de densidad más altos. Por ejemplo, en la muestra presentada en la Figura 6a, las mediciones realizadas en dirección paralela al sentido médula-corteza, indicaron que las regiones de color más claro (puntos 1 y 3 de la Figura 6a) presentan los valores de densidad más altos de esa sección. Dicho comportamiento también fue comprobado nuevamente cuando las mediciones son realizadas en sentido perpendicular (Figura 6b), las mediciones de 1 y 3 sobre la región más clara, dieron como resultado los valores de densidad más altos.

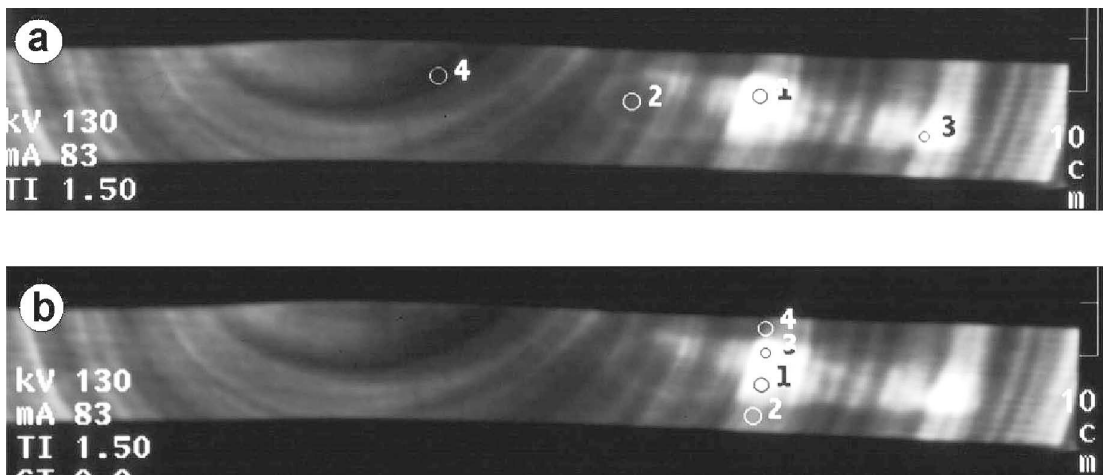


Figura 6. Sitios de medición del “número de CT” en madera con presencia de bolsas de humedad y regiones próximas a ella. (a) Medición paralela a la dirección médula-corteza y (b) mediciones realizadas en dirección perpendicular a la dirección antes mencionada.

De acuerdo a los resultados obtenidos con la tomografía axial computarizada (TAC), la madera considerada como normal presentó una densidad promedio de 407 kg/m^3 , con una humedad que osciló entre 10-12%. Este valor se encuentra dentro de los rangos reportados para esta especie, que son de $350\text{-}500 \text{ kg/m}^3$ [2, 6, 12]. Las zonas con bolsas de humedad, como se mostró, presentan alrededor de 180 kg/m^3 de más, en comparación con la madera normal, y si considera que la masa neta de este madera es igual que la madera normal, el aumento en la densidad se debe a un incremento

en la cantidad de agua presente en esa región. Los resultados de densidad máxima y mínima también fueron mayores en la región con bolsas de humedad, en comparación con aquellas regiones que no presentaron este problema (Cuadro 1).

CUADRO 3.

LECTURA DE "NUMERO DE CT" Y DENSIDAD DE LA MADERA ESTIMADA DE LAS BOLSAS DE HUMEDAD Y MADERA NORMAL EN MADERA DE MELINA SECADA EN HORNO.

Sentido de medición	Lectura	Tipo de madera	Numero de CT				Densidad de la madera (kg/m ³)		
			\bar{X}	σ	max	min	\bar{X}	max	min
horizontal	1	Bolsa dehumedad	-369	9,0	-388	-356	649	630	661
	2	Bolsa de humedad	-623	5,0	-635	-615	396	384	404
	3	Bolsa de humedad	-378	25,9	-422	-340	640	596	677
	4	normal	-707	2,6	-712	-699	313	308	321
vertical	1	Bolsa de humedad	-403	16,2	-434	-377	615	584	641
	2	normal	-542	2,7	-548	-535	477	471	484
	3	Bolsa de humedad	-342	6,7	-352	-333	675	665	684
	4	normal	-588	29,8	-630	-525	431	389	494
Promedios		normal	-423A	-	-446A	-404B	407A	389A	433A
		Bolsa de humedad	-612B	-	-630B	-586B	595B	572B	613B

* Fue aplicada la ecuación 3 propuesta por Lindgren (1991). Letras diferentes en la madera normal y en las bolsas de humedad establecen que son valores estadísticamente diferentes con $\alpha=0,05$ con una prueba "t de medias".

Las imágenes de tomografía axial computarizada presentan diferentes tonalidades de grises, que van desde totalmente claros hasta colores casi negros u oscuros. La variación de esta tonalidad depende de la estructura interna del árbol, específicamente de la formación de los anillos de crecimiento, los cuales son alterados por la presencia de regiones con algún grado de concentración de humedad, como ocurre con la presencia de madera "wetwood".

La formación de regiones con tonos claros, y la obtención de valores en el "numero de CT" bajos en madera de *Gmelina arborea* seca, son característicos de la formación de bolsas de humedad. Estos resultados sugieren la posibilidad de utilizar los equipos de tomografía axial como complemento del control de calidad y la detección de bolsas de humedad en madera seca, los cuales son muy importantes en el proceso de industrialización de la madera.

V. Bibliografía

1. Arce, H.; Barrantes, G., *La madera en Costa Rica: situación actual y perspectivas*, Fondo de Financiamiento Forestal y Oficina Nacional Forestal, 2004, 25p. (Documento de divulgación).
2. Akachuku, A.E., *Wood Sci. Tech.* **1984**, 30 (2), 275-283.
3. Alvim, P.T. In: Zimmermann, H (Eds.), *The formation of wood forest trees*, Academic Press, New York, 1964.
4. Bucur, V., *Meas. Sci. Technol.* **2003**, 14, R91-R98.
5. Coutts, M.P., Rishbeth, J., *Eur. J. For. Path.* **1977**, 7, 13-22.
6. Espinosa, J.A., *New Forests*, **2004**, 28 (2/3), 309-317.
7. Fichtles, E.; Clark, O.A.; Worbes, M., *Biotropica* **2003**, 35 (3), 306-317.
8. Fenyvesi, A.; Béres, C.; Raschi, A.; Tognetti, R.; Ridder, H.W.; Molnár, T.; Röfler, J.; Lakatos, T.; Csiha, I., *Chemosphere* **1998**, 36, 931-936.
9. Haygreen, J.; Bowyer, J., *Forest products and wood science*, 3^{era} ed. Iowa, US. Iowa State University Press, 1996., 484 p.
10. Herman, G.T., *Image reconstruction from projections -the fundamentals of computerized tomography*, Academic Press: Nueva York, 1980, 450 p.
11. Hounsfield, G.N., *Br. J. Radiol.* **1973**, 46, 1016-1023.
12. Hughes, J.F.; Albuquerque Sardinha, R.M., *J. Microscopy* **1975**, 104, 91-103.
13. Jeremic, D.; Cooper, P.; Srinivasan, U., *Can. J. For. Res.* **2004**, 34 (6), 1241-1250.
14. Kabir, M.; Leininger, T.D.; Araman, P.; Winn, M.F., *Forest Prod. J.* **2006**, 56 (3), 70-74.
15. Lauridsen, E.; Kjaer, E., *Int. For. Rev.* **2002**, 4 (1), 20-29.
16. Lindgren, L.O., *Wood Sci. Technol.* **1991**, 25, 341-349.
17. Macedo, A.; Vaz, C.M.P.; Pereira, C.D.; Naime, J.M.; Cruvinel, P.E.; Crestana, S., *Holzforschung* **2002**, 56, 535-540.

18. Pettersen, R.J.; Ward, J.C.; Lawrence, A.H.; *Holzforschung* **1993**, 47 (5), 513-552.
19. SINAC. *El sector forestal de Costa Rica*, San José: Ministerio de Energía y Minas de Costa Rica, 2000, 23p. (Informe Nacional de Áreas de Conservación)
20. Ward, J.C.; Pong, W.Y., *Wetwood in trees: a timber resource problem*. General technical Report PNW-112. United States Department of Agriculture. Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experimental, 1980, 80p.
21. Worbes, M. J., *Ecology* **1999**, 87, 391-403.