

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES Y AMBIENTALES DE POSTGRADO
TECNOLOGÍA DE PRODUCTOS FORESTALES

TRABAJO DE GRADO



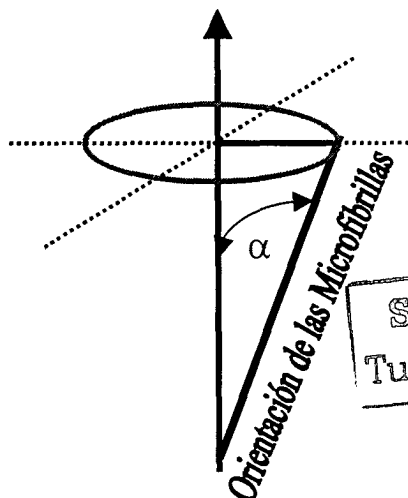
MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE ORIENTACIÓN DE LAS MICROFIBRILLAS

EN LA CAPA S₂ DE LA PARED CELULAR, CON EL USO DEL
MICROSCOPIO ELECTRÓNICO Y DEL ÓPTICO, EN LA ESPECIE

Pinus caribaea Mor. var. *hondurensis* Barr.



Eje de la Traqueida



SERBIULA
Tulio Febres Cordero

Ingeniero Forestal: JOSÉ LUIS MELANDRI

Profesor Tutor: NARCISANA ESPINOZA DE PERNÍA

MÉRIDA, MAYO DEL 2000.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

DEDICATORIA

A la Memoria de Mi Querido Padre.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sincero agradecimiento:

A la Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales y al Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP), por permitir mi formación profesional con recientes conocimientos, impartidos por excelentes profesores.

A los profesores: Narcisana Espinoza de Pernía por su valiosa tutoría y orientación en mis estudios de Maestría y en esta investigación, a Williams León por su asesoramiento y colaboración y al profesor Adolfo Rivera por su especial evaluación. Sus importantes ideas, explicaciones y sugerencias contribuyeron a desarrollar y perfeccionar este trabajo. Muchas gracias.

También a los Laboratorios y en especial a su personal de: Anatomía de Maderas de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, y de Análisis Químico y Estructural de Materiales (LAQUEM) de la Facultad de Ciencias, en donde se realizó esta investigación.

A los profesores Mariano Duran, Edgar Hernandez y a la Licenciada Nercy Cumare por su incondicional asesoramiento y amistad brindada.

Al Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico (CDCHT), por el importante financiamiento de este trabajo de investigación.

RESUMEN

Para el óptimo procesamiento y adecuada utilización de la madera de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr., proveniente de las plantaciones de Uverito en el Estado Monagas, al oriente del país, se necesita conocer a fondo la ultraestructura de la pared celular de las traqueidas de la madera. Se comparan tres técnicas de medición del ángulo microfibrilar en diferentes zonas de dos árboles, cerca de la médula y cerca de la corteza, y entre madera temprana y madera tardía. Una técnica directa, empleando el microscopio electrónico (MES), y dos técnicas indirectas de estimación, empleando el microscopio óptico: medición de la orientación de grietas inducidas en la pared celular (MOG) y medición de la orientación de las aberturas de las punteaduras en el área de cruce (MOP). Existe para la especie una relación directa entre la orientación de las aberturas de las punteaduras y la orientación de las grietas inducidas en la pared celular, con respecto a la orientación de las microfibrillas de la capa S_2 . Las mediciones indirectas del ángulo de orientación por el método de inducción de grietas en la pared celular es el de mayor precisión. Mientras que la técnica de medición de la orientación de las aberturas de las punteaduras mostró mayor variación. Sin embargo, el comportamiento de ambas técnicas de medición microfibrilar indirecta (MOG y MOP), mostró un patrón similar a la medición directa (MES), detectando las variaciones del ángulo microfibrilar en las diferentes zonas evaluadas. Lo que indica que es posible, mediante el empleo de estas técnicas indirectas, alcanzar una clara diferenciación entre la madera juvenil y la madera cerca de la corteza y entre el leño temprano y el tardío.

Palabras Claves: ángulo de orientación de las microfibrillas, capa S_2 , pared celular, técnicas de medición, abertura de la punteaduras en el área de cruce, inducción de grietas, leño temprano y leño tardío, madera cerca de la médula y cerca de la corteza, *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr.

SUMMARY

In order to get the optimum of wood processing and utilization of *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr. from Uverito plantation at Monagas State (Eastern part of Venezuela), it is necessary to know the ultrastructure of the wood tracheid cell wall. Three techniques for measuring microfibril angle are applied in samples taken in different zones of two trees in corewood and outerwood, and between earlywood and latewood. One direct technique using scanning electron microscopy (SEM) and two indirect techniques using the optical microscopy: inducing crack in the cell wall orientation measuring (COM) and using the cross-field pit apertures orientation measuring (POM). An direct relation among the inducing cracks in the cell wall and the pit apertures orientation with regard to microfibrillar orientation angle in the S_2 layer was found. The indirect measuring to determine the orientation angle through the induction method for the crack in the cell wall resulted to be the most accurate. The measuring technique of the pits apertures orientation showed greater variation. However, the behavior of both indirect measuring techniques (COM and POM) exhibited similar pattern to the direct measuring (SEM), detected the microfibril angle variation in zones different evaluated. This means that is possible to reach a clear differentiation between the corewood and the outerwood, and between earlywood and latewood with the use of these indirect techniques.

Keys words: microfibrillar orientation angle, S_2 layer, cell wall, measuring technique, cross-field pit apertures, inducing crack, earlywood and latewood, corewood zone, outerwood zone, *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

CONTENIDO

	Pag.
<u>DEDICATORIA</u>	ii
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	iii
<u>RESUMEN</u>	iv
<u>SUMMARY</u>	v
<u>CONTENIDO</u>	vi
<u>INDICE DE FIGURAS</u>	viii
<u>INDICE DE TABLAS</u>	xi
<u>I.- INTRODUCCIÓN</u>	1
<u>II.- OBJETIVOS</u>	3
1- Objetivo General _____	3
2- Objetivos Específicos _____	3
<u>III.- MARCO TEÓRICO</u>	4
<u>IV.- FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS</u>	11
<u>V.- MATERIALES Y MÉTODOS</u>	11
1.- Preparación de las Muestras y Medición del Angulo de Orientación de las Microfibrillas. _____	13
1.1.- Microscopio Electrónico de Barrido (MES). _____	13
1.2.- Microscopio de Luz (Medición Indirecta). _____	15
A.- Medición del Ángulo de Orientación de las Aberturas de las Punteaduras en el Área de Cruce (MOP). _____	15

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

B.- Medición del Ángulo de Orientación de las Grietas Inducidas en la Pared Celular (MOG)._____	18
2.- Diseño Estadístico. _____	20
3.- Modelo Estadístico. _____	21
<u>VI.- RESULTADOS Y ANÁLISIS</u>	22
1.- Estudio de la Anatomía del Leño de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> . _____	22
2.- Valores y Observaciones del Ángulo Microfibrilar. _____	24
3.- Comparación entre las Técnicas de Medición del Ángulo Microfibrilar. _____	33
4.- Trayectoria del Ángulo Microfibrilar dentro de un Anillo de Crecimiento. _____	35
5.- Trayectoria del Ángulo Microfibrilar desde la Zona Cerca de la Médula a la Zona Cerca de la Corteza. _____	38
6.- Significado Práctico de la Medición del Ángulo Microfibrilar por Medio de las Técnicas Indirectas. _____	39
<u>VII.- CONCLUSIONES</u>	41
<u>VIII.- RECOMENDACIONES</u>	42
<u>IX.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	44

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura de la pared celular de las traqueidas en coníferas, para la madera normal, juvenil y de compresión._____	5
Figura 2. Medición del ángulo de microfibrillas (AMF) en la capa S_2 de la pared celular de traqueidas, de madera de compresión, juvenil y adulta de coníferas._____	7
Figura 3. Esquematización de la selección de muestras para el estudio.____	12
Figura 4. Detalle del corte de las secciones en la cara radial de las muestras, para las tres técnicas de medición del ángulo microfibrilar empleadas en el estudio._____	13
Figura 5. Microscopio electrónico de barrido modelo Hitachi S-2500, empleado en este estudio._____	14
Figura 6. Orientación de la cámara de la punteadura en la misma dirección del ángulo de microfibrillas de la capa S_2 ._____	16
Figura 7. Orientación de las aberturas de las punteaduras en el área de cruce, para el leño temprano y tardío._____	16
Figura 8. Parámetros de medición de las punteaduras._____	17
Figura 9. Sección transversal. (A) anillos de crecimientos distinguibles con transición gradual entre el leño temprano y el tardío, (B) conducto resinífero longitudinal._____	22
Figura 10. Sección tangencial. (A) radio fusiforme con un conducto resinífero. (B) radio uniseriado._____	23

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Figura 11. Sección radial. (A) punteaduras del tipo pinoide. (B) traqueidas radiales con dentaciones poco pronunciadas. _____ 23

Figura 12. Promedios del ángulo microfibrilar para cada técnica de medición en el árbol N°1. _____ 25

Figura 13. Promedios del ángulo microfibrilar para cada técnica de medición en el árbol N°2. _____ 25

Figura 14. Sección radial de una punteadura vista con el microscópio electrónico en el leño temprano de la zona cerca de la corteza (árbol 2), en donde se observa la punteadura de la traqueida orientada en un ángulo muy similar al de las microfibrillas de la capa S₂. _____ 26

Figura 15. (A) sección radial del leño temprano y (B) sección radial del leño tardío del árbol N°1 vistas con el microscópio electrónico, donde se observa la formación de pequeñas grietas inducidas en la pared secundaria, que siguen la orientación de las microfibrillas. _____ 27

Figura 16. Orientación de las microfibrillas en la capa S₂ de la pared celular vistas con el microscopio electrónico. (A y B) secciones radiales de las microfibrillas en el leño temprano y tardío respectivamente, cerca de la médula en el árbol 1. (C y D) microfibrillas en el leño temprano y tardío respectivamente, cerca de la corteza en el árbol N°1. _____ 28

Figura 17. Sección radial de las traqueidas del leño tardío cerca de la corteza (árbol N°2), en donde se observa una inclinación de las punteaduras muy similar a la de las grietas inducidas en la pared celular. _____ 29

Figura 18. (A) sección radial de las traqueidas del leño temprano cerca de la médula (árbol N°2) y (B) sección radial de las traqueidas del leño tardío cerca de la corteza (árbol N°1), en donde se observa una inclinación uniforme de las grietas._____ 30

Figura 19. (A) sección radial de las traqueidas del leño temprano cerca de la corteza (árbol N°2) con mayor variación en la orientación de las punteaduras._____ 31

Figura 20. Sección radial de las traqueidas del leño tardío cerca de la corteza (árbol N°1), con una inclinación más uniforme de las punteaduras._____ 32

Figura 21. Sección radial de las traqueidas del árbol N°2 donde se muestra una indudable diferencia en la orientación de las punteaduras, entre el leño temprano y el tardío._____ 32

Figura 22. Comparación del ángulo microfibrilar entre las técnicas de medición, dentro de los anillos de crecimiento y desde la zona cercana a la médula a la zona cercana a la corteza, para el árbol N°1._____ 37

Figura 23. Comparación del ángulo microfibrilar entre las técnicas de medición, dentro de los anillos de crecimiento y desde la zona cercana a la médula a la zona cercana a la corteza, para el árbol N°2._____ 38

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Espesor y ángulo de orientación de las microfibrillas, en cada capa de la pared celular para madera normal o adulta. _____	6
Tabla 2. Ubicación de las muestras del estudio en cada uno de los árboles. _____	12
Tabla 3. Valores obtenidos del ángulo microfibrilar para el árbol N°1, en dos zonas diferentes de medición: cerca de la médula del árbol y cerca al cambium vascular o corteza. _____	24
Tabla 4. Valores obtenidos del ángulo microfibrilar para el árbol N°2, en dos zonas diferentes de medición: cerca de la médula del árbol y cerca al cambium vascular o corteza. _____	24
Tabla 5. Resultados de análisis de varianza del ángulo microfibrilar y de la prueba de Bonferroni entre las tres técnicas de medición, para el leño temprano y tardío en cada zona de medición en el árbol N°1. _____	33
Tabla 6. Resultados de análisis de varianza del ángulo microfibrilar y de la prueba de Bonferroni entre las tres técnicas de medición, para el leño temprano y tardío en cada zona de medición en el árbol N°2. _____	34
Tabla 7. Resultados del análisis de varianza para las mediciones directas (MES) del ángulo microfibrilar, dentro de una anillo de crecimiento (leño temprano y tardío) y entre las zonas de medición (cerca de la médula y cerca de la corteza), para el árbol N°1 y 2. _____	36
Tabla 8. Resultados del análisis de varianza para las mediciones indirectas del ángulo microfibrilar, con el uso de las grietas inducidas en	

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

la pared celular (MOG) dentro de una anillo de crecimiento (leño temprano y tardío) y entre las zonas de medición (cerca de la médula y cerca de la corteza), para el árbol N°1 y 2._____ 36

Tabla 9. Resultados del análisis de varianza para las mediciones indirectas del ángulo microfibrilar, con el uso de las punteaduras en el área de cruce (MOP), dentro de una anillo de crecimiento (leño temprano y tardío) y entre las zonas de medición (cerca de la médula y cerca de la corteza), para el árbol N°1 y 2._____ 37

Tabla 10. Valores promedios del ángulo microfibrilar para diferentes especies de coníferas medido por diferentes técnicas, desde la médula a la corteza._____ 40

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

I. - INTRODUCCION

El procesamiento y utilización de la madera de plantaciones de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr., requiere de un completo conocimiento de sus propiedades físicas y mecánicas. Uno de los principales factores que afectan estas propiedades es el ángulo de orientación de las microfibrillas, particularmente en la capa S_2 , el cual es el más importante indicador en términos del volumen total de la pared celular, estando fuertemente vinculado a las propiedades de resistencia mecánica y física de la madera sólida (Panshin y De Zeeuw, 1980; Herman, Dutilleul y Shaw, 1999). Esta es una medida de la desviación angular de las microfibrillas en la capa S_2 de la pared celular, con referencia al eje de la célula (Krestschmann, Alden y Verrill, 1998). Con su medición se proporciona una valiosa información que puede servir como índice de las propiedades mecánicas y de la calidad de la madera (Senft y Bendtsen, 1985).

Con el mejoramiento genético de árboles se han obtenido individuos que pueden crecer rápidamente con un manejo intensivo en plantaciones, como es el caso de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr., en el Oriente del país, que pueden producir madera con dimensiones adecuadas para el aserrío en 25 ó 30 años. Los árboles cosechados a esta edad contienen una alta proporción de madera juvenil la cual, cuando es utilizada en forma sólida, exhibe grandes cambios en sus propiedades físicas, como por ejemplo una excesiva contracción longitudinal, que afecta adversamente la estabilidad dimensional de los productos fabricados de esta madera, así como también las propiedades de resistencia de las fibras en las pulpas para la producción de papel (Herman, Dutilleul y Shaw, 1999; Ying, Kretschmann y Bendtsen, 1994). Una de las principales causas de esa alta tasa de contracción longitudinal es el elevado ángulo de inclinación de las microfibrillas en la capa S_2 de la pared secundaria en la madera juvenil.

El ángulo de microfibrillas es una buena medida, y considerada por muchos autores como la más importante característica de la organización de la pared

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

celular, altamente correlacionada con las propiedades físicas y mecánicas, y generalmente calculada por estimación del promedio del ángulo microfibrilar en la capa S_2 por ser de mayor espesor que las capas S_1 y S_3 , particularmente en el leño tardío, dominando sobre las otras dos en la determinación de las propiedades tecnológicas de la fibras (Huang et.al. 1998; Butterfield, 1998). Esta medida, por lo tanto, conforma la alta prioridad en algunos esquemas sistemáticos para el cálculo de la calidad de la materia prima (Meylan y Probine, 1969).

La anatomía de la madera ha demostrado ser una herramienta muy útil para establecer claves y métodos que permitan estimar las propiedades y características de la madera. Sin embargo, es necesario intensificar estudios prácticos tendientes a explicar las relaciones de la ultraestructura y las propiedades de la madera para el mejor aprovechamiento del árbol, tanto desde el punto de vista del procesamiento como de la utilización. El tecnólogo de la madera necesita la agilidad de un sistema de claves y metodologías que le permitan, partiendo de la densidad y de algunas características determinantes, como por ejemplo el ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S_2 , estimar con suficiente aproximación los parámetros óptimos de procesamiento, resistencia y formas de utilización (Ninin, 1993).

Con la aplicación del microscopio electrónico a los estudios de ultraestructura de la madera se ha obtenido información de mucho valor sobre la estructura de las capas de la pared celular (Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1991). Una alineación angular de las microfibrillas puede ser observada directamente utilizando el microscopio electrónico; pero estos estudios, a pesar de ser muy eficientes, requieren de técnicas de preparación muy largas e implican altos costos, que consumen mucho tiempo, por lo que resultan poco prácticas para una evaluación y pronóstico de las propiedades y calidad de la madera en las plantaciones (Huang et. al. 1998).

En este trabajo se aplica un método sencillo, rápido y menos costoso con el uso del microscopio óptico, para determinar el ángulo de orientación de las microfibrillas en la pared celular de madera de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr., y correlacionar la medición de este ángulo haciendo uso del microscopio electrónico, técnica eficiente y precisa pero que implica grandes costos y requiere métodos de preparación y medición que consumen mucho tiempo.

II. - OBJETIVOS

1. - Objetivo General

Evaluar la eficiencia del microscopio óptico para la medición indirecta del ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S_2 de la pared celular de las traqueidas, de madera de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr., y comparar las mediciones indirectas con las del microscopio electrónico.

2. - Objetivos Específicos

1.- Medir el ángulo de orientación de las microfibrillas de la capa S_2 de la pared celular, por dos técnicas que emplean el microscopio óptico: abertura de las punteaduras en el área de cruce e inducción de grietas en la pared celular de las traqueidas.

2.- Comparar la eficiencia de las mediciones ópticas del ángulo microfibrilar con las mediciones obtenidas con el microscopio electrónico y establecer para el *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr. una metodología rápida y sencilla para la medición del ángulo microfibrilar en la capa S_2 de la pared celular.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

III. - MARCO TEÓRICO

La pared celular es considerada como un material formado por dos fases, una matriz mal definida en su composición química y en sus propiedades, compuesta por polímeros no cristalinos de hemicelulosa y lignina, y una segunda matriz reforzada con microfibrillas de celulosa cristalina que tienen un alto módulo de tensión y están orientadas de una manera bien definida. Este concepto implica que la pared celular de las fibras de madera está compuesta de un material con propiedades elásticas anisotrópicas, con el eje de simetría elástico inclinado a cierto ángulo con respecto al eje de la fibra. Propiedades de resistencia a la flexión, la compresión, la tensión paralela al grano, así como también la contracción dependen del ángulo de orientación de las microfibrillas de celulosa en la capa S_2 de la pared secundaria (Cave y Walker, 1994; Meylan y Probine, 1969).

Para determinar el ángulo de orientación de las microfibrillas es fundamental conocer el modelo actual de la estructura de la pared celular de las traqueidas, en el cual la pared celular está conformada por múltiples capas de celulosa cristalina que producen agregados en forma de microfibrillas, envueltas en un arreglo cilíndrico con una dirección helicoidal con respecto al eje longitudinal de la traqueida, dejando una abertura central o lumen celular (Figura 1). En las traqueidas de madera normal de coníferas se distinguen una pared primaria muy delgada y tres capas secundarias S_1 , S_2 y S_3 (Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1991; Mark, 1981; Panshin y De Zeeuw, 1980; Lotfy et.al.1972):

S_1 : es la capa más externa compuesta de microfibrillas orientadas aproximadamente desde 45° con un patrón en forma de hélice en **S**, hasta aproximadamente 70° con un patrón en forma de hélice en **Z** (Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1991; Mark, 1981).

S_2 : es la capa media, compuesta por microfibrillas orientadas aproximadamente entre 0° y 20° con un patrón en forma de hélice en **Z** (Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1991; Mark, 1981).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

S_3 : es la capa más interna, compuesta por microfibrillas orientadas aproximadamente desde 70° con un patrón en forma de hélice en **Z**, hasta aproximadamente 90° con un patrón en forma de hélice en **S** (Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1991; Mark, 1981).

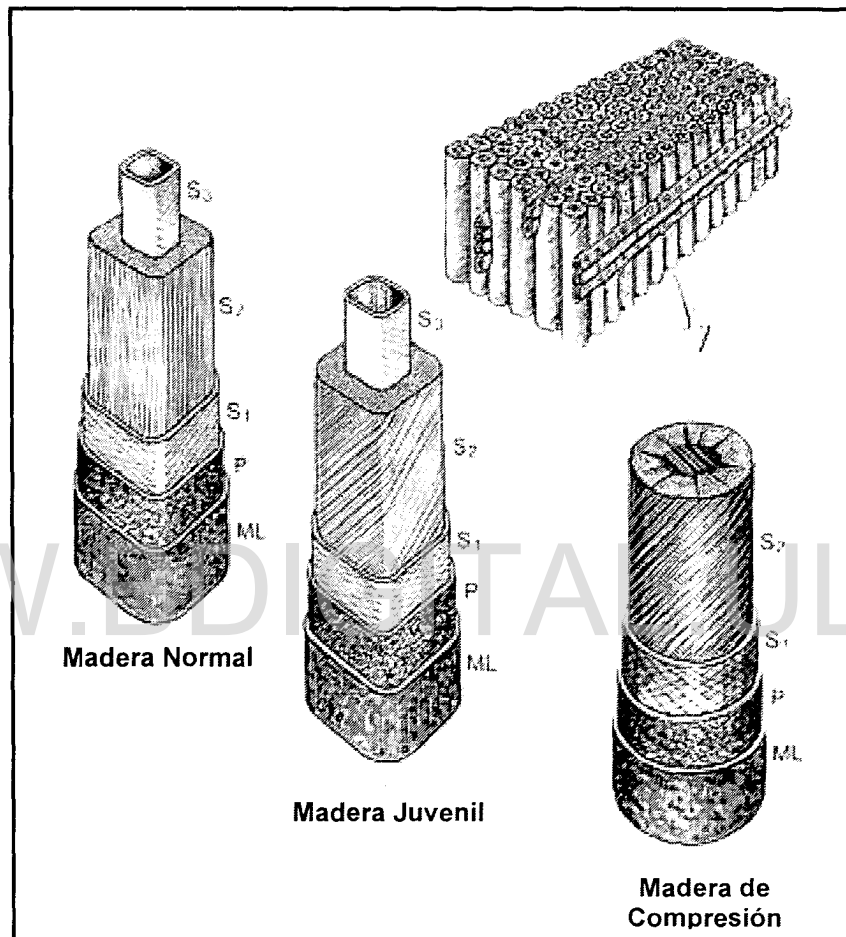


Figura 1. Organización de la pared celular de las traqueidas en coníferas, para la madera normal, juvenil y de compresión (Jozsa y Middleton, 1999).

La tabla 1 resume el espesor y ángulo de orientación de las microfibrillas, en las diferentes capas de la pared celular de madera normal de coníferas.

Tabla 1. Espesor y ángulo de orientación de las microfibrillas, en cada capa de la pared celular para madera normal o adulta. (Mark, 1981; Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1991).

	Pared celular primaria	Pared secundaria: S₁	Pared secundaria: S₂	Pared secundaria: S₃
Espesor en μm	~0.1	0.1	0.6	0.1
Espesor $\approx$ en %	5	10	75	10
Ángulo de orientación de las microfibrillas	red abierta de microfibrillas	45-70°	0-20°	60-90°

En madera normal de coníferas, la capa S₂ es siempre más gruesa o de mayor espesor que las capas S₁ y S₃ (Figura 1). Por esta razón se acepta que el ángulo de las microfibrillas de la capa S₂ de la pared celular de las traqueidas es un factor crítico en el comportamiento mecánico de la madera, ejerciendo una influencia muy significativa sobre la resistencia a la tensión, rigidez y contracción de la madera (Krestschmann, Alden y Verrill, 1998). Aunque la densidad es un factor importante, el ángulo de las microfibrillas en las cadenas de celulosa en la capa S₂ de la pared de células individuales en la madera es ahora reconocido como uno de los principales determinantes de la rigidez en la madera. Un elevado ángulo en la orientación de las microfibrillas da como resultado una baja rigidez y se incrementa la contracción longitudinal. Ambas propiedades son particularmente relevantes para las plantaciones de especies de coníferas con rápido crecimiento (Butterfield, 1998).

El número total de microfibrillas de celulosa presentes está directamente relacionado con el tamaño de la pared celular, lo cual se considera para la relación entre el peso específico (densidad) y las resistencias, excepto para la madera de compresión la cual puede tener un elevado peso específico y un alto ángulo de microfibrillas pero una baja resistencia (Huang et. al. 1998). En general, un ángulo microfibrilar bajo, medido desde el eje longitudinal de la célula hasta la desviación angular de las microfibrillas en la capa S₂ (Figura 2), representa la fuerza o

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

resistencia de la madera, esto es particularmente cierto para las propiedades de resistencia a la flexión, la compresión, la resistencia a la tensión paralela al grano ((Krestschmann, Alden y Verrill, 1998; Senft y Bendtsen, 1985). Adicionalmente, el ángulo microfibrilar es también un indicador útil de la presencia de madera de reacción (Senft y Bendtsen, 1985; Cave y Walker, 1994).

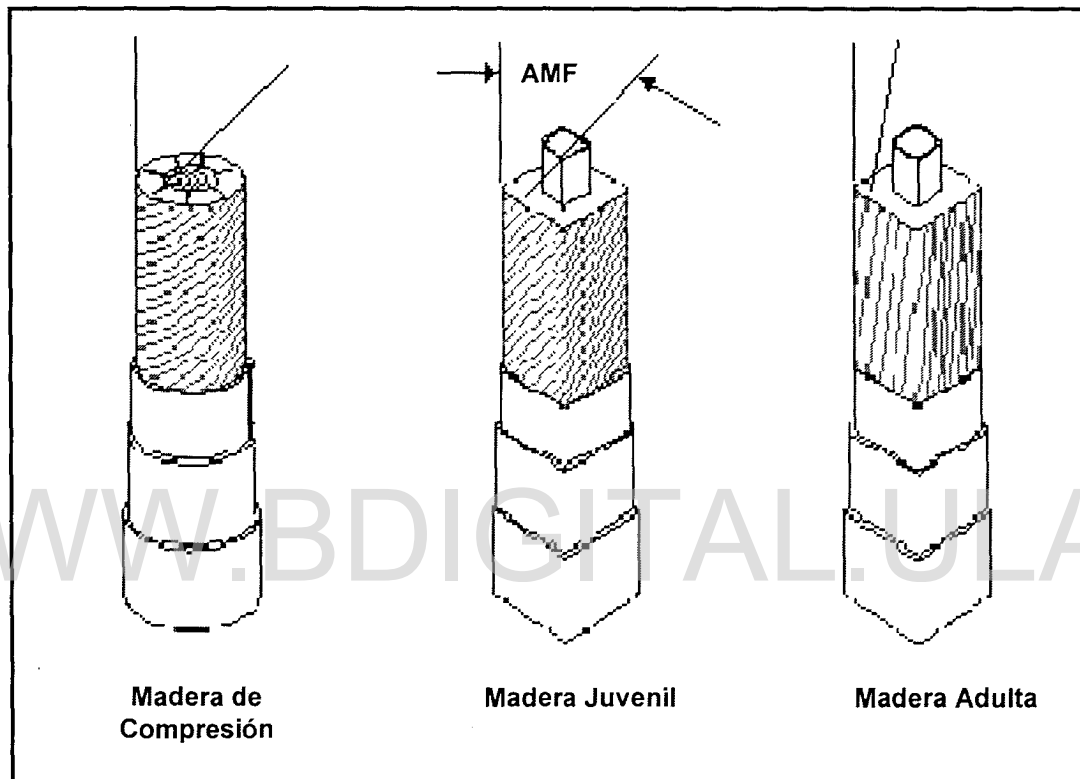


Figura 2. Medición del ángulo de microfibrillas (AMF) en la capa S₂ de la pared celular de traqueidas, de madera de compresión, juvenil y adulta de coníferas (Logan, 1999).

Para muchos autores el ángulo de orientación de las microfibrillas es considerado como una de las características más relevantes para seleccionar la madera para la industria del aserrío y para la industria de pulpa y papel (Butterfield, 1998; Shupe et. al. 1996). Por consiguiente su determinación y variación es tomada muy en cuenta en los estudios de morfología de las traqueidas (Herman, Dutilleul y Shaw-Avella, 1999). Estas investigaciones muestran que el ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S₂ es mayor en los primeros anillos cerca de la médula y

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

disminuye gradualmente durante los años siguientes (Cave y Walker, 1994; Donaldson, 1996; Panshin y De Zeeuw, 1980). Un ángulo microfibrilar grande está asociado con una longitud de traqueidas cortas y un bajo porcentaje de madera tardía, lo que explica las menores resistencias y baja rigidez de la madera juvenil de coníferas (Butterfield, 1998). Dentro de un anillo de crecimiento, las traqueidas del leño temprano muestran un ángulo microfibrilar muy grande, mientras que aquéllas del leño tardío tienen las microfibrillas bastante paralelas al eje de la célula. Entre estos extremos, se supone que el ángulo microfibrilar disminuye dando una tendencia lineal (Cave y Walker, 1994; Panshin y De Zeeuw, 1980).

La orientación de las microfibrillas en la capa S_2 de la pared celular es una importante característica anatómica de la madera, fuertemente relacionada con las propiedades físicas y mecánicas de la misma (Huang, 1995). Numerosos métodos han sido desarrollados para medir el ángulo de orientación de las microfibrillas, particularmente en la capa S_2 de la pared celular. Una alineación angular de las microfibrillas con respecto al eje de la célula puede ser medida de forma directa o indirecta en secciones de madera o fibras de pulpa para papel (Donaldson, 1991; Huang et.al. 1998).

Los métodos directos de medición emplean el microscopio electrónico de barrido o de transmisión, con el cual se obtiene una medición precisa del ángulo de orientación de la microfibrillas en las diferentes capas de la pared celular. Entre los métodos indirectos de medición del ángulo microfibrilar de la capa S_2 utilizados tradicionalmente se encuentran las técnicas que emplean difracción de rayos X por la celulosa cristalina (Cave y Robinson, 1998), extinción de la luz polarizada, análisis con ultrasonido, microscopía confocal y empleo del microscopio de luz, con el cual se han desarrollado básicamente dos técnicas: medición de la orientación de la abertura de las punteaduras en el área de cruce, e inducción de grietas y alineamiento de cristales de yodo en la pared celular (Donaldson, 1991; Huang, 1995; Senft y Bendtsen, 1985; Huang et. al. 1998).

Hisashi, Ohtani y Fukazawa (1991), utilizando un microscopio electrónico de barrido, observaron y midieron la orientación de las microfibrillas en la pared secundaria, en muestras de la región cambial de madera de *Abies sachalinensis* Master, determinado los límites entre las capas (S_1 , S_2 y S_3) que la componen, debido a que el ángulo de orientación de las microfibrillas cambia progresivamente desde la capa más externa a la más interna de la pared secundaria. En un estudio posterior, Hisashi, Ohtani y Fukazawa (1992), investigaron la relación entre la orientación de los depósitos de las microfibrillas y el cambio rotacional de estas, en la capa S_3 de la pared secundaria de traqueidas de tres especies de coníferas (*Larix leptolepis*, *Picea jezoensis* y *Picea abies*), utilizando el microscopio electrónico de barrido. Reportando que la orientación de las microfibrillas en esta capa varía en cada anillo de crecimiento, para cada una de las tres especies.

Nilsson (1981), determinó la orientación de las microfibrillas en la capa S_2 de la pared celular de fibras de la especie *Mastixiodendron pachyclados* (K. Schum.) Melch, infectando la madera con un hongo de pudrición blanda, el cual se caracteriza por su capacidad de crecer dentro de la capa S_2 de la pared celular. Durante la degradación de la sustancia de la pared celular los hongos de pudrición blanda forman cavidades orientadas en cadena que siguen con detalle la orientación de las microfibrillas en la capa S_2 de la pared celular.

Donaldson (1991), utilizó el ángulo de inclinación de las aberturas de las punteaduras en el área de cruce para estimar el ángulo microfibrilar en las traqueidas de una pulpa química de conífera, con el empleo del microscopio óptico. La técnica descrita en este reporte fue desarrollada con la finalidad de estudiar la influencia del ángulo microfibrilar de la capa S_2 sobre las propiedades de las pulpas químicas no refinadas.

Otra técnica de medición indirecta del ángulo microfibrilar de la capa S_2 , desarrollada por Senft y Bendtsen (1985), consiste en inducir la formación de grietas en la pared celular por medio de la aplicación de un secado de las

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

muestras a una temperatura de 100 °C, obteniéndose mejores resultados humedeciendo y resecando nuevamente la muestra, lo cual facilita la formación de nuevas grietas. Posteriormente se agrega yoduro de potasio, precipitándose cristales de yodo dentro de las grietas con la finalidad de realzar su orientación durante la observación y medición de su desviación angular, con respecto al eje longitudinal de las fibras, utilizando para ello el microscopio óptico de luz normal o polarizada. Una variante interesante de esta técnica es la desarrollada por Huang (1995), en la que se propone un tratamiento con ultrasonido de las muestras como método efectivo para inducir grietas o fisuras en la pared celular de las traqueidas de madera de *Pinus taeda* L., posteriormente se agrega a las secciones yoduro de potasio.

Krestschmann, Alden y Verrill (1998) realizaron, en *Pinus taeda* L., un estudio exploratorio sobre la variación de las observaciones del ángulo microfibrilar de la capa S₂, donde compararon las técnicas de medición de la orientación de grietas inducidas en la pared celular con la de difracción de rayos X por las microfibrillas de celulosa y concluyeron que las mediciones realizadas por ambos métodos se correlacionan razonablemente y sus coeficientes de variación son muy similares.

Ying, Kretschmann y Bendtsen (1994), trabajando con *Pinus taeda* L. de plantaciones bajo manejo intensivo, proporcionan información básica sobre la relación entre la contracción longitudinal y el ángulo microfibrilar de la capa S₂ de la pared celular. Para la medición de ésta desviación angular emplean la técnica desarrollada por Senft y Bendtsen (1985). En las secciones transversales estudiadas se toman únicamente diez mediciones en cada banda seleccionada de leño temprano y leño tardío, y los valores promedios obtenidos muestran que la medición del ángulo microfibrilar de capa S₂ es sensitiva a la edad del árbol, disminuyendo desde la región medular a la corteza del árbol. Adicionalmente establecen que la medida del ángulo microfibrilar junto con el peso específico son los mejores indicadores de la contracción longitudinal.

Herman, Dutilleul y Shaw (1999), estudian el efecto de la tasa de crecimiento sobre la trayectoria del ángulo microfibrilar en la capa S_2 de la pared celular, entre anillos de crecimientos y dentro de un anillo de crecimiento en la especie *Picea abies*. Para determinar la fluctuación del ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S_2 , utilizan las aberturas de las punteaduras en el área de cruce. Los resultados del estudio muestran que la trayectoria de la desviación angular de las microfibrillas en la capa S_2 dentro de un anillo de crecimiento disminuye linealmente desde el leño temprano al leño tardío, confirmando lo reportado en la literatura. Mientras que la trayectoria del ángulo microfibrilar entre anillos de crecimientos muestra cambios significativos con la edad, para los árboles de rápido desarrollo en comparación con los árboles de lento desarrollo.

IV. - FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

H_a : Las mediciones indirectas del ángulo de orientación de las microfibrillas de la capa S_2 de la pared celular de las traqueidas, determinadas con el empleo del microscopio óptico, son tan eficientes como las mediciones directas que se obtienen con el microscopio electrónico.

V. - MATERIALES Y METODOS

El material de este estudio pertenece a árboles de *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr., de 21 años de edad, proveniente de las plantaciones de Uverito en el Estado Monagas, al oriente del país. Se eligieron secciones transversales o discos, a diferentes alturas del tallo, de dos árboles. De cada sección se tomaron dos muestras o anillos de crecimiento, uno cercano a la médula y el otro a la corteza (Figura 3). Cada uno de los anillos de crecimiento seleccionados debió presentar una notable diferencia entre el leño temprano y el leño tardío, para posteriormente poder cortar pequeñas muestras en forma de cubos o bloques de

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

madera, conteniendo ambas zonas y cuya dimensión está en función del tamaño del anillo de crecimiento.

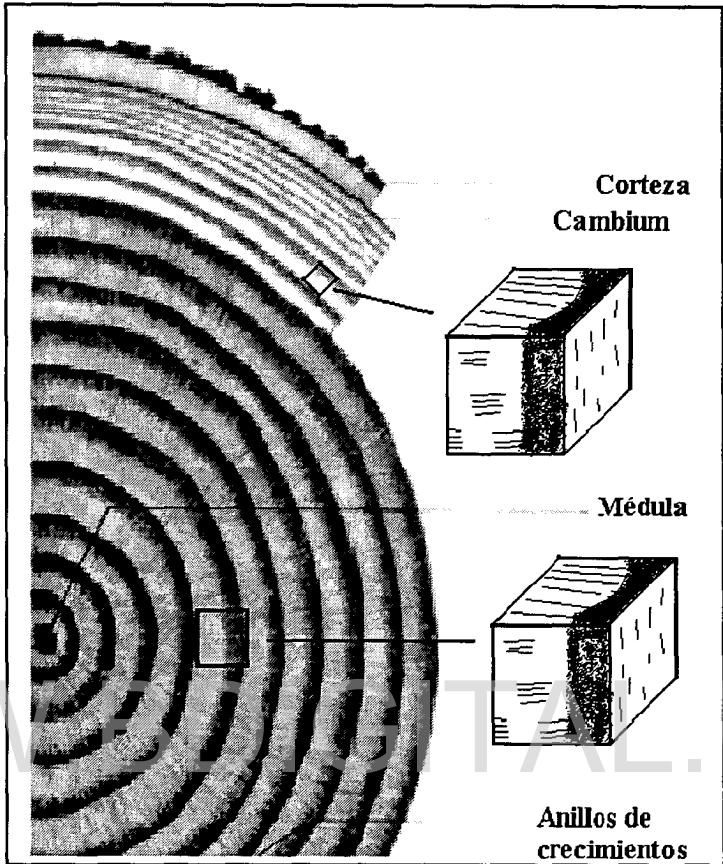


Figura 3. Esquematzación de la selección de muestras para el estudio.

La ubicación aproximada de cada una de las muestras o anillos de crecimiento seleccionados, en las secciones o discos de cada árbol se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Ubicación de las muestras del estudio en cada zona de medición, para los dos árboles evaluados.

Árbol	Muestra	Ubicación	Distancia
1	cerca de la médula	4 ^{to} anillo desde la médula	20 mm desde la médula
	cerca de la corteza	17 ^{mo} anillo desde la médula	65 mm desde la médula
2	cerca de la médula	1 ^{er} anillo desde la médula	10 mm desde la médula
	cerca de la corteza	16 ^{to} anillo desde la médula	79 mm desde la médula

Las mediciones de la desviación angular de las microfibrillas en la capa S_2 de la pared celular para las tres técnicas utilizadas se realizaron sobre la cara radial de las muestras seleccionadas en el área de leño temprano y tardío (Figura 4).

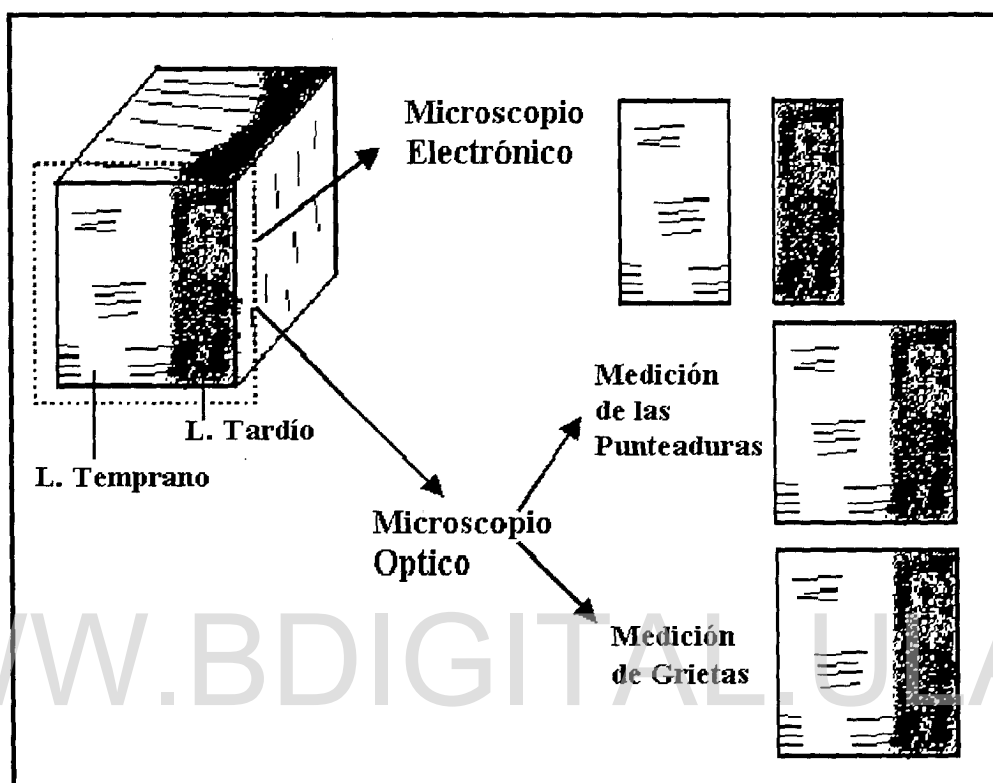


Figura 4. Detalle del corte de las secciones en la cara radial de las muestras, para las tres técnicas de medición del ángulo microfibrilar empleadas en el estudio.

1. - Preparación de las Muestras y Medición del Angulo de Orientación de las Microfibrillas

1.1. - Microscopio Electrónico de Barrido (MES)

De cada muestra seleccionada de madera seca al aire, se cortaron radialmente varias secciones de aproximadamente 500 μm de espesor, con el empleo de un micrótopo de deslizamiento, separando inmediatamente el leño temprano del tardío (Figura 4).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Las secciones se deshidrataron a diferentes grados de acetona y luego se secaron en estufa durante dos a tres días a 50° centígrados, eliminando el agua en las secciones para evitar la contaminación de la columna de electrones del microscopio electrónico. Posteriormente se fijaron con 1% de tetróxido de osmio por aproximadamente dos horas, de manera de incrementar la conductividad electrónica, y mejorar el contraste de la imagen de la muestra (Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1992). Finalmente se aplicó un recubrimiento de plata sobre las muestras en un ionizador al vacío, durante un tiempo aproximado de 90 segundos, con el fin de hacerlas conductoras, de modo que los electrones del cañón del microscopio puedan ser dispersados y captados, originando de esta forma la imagen.

Los especímenes fueron examinados con un voltaje de aceleración de 5 a 10 kV en un microscopio electrónico de barrido, modelo Hitachi S-2500 (Figura 5), obteniéndose las mejores imágenes con un voltaje de aceleración de 5 kV.

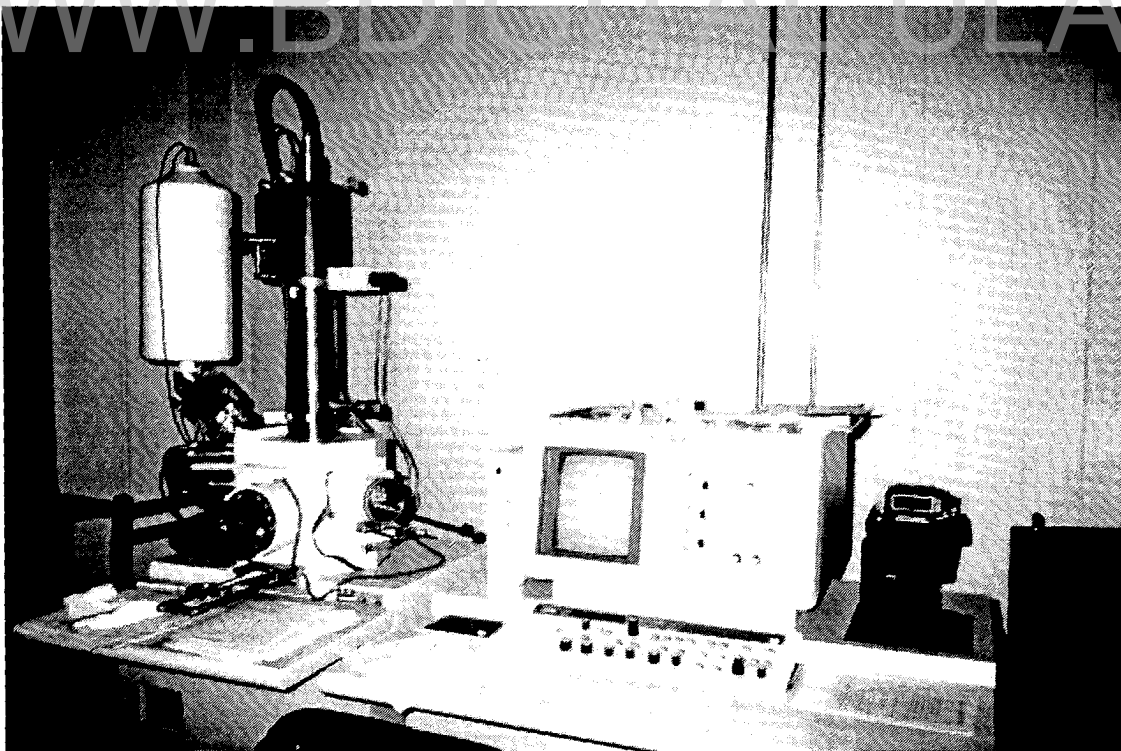


Figura 5. Microscopio electrónico de barrido modelo Hitachi S-2500.

Las magnificaciones entre 8.000 a 15.000 permitieron obtener imágenes de buena calidad, adecuadas para la medición del ángulo microfibrilar y alcanzando un adecuado contraste topográfico (Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1991; 1992).

Las secciones estudiadas fueron fotografiadas de acuerdo al número de mediciones establecidas, 15, y empleando posteriormente un programa de diseño (AutoCAD R14) que permite digitalizar las imágenes, se obtuvo el valor del ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S_2 .

El ángulo entre el eje de las traqueidas y las microfibrillas se obtuvo fuera de las áreas con punteaduras, desde la región de la superficie interna (lumen celular) o externa de la pared celular de las traqueidas. Los límites entre cada capa (S_1 , S_2 y S_3) se determinan por el cambio de orientación de las microfibrillas (Tabla 1), vista en el microscopio electrónico (Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1991; 1992).

1.2. - Microscopio de Luz (Medición Indirecta)

Se emplearon dos técnicas indirectas para inferir la orientación de las microfibrillas en la capa S_2 de la pared celular:

A.- Medición del Ángulo de Orientación de las Aberturas de las Punteaduras, en el Área de Cruce (MOP)

Esta técnica utiliza el ángulo de la abertura de las punteaduras en las áreas de cruce, las cuales siguen aproximadamente la alineación del ángulo microfibrilar de la capa S_2 de la pared celular (Figura 6). Debido a que la mayor parte de la cavidad de la punteadura está contenida en la capa S_2 , el ángulo de inclinación de la punteadura con respecto al eje de la traqueida es muy similar al de las microfibrillas de la capa S_2 (Panshin y De Zeeuw, 1980; Senft y Bendtsen, 1985; Donaldson, 1991).

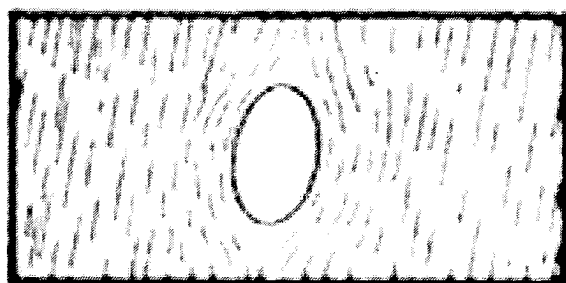
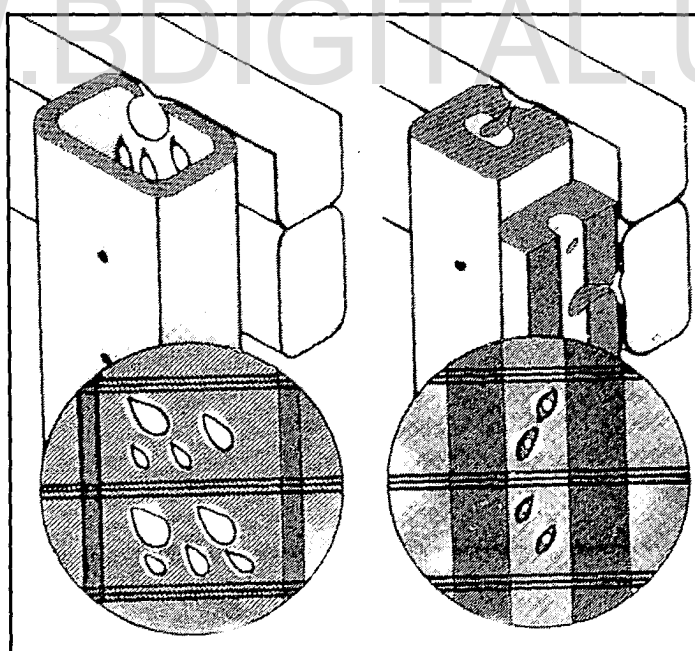


Figura 6. Orientación de la cámara de la punteadura en la misma dirección del ángulo de microfibrillas de la capa S_2 (Haygreen y Bowyer, 1994).

Para la especie *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr., estas punteaduras son del tipo pinoide, tomando en consideración la clasificación de la punteaduras en coníferas según Phillips (1948), citado por Panshin y De Zeeuw (1980). Las cuales dan una clara indicación del ángulo microfibrilar en la capa S_2 (Figura 7), debido a la forma elíptica de su abertura (Herman, Dutilleul y Shaw, 1999).



Leño temprano

Leño tardío

Figura 7. Orientación de las aberturas de las punteaduras en el área de cruce, para el leño temprano y tardío (Haygreen y Bowyer, 1994).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Parámetros de las Punteaduras de la Pared Celular

- **Orientación de las Punteaduras (α):** es definida como el ángulo entre el eje longitudinal de la punteadura y el eje de la traqueida local (Figura 8). La siguiente ecuación describe esta situación (Sirviö y Kärenlampi, 1998):

$$\alpha = | \alpha_f - \alpha_p |$$

donde :

α_f : orientación local de la traqueida (eje de la traqueida).

α_p : orientación del eje longitudinal de la punteadura (eje de la punteadura).

α : ángulo de orientación de la punteadura.

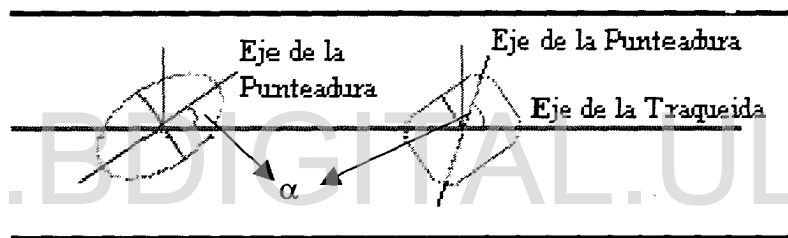


Figura 8. Parámetros de medición de las punteaduras del área de cruce (Sirviö y Kärenlampi, 1998).

- **Tipos de Punteaduras:** en las coníferas se presentan tres tipos comunes de punteaduras en las traqueidas longitudinales (Sirviö y Kärenlampi, 1998):

- Punteaduras areoladas que ponen en contacto una traqueida con otra.
- Punteaduras que ponen en contacto una traqueida longitudinal con una célula de parénquima radial, normalmente llamadas punteaduras del área de cruce.
- Punteaduras que ponen en contacto una traqueida longitudinal con una traqueida radial.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Procedimiento

El proceso comienza con el corte de las secciones radiales en el micrótopo de deslizamiento de aproximadamente, 15 a 20 μm de espesor (Figura 4), de las muestras de madera seleccionadas de cada árbol. Cada sección radial contiene un anillo de crecimiento. El ángulo de inclinación de la abertura de la punteadura se obtuvo en el campo de cruce con respecto al eje de las traqueidas del leño temprano y del tardío, omitiendo la transición entre ambas zonas. Para tener un mayor realce y definición de las secciones éstas se colorearon con safranina.

Las observaciones y medición del ángulo de orientación de cada punteadura se realizaron utilizando un microscopio de luz, marca KYOWA, tomando de cada sección las fotomicrográficas necesarias de acuerdo al número de mediciones establecidos, 60, con una cámara marca PENTAX SFXn, adaptada al microscopio de luz. Posteriormente empleando un programa de diseño (AutoCAD R14) que permite digitalizar las imágenes se obtuvo la medición del ángulo de orientación de las punteaduras.

B.- Medición del Ángulo de Orientación de las Grietas Inducidas en la Pared Celular (MOG)

Esta técnica induce la formación de grietas en la pared celular, realizando un secado rápido de la muestra. La rápida contracción y el elevado estrés de secado causan en la pared celular agrietamientos o fisuras a lo largo de la dirección de las microfibrillas de la capa S_2 de la pared celular (Senft y Bendtsen, 1985). Posteriormente se agrega yoduro de potasio para realzar las grietas en la pared celular, agregando ácido nítrico a las secciones para precipitar los cristales de yodo sobre las grietas de la pared celular (Senft y Bendtsen, 1985; Panshin y De Zeeuw, 1980; Huang et. al. 1998; Donaldson, 1991).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Procedimiento

Las muestras seleccionadas se secaron al horno a una temperatura de 100 °C para inducir el agrietamiento en las paredes celulares. Resultó ventajoso remojar las muestras hasta saturarlas y luego resecarlas, de manera de obtener grietas adicionales. Luego se cortaron en el micrótopo de deslizamiento secciones radiales de aproximadamente 15 a 20 μm de espesor (Figura 4), almacenando cada sección en alcohol al 50% (Senft y Bendtsen, 1985).

Las secciones se deshidrataron en alcohol absoluto por 5 minutos dos veces. Posteriormente se agrega una solución de yoduro de potasio al 2% por 2 a 10 segundos. A continuación las secciones se montaron en una lámina, secándose el exceso de solución con un papel absorbente. Cuidadosamente se añadieron de 1 a 2 gotas de ácido nítrico al 60% a cada sección colocando luego el cubreobjeto (Senft y Bendtsen, 1985; Huang et. al. 1998).

El ángulo microfibrilar se observó como alargadas grietas oscuras en líneas paralelas inclinadas con respecto al eje de la célula (Donaldson, 1991; Senft y Bendtsen, 1985), utilizando un microscopio de luz, marca KYOWA, y tomando de cada sección las fotomicrografías necesarias de acuerdo al número de mediciones establecidos (60), con una cámara marca PENTAX SFXn, adaptada al microscopio de luz.

De forma similar a las dos técnicas anteriormente descritas, la medición del ángulo de orientación de cada línea de agrietamiento se realizó empleando un programa de diseño (AutoCAD R14), que permite digitalizar la imagen y medir el ángulo de orientación de las grietas.

2. - Diseño Estadístico

- Determinación del Tamaño de las Muestras para cada Técnica

Para las mediciones directas del ángulo microfibrilar con el empleo del microscopio electrónico, el tamaño de la muestra se estableció tomando en consideración los siguientes aspectos:

1. - El valor de las mediciones del microscopio electrónico se considera el valor real más preciso del ángulo microfibrilar en la capa S_2 , y por lo tanto suficientemente representativo para ser comparado con las mediciones indirectas obtenidas por las otras dos técnicas.
2. - De acuerdo a lo reportado en la literatura para varios estudios, se seleccionan tamaños de muestras de cinco mediciones, como representativas, para determinar el ángulo microfibrilar en la capa S_2 utilizando el microscopio electrónico (Hisashi, Ohtani y Fukazawa, 1991; 1992).

Se establecieron para esta técnica, quince mediciones del ángulo microfibrilar en la capa S_2 de la pared celular de las traqueidas, como muestra suficientemente representativa en cada zona del anillo de crecimiento.

El tamaño de las muestras para las dos técnicas de medición indirecta del ángulo microfibrilar de la capa S_2 de la pared celular de las traqueidas, se estimó a partir de la siguiente fórmula (Donaldson, 1991):

$$n = (2 t_{\alpha/2}^2 S^2) / d^2$$

donde :

n = tamaño de la muestra.

$t_{\alpha/2}$ = t de Student, de acuerdo al valor deseado de probabilidad

S = desviación estándar de la muestra.

d = mínima diferencia que pueda ser detectada o intervalo de confianza

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela²⁰
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Asumiendo en la fórmula una desviación estándar de 8° y una mínima diferencia de 3° , se obtuvo para un nivel de confianza de $(1-\alpha) = 0.95$, un tamaño de muestra de 54,6 mediciones. De acuerdo a esta estimación se aproximó el tamaño de la muestra a 60 mediciones, para el ángulo de inclinación de la abertura de las punteaduras y para la orientación de las grietas o fisuras inducidas en la pared celular de las traqueidas.

3. - Modelo Estadístico

Con la finalidad de comparar qué tan relacionados se encuentran los valores del ángulo microfibrilar obtenidos por las tres técnicas de medición, se diseñó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para tamaños de muestras desiguales. Para conocer cuál de las técnicas indirectas de medición se encuentra más relacionada con los valores obtenidos con el microscopio electrónico, o técnica de medición directa, se utilizó el método estadístico de comparaciones múltiples de medias de tratamientos de Bonferroni, diseñado para tamaños de muestras desiguales (Mendenhall y Sincich, 1997), determinando la diferencia mínima significativa entre las tres técnicas de medición, dentro de cada nivel o zona de medición (Tablas 5 y 6).

El comportamiento de las técnicas en cada zona de medición es evaluado por medio de un diseño estadístico de bloques aleatorizados para tamaños de muestras desiguales, con dos tratamientos o tipos de madera dentro de un anillo de crecimiento (leño temprano y tardío) y dos bloques o zonas de medición (cerca de la médula y cerca de la corteza) dentro de cada árbol. Los resultados para éste diseño se presentan en las tablas 7 y 8.

Para el procesamiento de los datos y realización de ambos diseños se utilizó el programa estadístico MINITAB Versión 13 (MINITAB Institute Inc. 1999).

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

VI.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

1- Estudio de la Anatomía del Leño de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Familia : PINACEAE

Nombre vulgar: Pino Caribe

Descripción macroscópica: madera de color amarillento, sin transición entre albura y duramen. Olor de naturaleza resinosa, sabor ausente. Grano recto a entrecruzado. Madera moderadamente dura y pesada. Anillos de crecimiento distinguibles, por la presencia de zonas de madera tardía y temprana. Canales resiníferos presentes.

Descripción microscópica: anillos de crecimientos distinguibles, con transición gradual entre madera temprana y madera tardía (Figura 9). Traqueidas longitudinales con punteaduras areoladas uniseriadas y biseriadas. Punteaduras en el área de cruce tipo pinoide, a veces fenestriformes, variables en tamaño y forma, de 1-4 generalmente por área de cruce. Parénquima axial ausente. Radios de dos tipos, uniseriados numerosos y fusiformes escasos (Figura 10).

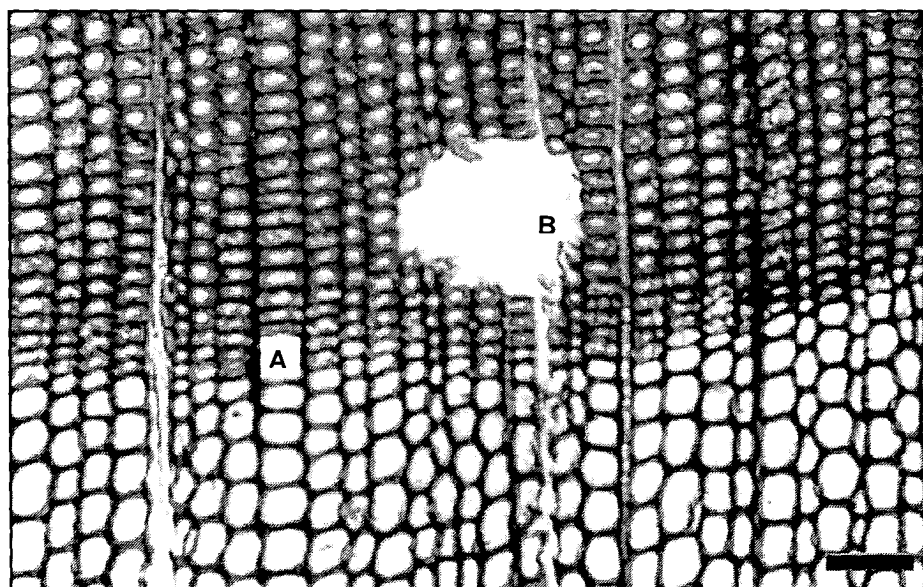


Figura 9. Sección transversal. (A) anillos de crecimientos distinguibles con transición gradual entre el leño temprano y el tardío, (B) conducto resinífero longitudinal. Barra= 100 μ m.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Traqueidas radiales presentes en ambos tipos de radios, interpuestas o marginales, con dentaciones generalmente poco pronunciadas (Figura 11), en ocasiones bastantes pronunciadas formando un patrón reticulado. Canales resiníferos presentes, longitudinales y transversales. Porcentaje de madera tardía mayor hacia las zonas cerca de la corteza o región cambial.

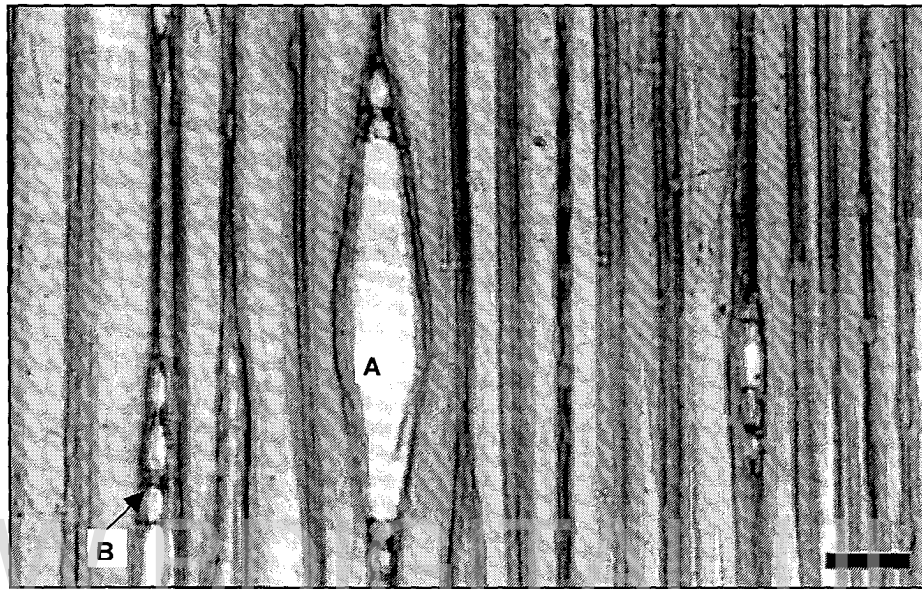


Figura 10. Sección tangencial. (A) radio fusiforme con un conducto resinífero. (B) radio uniseriado. Barra = 50 μ m.

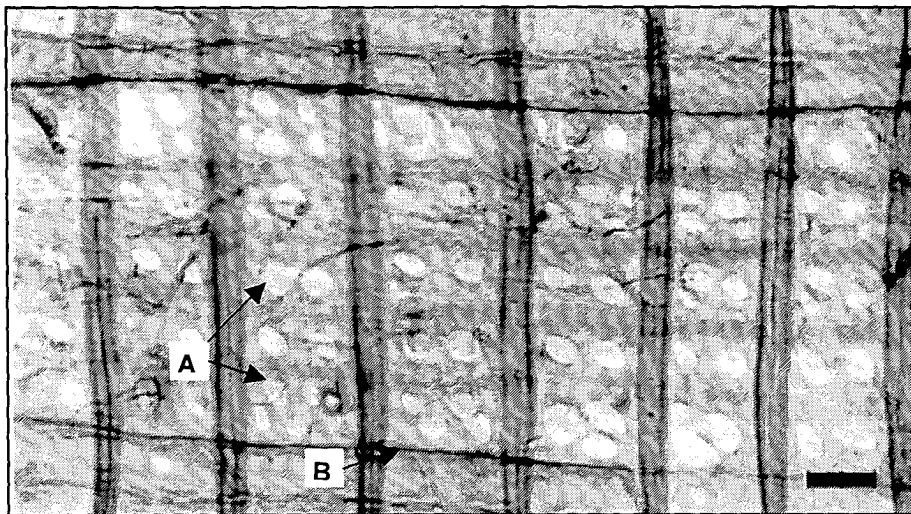


Figura 11. Sección radial. (A) punteaduras del tipo pinoide. (B) traqueidas radiales con dentaciones poco pronunciadas. Barra = 20 μ m.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

2.- Valores y Observaciones del Ángulo Microfibrilar

En las tablas 3 y 4 se presentan los valores promedios, desviaciones estándar, máximos y mínimos del ángulo de orientación de las microfibrillas, determinado por las tres diferentes técnicas de medición microscópicas empleadas en este estudio. Además, se representan gráficamente los valores promedios obtenidos (Figuras 12 y 13), por las diferentes técnicas y para las zonas de medición en cada árbol.

Tabla N° 3. Valores obtenidos del ángulo microfibrilar para el árbol N°1, en dos zonas diferentes de medición: cerca de la médula y cerca al cambium vascular o corteza del árbol.

Estimador	Cerca de la Médula (4 ^{to} anillo)						Cerca de la Corteza (17 ^{to} anillo)					
	Leño Temprano			Leño Tardío			Leño Temprano			Leño Tardío		
	MES	MOP	MOG	MES	MOP	MOG	MES	MOP	MOG	MES	MOP	MOG
Promedio (°)	31,858	36,492	32,119	13,088	15,967	15,818	24,650	26,729	25,563	8,069	9,424	10,099
Desv. Est. (°)	3,447	6,508	3,042	1,697	4,085	2,123	2,207	6,507	3,307	2,393	3,407	2,937
Máximo (°)	37,34	48,33	38,39	15,84	25,25	19,83	28,35	38,16	30,38	13,76	21,20	16,38
Mínimo (°)	27,66	20,16	27,07	9,53	10,38	8,75	20,54	15,52	18,72	4,87	2,49	4,44

Tabla 4. Valores obtenidos del ángulo microfibrilar para el árbol N°2, en dos zonas diferentes de medición: cerca de la médula y cerca al cambium vascular o corteza del árbol.

Estimador	Cerca de la Médula (1 ^{er} anillo)						Cerca de la Corteza (16 ^{to} anillo)					
	Leño Temprano			Leño Tardío			Leño Temprano			Leño Tardío		
	MES	MOP	MOG	MES	MOP	MOG	MES	MOP	MOG	MES	MOP	MOG
Promedio (°)	33,047	40,452	34,096	24,507	27,913	25,236	22,765	26,707	23,080	8,603	10,661	10,339
Desv. Est. (°)	2,925	4,918	2,978	2,945	4,230	2,912	4,407	6,171	2,598	3,101	3,426	2,767
Máximo (°)	38,24	48,51	40,27	28,66	37,15	31,10	28,79	37,53	28,47	14,03	18,76	19,61
Mínimo (°)	29,80	28,43	27,37	20,89	16,45	18,79	16,62	12,55	18,47	3,25	5,30	5,45

Leyenda: **MES:** medición del ángulo microfibrilar con el microscopio electrónico.

MOP: medición del ángulo de orientación de las punteaduras con el microscopio óptico.

MOG: medición del ángulo de orientación de las grietas con el microscopio óptico.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

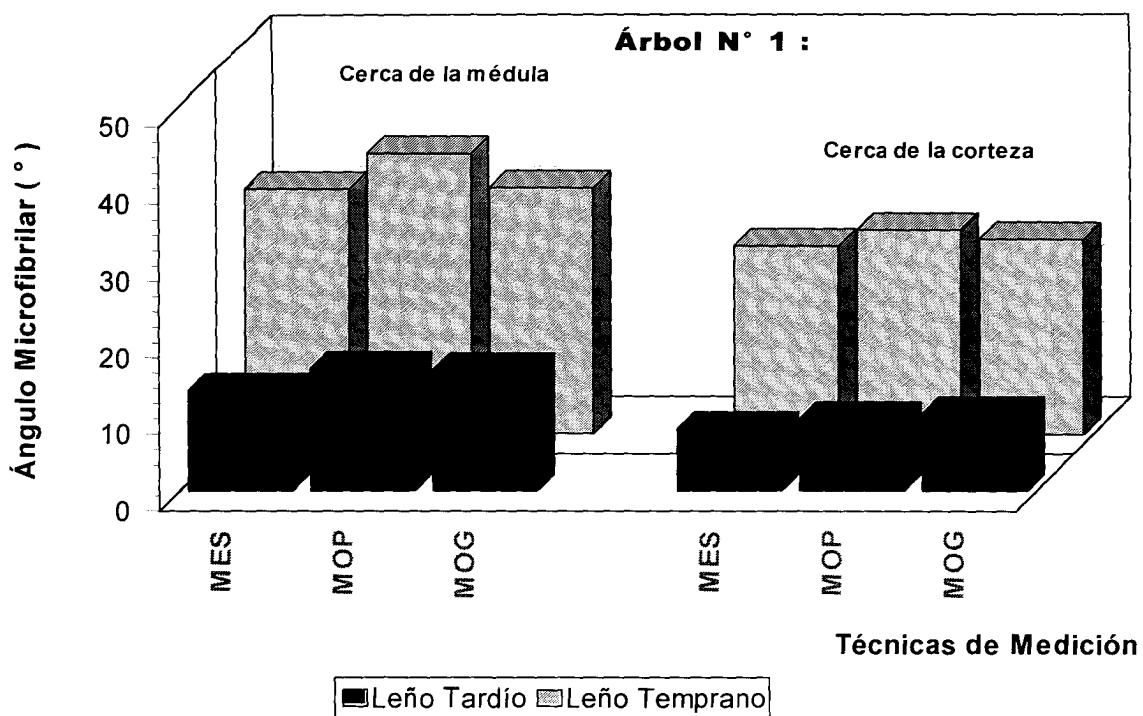


Figura 12. Promedios del ángulo microfibrilar para cada técnica de medición en el árbol N°1.

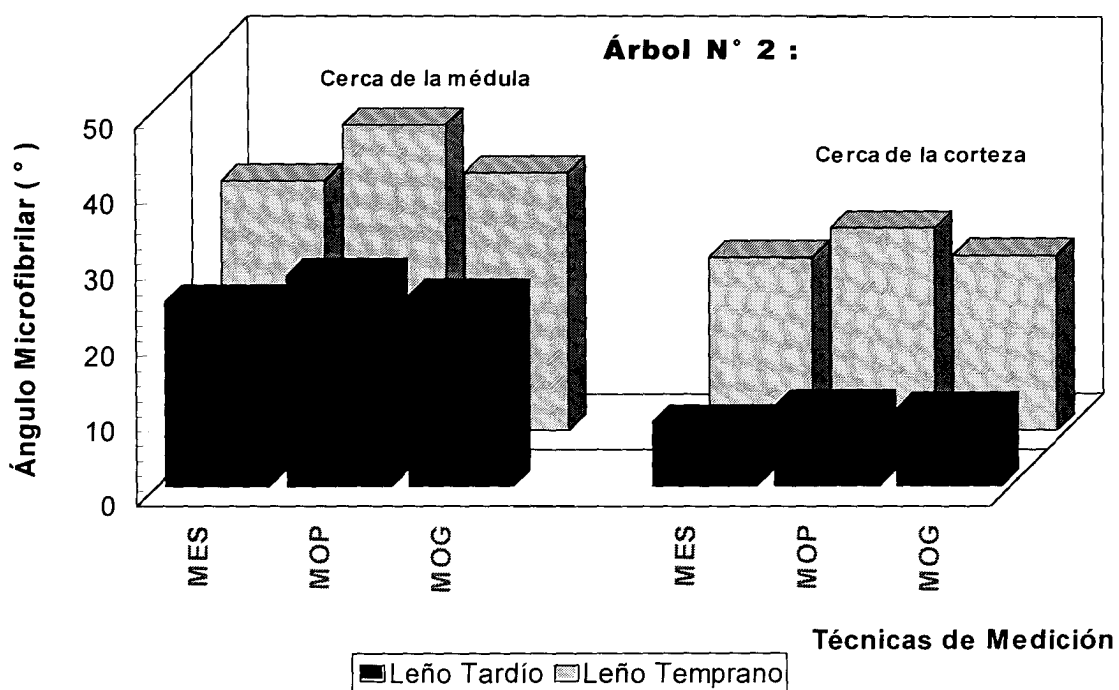


Figura 13. Promedios del ángulo microfibrilar para cada técnica de medición en el árbol N°2.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Las observaciones del ángulo microfibrilar en la capa S_2 de la pared secundaria empleando el microscopio electrónico en las áreas de puntuaciones de cruce y de las grietas inducidas en la pared, muestran que la orientación de éstas con respecto al eje vertical de las traqueidas es definida por la inclinación de las microfibrillas de la capa S_2 (Figuras 14 y 15), lo cual corresponde a lo reportado en la literatura para otras especies (Krestschmann, Alden y Verrill, 1998; Senft y Bendtsen, 1985; Panshin y De Zeeuw, 1980; Donaldson, 1991). Sin embargo el uso de las aberturas de las punteaduras en las áreas de cruce para determinar indirectamente el ángulo microfibrilar está limitado a especies con punteaduras del tipo pinoide y piceoide (Herman, Dutilleul y Shaw, 1999).



Figura 14. Sección radial de una punteadura vista con el microscopio electrónico en el leño temprano de la zona cerca de la corteza (árbol N°2), en donde se observa la punteadura de la traqueida orientada en un ángulo muy similar al de las microfibrillas de la capa S_2 .

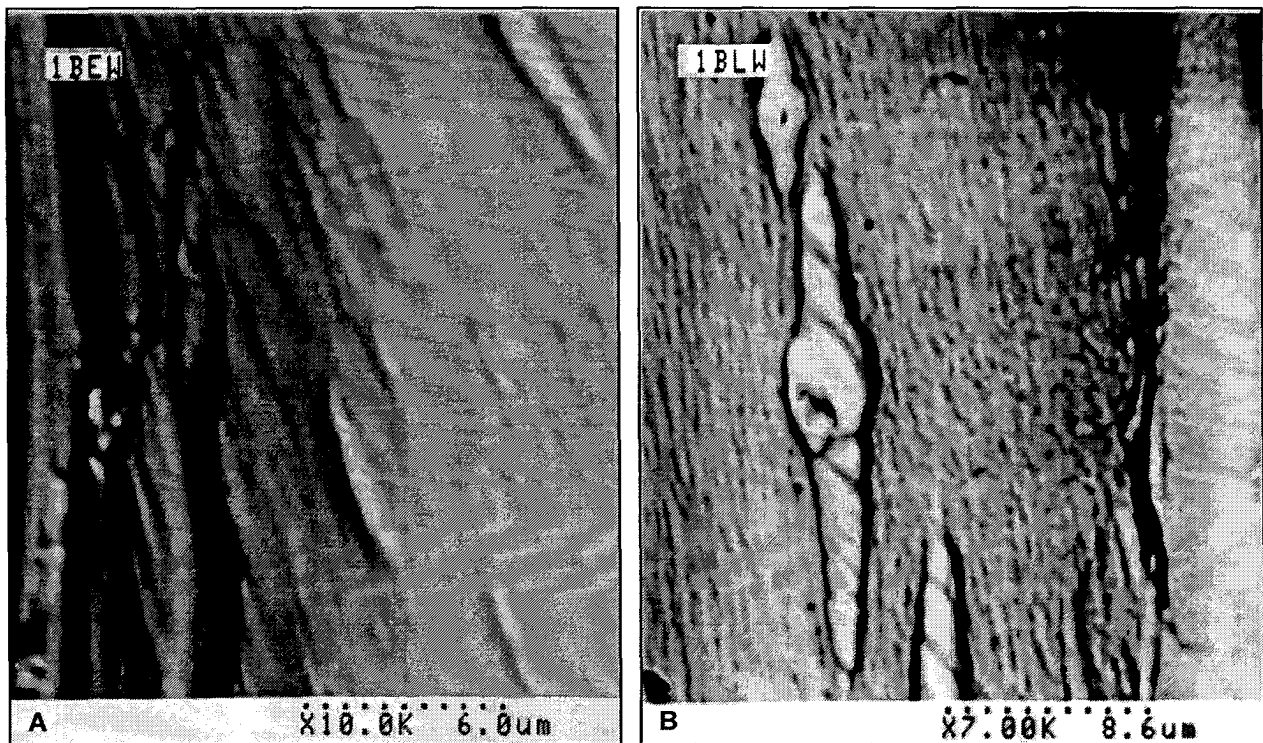
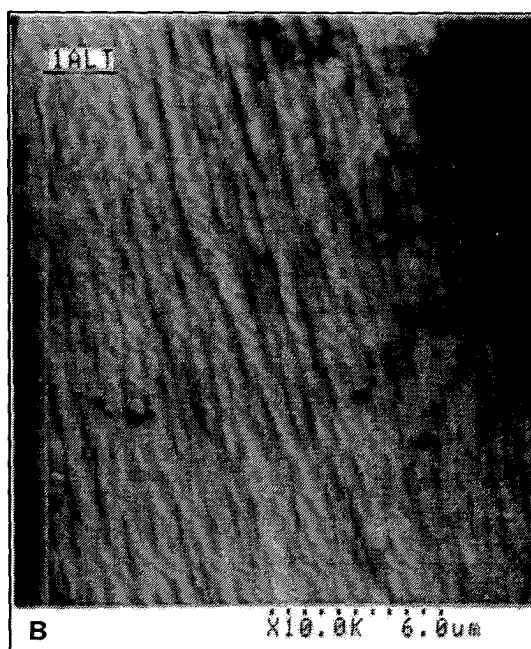
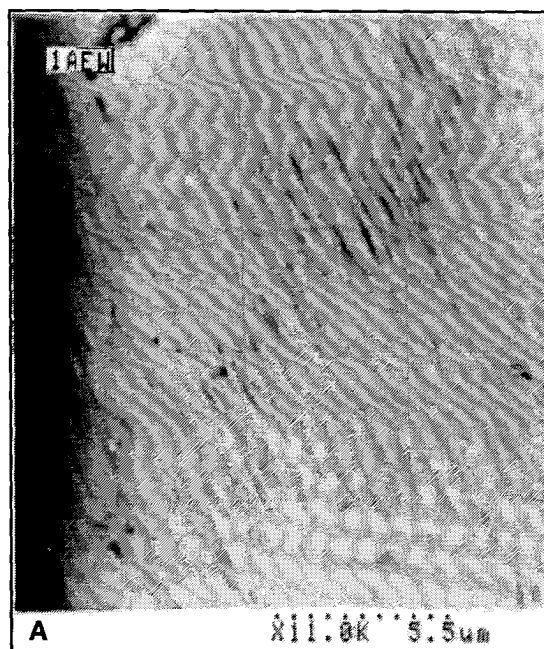


Figura 15. (A) sección radial del leño temprano y (B) sección radial del leño tardío del árbol N°1 vistas con el microscopio electrónico, donde se observa la formación de pequeñas grietas inducidas en la pared secundaria, que siguen la orientación de las microfibrillas.

La estrecha relación entre la orientación de las grietas y la de las microfibrillas hacen de esta técnica de medición más versátil, pudiendo ser aplicada además de las coníferas, en las especies latifoliadas (Senft y Bendtsen, 1985).

Las observaciones de la ultraestructura de la pared, particularmente de la capa S₂ de la pared secundaria muestran una clara orientación de las microfibrillas, logrando alcanzar adecuadas áreas de medición en las paredes radiales, fuera de los campos de cruce y de las áreas de agrietamientos (Figura 16). Un mayor ángulo de inclinación se observó en las zonas de leño temprano cerca de la médula en comparación a las zonas de leño tardío cerca de la corteza.



T.F.C.

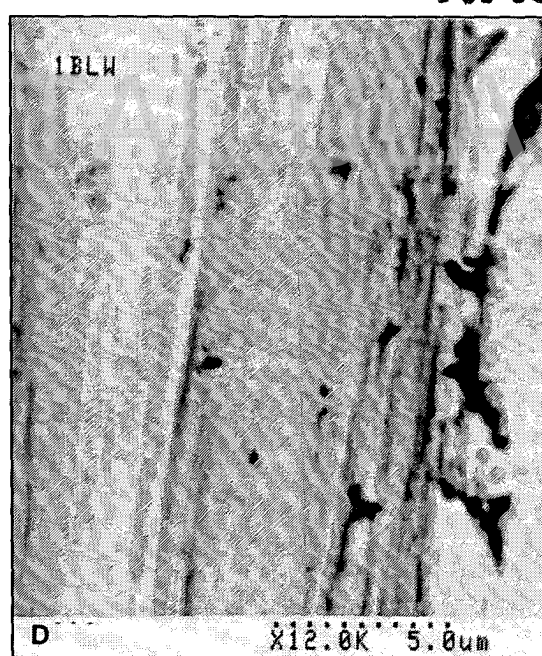
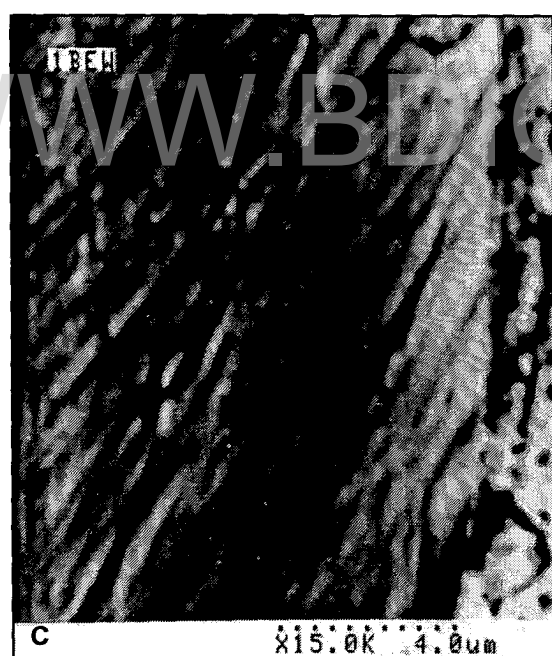
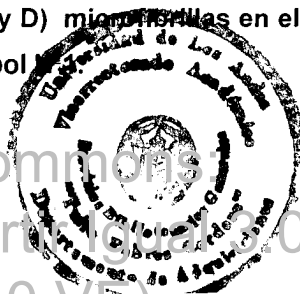


Figura 16. Orientación de las microfibrillas en la capa S_2 de la pared celular vistas con el microscopio electrónico. (A y B) secciones radiales de las microfibrillas en el leño temprano y tardío respectivamente, cerca de la médula en el árbol 1. (C y D) microfibrillas en el leño temprano y tardío respectivamente, cerca de la corteza en el árbol 1.



Mediante el empleo del microscopio óptico se evidenció la estrecha relación que existe entre la orientación de las punteaduras y las grietas inducidas en la pared celular (Figura 17). La rápida contracción debido al estrés de secado al cual se sometieron las muestras, causó agrietamientos en la pared celular particularmente en las aberturas de las punteaduras de cruce y de las punteaduras areoladas de las traqueidas. En ambas zonas se observó que las grietas tienen una inclinación muy similar a la de las punteaduras.

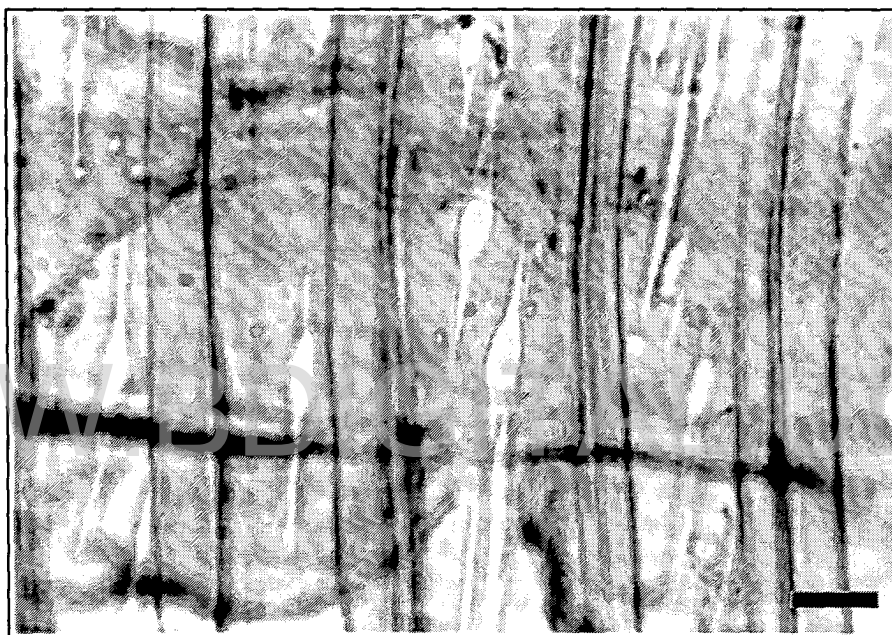


Figura 17. Sección radial de las traqueidas del leño tardío cerca de la corteza (árbol N°2), en donde se observa una inclinación de las punteaduras muy similar a la de las grietas inducidas en la pared celular. Barra = 10 μ m.

Adicionalmente, la orientación de las grietas en la pared celular se observó de manera muy uniforme entre las traqueidas examinadas, su grado de inclinación varió de acuerdo al tipo de madera examinado y al tipo de madera en un anillo de crecimiento (Figura 18).

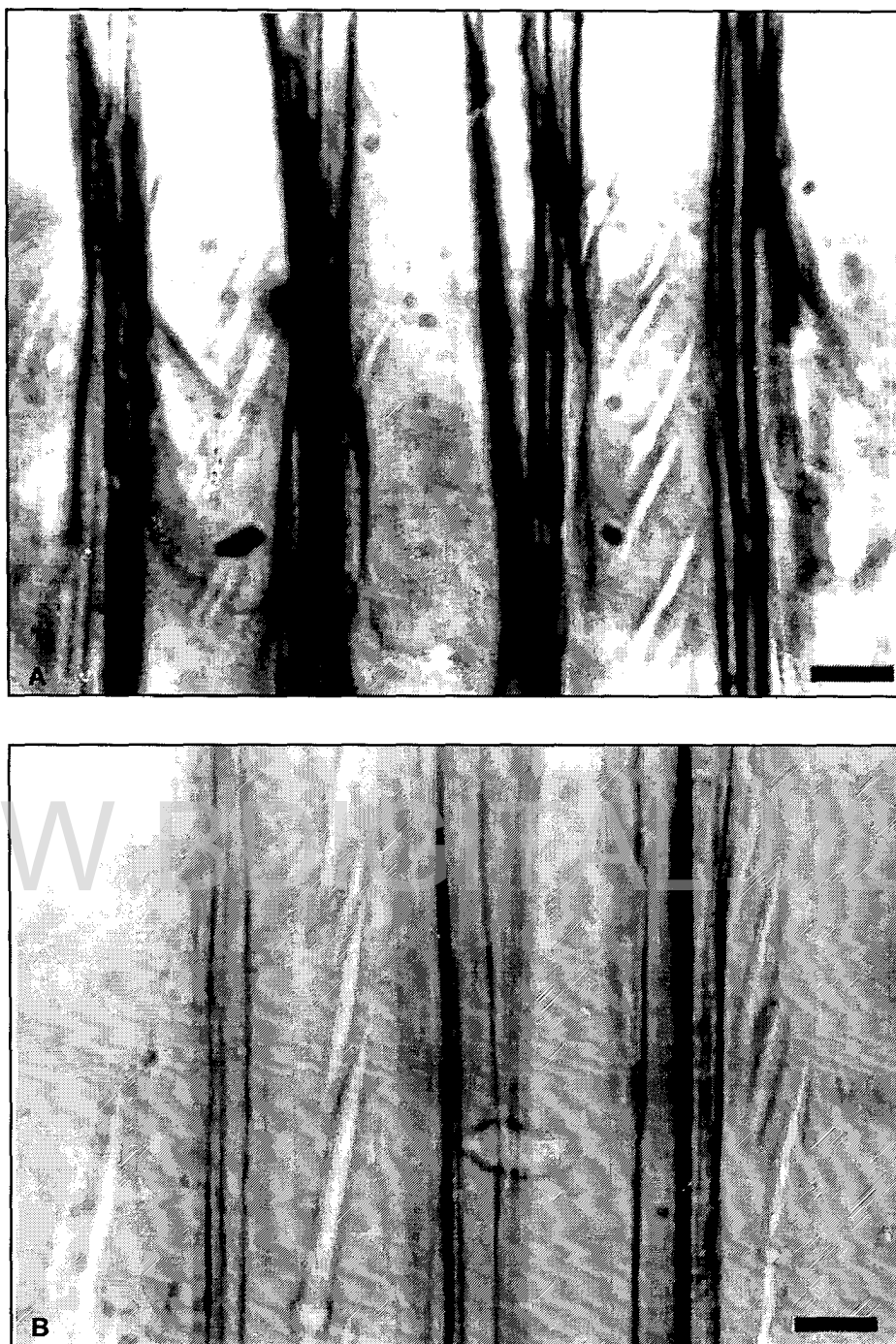


Figura 18. (A) sección radial de las traqueidas del leño temprano cerca de la médula (árbol N°2) y (B) sección radial de las traqueidas del leño tardío cerca de la corteza (árbol N°1), en donde se observa una inclinación uniforme de las grietas. Barra = 10 μ m.

Las observaciones de las punteaduras en las áreas de cruce muestran también un patrón muy semejante al de las grietas de la pared celular (Figura 19). Sin embargo la orientación de las aberturas de las punteaduras en las zonas de leño temprano de las muestras cercanas a la médula de los árboles resultó más variable en comparación con las muestras cercanas a la corteza de los árboles. Registrándose además, en estas zonas un mayor número de punteaduras por áreas de cruce.

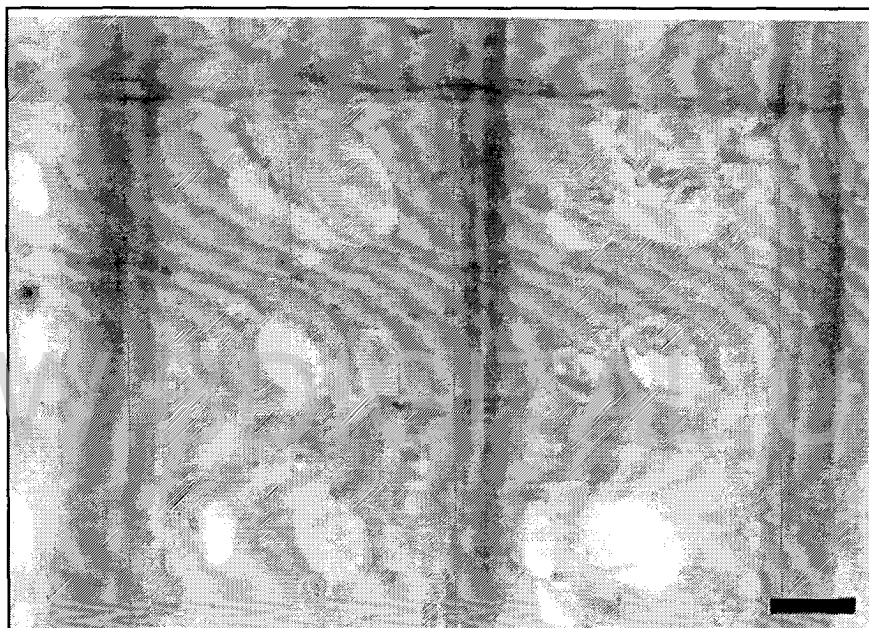
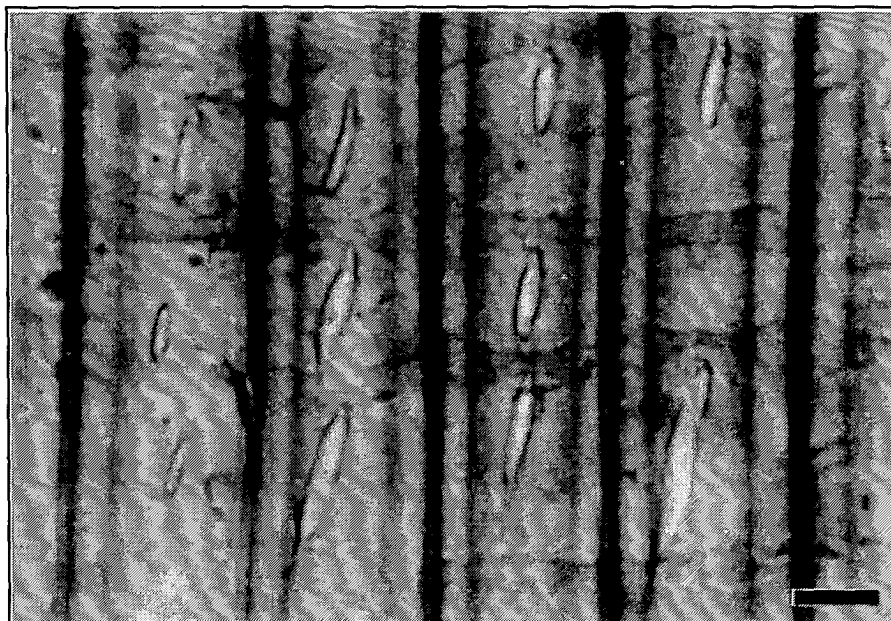


Figura 19. Sección radial de las traqueidas del leño temprano cerca de la corteza (árbol N°2) con mayor variación en la orientación de las punteaduras. Barra = 10 μ m.

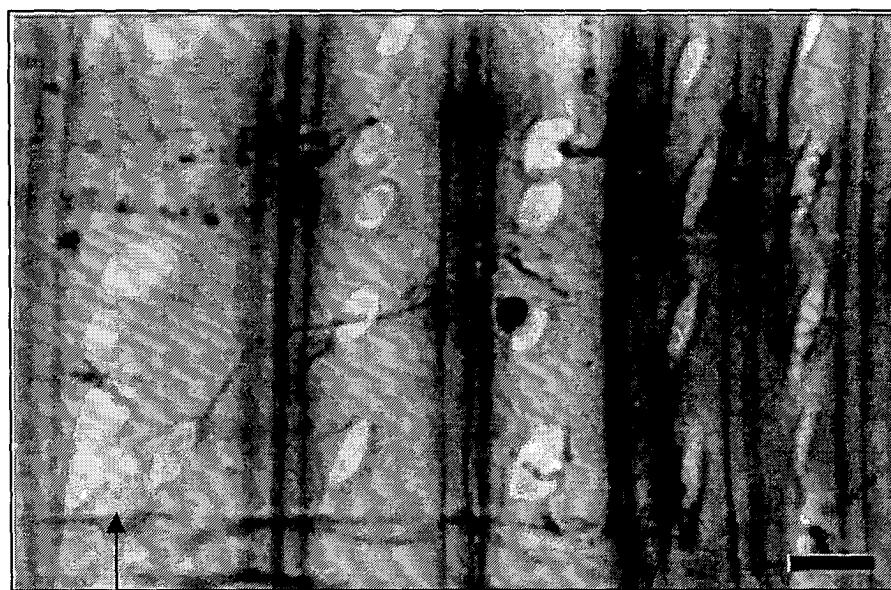
Adicionalmente, la orientación de las punteaduras en las zonas de leño tardío se presentó de forma más uniforme para todas las muestras y un menor número de éstas se presentó por área de cruce (Figura 20).

Figura 20. Sección radial de las traqueidas del leño tardío cerca de la corteza (árbol N°1), con una inclinación más uniforme de las punteaduras. Barra = 10 μm .



Una clara diferencia en la orientación de las aberturas de las punteaduras con respecto al eje vertical de las traqueidas se observó en los límites entre el leño temprano y leño tardío de las muestras examinadas (Figura 21), particularmente en las muestras cercanas a la médula del árbol en donde se registraron las mayores diferencias en el ángulo de inclinación de las aberturas.

Figura 21. Sección radial de las traqueidas del árbol N°2 donde se muestra una indudable diferencia en la orientación de las punteaduras, entre el leño temprano y el tardío. Barra = 10 μm .



Leño temprano

Leño tardío

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

3.- Comparación entre las Técnicas de Medición del Ángulo Microfibrilar

Los resultados del diseño estadístico (Tablas 5 y 6) indican, para los árboles evaluados, que la técnica de medición indirecta del ángulo microfibrilar mediante el empleo de las grietas inducidas en la pared celular (MOG), es la técnica más relacionada con la medición directa del ángulo microfibrilar con el empleo del microscopio electrónico (MES). De acuerdo al análisis de varianza y de la prueba de comparación múltiple de las medias de Bonferroni en siete de los ocho casos evaluados en los dos árboles, no hubo diferencias significativas entre las dos técnicas de medición y en solo un caso hubo una diferencia mínima significativa de 2,176° entre estas técnicas (Árbol N°1. Leño tardío ⇔ Muestra cercana a la corteza). Las dos técnicas de medición muestran un comportamiento muy similar del valor del ángulo microfibrilar, dentro de un anillo de crecimiento y entre la zona cerca de la médula y cerca de la corteza, en ambos árboles evaluados.

Tabla 5. Resultados de análisis de varianza del ángulo microfibrilar y de la prueba de Bonferroni entre las tres técnicas de medición, para el leño temprano y tardío en cada zona de medición en el árbol N°1.

					Comparación Múltiple			
Fuente de Variación	GL	MS	F	P	Técnicas	Promedio	Agrupación de Bonferroni	DMS
Árbol N°1. Leño temprano ⇔ Muestra cerca de la médula								
Técnicas	2	326,80	13,43	0,000 *	MOP	36,492 °	A	3,433 °
Error	132	24,30			MOG	32,119 °	B B	
Total	134				MES	31,858 °	B B	
Árbol N°1. Leño temprano ⇔ Muestra cerca de la corteza								
Técnicas	2	35,30	1,45	0,238 n.s	MOP	26,729 °		
Error	132	24,30			MOG	25,563 °		
Total	134				MES	24,650 °		
Árbol N°1. Leño tardío ⇔ Muestra cerca de la médula								
Técnicas	2	52,79	5,40	0,006 *	MOP	15,967 °	A	2,176 °
Error	132	9,78			MOG	15,818 °	B C	
Total	134				MES	13,088 °	B C	
Árbol N°1. Leño tardío ⇔ Muestra cerca de la corteza								
Técnicas	2	25,93	2,69	0,072 n.s	MOG	10,009		
Error	132	9,65			MOP	9,424		
Total	134				MES	8,069		

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla 6. Resultados de análisis de varianza del ángulo microfibrilar y de la prueba de Bonferroni entre las tres técnicas de medición, para el leño temprano y tardío en cada zona de medición en el árbol N°2.

					Comparación Múltiple			
Fuente de Variación	GL	MS	F	P	Técnicas	Promedio	Agrupación de Bonferroni	DMS
Árbol Nº2. Leño temprano ⇔ Muestra cerca de la médula								
Técnicas	2	725,1	46,24	0,000 *	MOP	40,452 °	A	2,756 °
Error	132	15,7			MOG	34,096 °	B B	
Total	134				MES	33,047 °	B B	
Árbol Nº2. Leño temprano ⇔ Muestra cerca de la corteza								
Técnicas	2	227,4	10,29	0,000 *	MOP	26,707 °	A	3,272 °
Error	132	22,1			MOG	23,080 °	B B	
Total	134				MES	22,765 °	B B	
Árbol Nº2. Leño tardío ⇔ Muestra cerca de la médula								
Técnicas	2	136,0	10,70	0,000 *	MOP	27,913 °	A	2,481 °
Error	132	12,7			MOG	25,236 °	B B	
Total	134				MES	24,507 °	B B	
Árbol Nº1. Leño tardío ⇔ Muestra cerca de la corteza								
Técnicas	2	25,53	2,64	0,075 n.s	MOP	10,661 °		
Error	132	9,69			MOG	10,339 °		
Total	134				MES	8,603 °		

Leyenda: GL = grados de libertad

F = estadístico de prueba para $\alpha = 0,05$

n.s = diferencia no significativa

DMS = diferencia mínima significativa

MS = cuadrado medio

P = probabilidad calculada

(*) Diferencia significativa = $P < 0,05$

La técnica de medición empleando la inclinación de las aberturas de la punteaduras de acuerdo a los resultados del análisis de varianza y de la prueba de comparación de las medias de las técnicas, es la menos relacionada con la técnica directa de medición (MES). Sin embargo, en tres de los ocho casos examinados, no existen diferencias significativas entre estas técnicas y en los cinco casos restantes las diferencias mínimas significativas no son superiores de 3,312°, sobrestimando en esta cantidad el ángulo microfibrilar con respecto a la técnica más precisa (MES) en este estudio.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Considerando que entre la madera juvenil y la adulta la diferencia en el ángulo microfibrilar de la capa S_2 puede ser superior a 20° , la diferencia estadística obtenida en los resultados, en la práctica es de poca influencia e importancia si se trata de diferenciar entre ambos tipos de leño o clases de madera (Ying, Kretschmann y Bendtsen, 1994).

Adicionalmente, el test de comparaciones múltiples muestra que los valores más altos en la diferencia mínima significativa (DMS), corresponden al leño temprano de todas las zonas evaluadas, en donde además se registraron las mayores variaciones en las mediciones (Tablas 3 y 4), debido al menor orden de orientación de las microfibrillas en este leño con respecto al eje longitudinal de la traqueidas, en comparación con el leño tardío, en donde las microfibrillas muestran un arreglo más paralelo al eje de las traqueidas.

4.- Trayectoria del Ángulo Microfibrilar dentro de un Anillo de Crecimiento

Los valores obtenidos del ángulo de orientación de las microfibrillas en el leño temprano son mayores comparados con los valores del leño tardío, para todas las muestras estudiadas y analizadas por las tres diferentes técnicas microscópicas, en ambos árboles (Figuras 22 y 23). Los resultados estadísticos del diseño de bloques aleatorizados arrojaron diferencias altamente significativas, para las tres técnicas de medición dentro de un anillo de crecimiento (Tablas 7, 8 y 9). Las traqueidas del leño temprano presentan un ángulo microfibrilar muy grande, mientras que aquellas del leño tardío presentan sus microfibrillas bastante paralelas al eje de la célula. Las diferencias observadas dentro de un anillo de crecimiento están de acuerdo con otros trabajos reportados en la literatura para otras especies (Cave y Walker, 1994; Herman et al. 1999; Panshin y De Zeeuw, 1980).

Tabla 7. Resultados del análisis de varianza para las mediciones directas (MES) del ángulo microfibrilar, dentro de una anillo de crecimiento (leño temprano y tardío) y entre las zonas de medición (cerca de la médula y cerca de la corteza), para el árbol N°1 y 2.

Árbol N°1. Medición directa del ángulo microfibrilar (MES)				
Fuente de Variación	GL	MS	F	P
Anillo de crecimiento	1	4686,3	715,99	0,000 *
Zona de medición	1	560,6	85,65	0,000 *
Error	57	6,5		
Árbol N°2. Medición directa del ángulo microfibrilar (MES)				
Fuente de Variación	DF	MS	F	P
Anillo de crecimiento	1	1932,7	143,75	0,000 *
Zona de medición	1	2571,1	191,24	0,000 *
Error	57	13,4		

(*) Diferencia significativa = $P < 0,05$

Tabla 8. Resultados del análisis de varianza para las mediciones indirectas del ángulo microfibrilar, con el uso de las grietas inducidas en la pared celular (MOG) dentro de una anillo de crecimiento (leño temprano y tardío) y entre las zonas de medición (cerca de la médula y cerca de la corteza), para el árbol N°1 y 2.

Árbol N°1. Medición indirecta del ángulo microfibrilar (MOG)				
Fuente de Variación	DF	MS	F	P
Anillo de crecimiento	1	15134,3	1814,45	0,000 *
Zona de medición	1	2260,4	271,0	0,000 *
Error	57	8,3		
Árbol N°2. Medición indirecta del ángulo microfibrilar (MOG)				
Fuente de Variación	DF	MS	F	P
Anillo de crecimiento	1	6999,2	790,00	0,000 *
Zona de medición	1	10071,6	1136,79	0,000 *
Error	57	8,9		

(*) Diferencia significativa = $P < 0,05$

Tabla 9. Resultados del análisis de varianza para las mediciones indirectas del ángulo microfibrilar, con el uso de las punteaduras en el área de cruce (MOP), dentro de una anillo de crecimiento (leño temprano y tardío) y entre las zonas de medición (cerca de la médula y cerca de la corteza), para el árbol N°1 y 2.

Árbol N°1. Medición indirecta del ángulo microfibrilar (MOP)				
Fuente de Variación	DF	MS	F	P
Anillo de crecimiento	1	21466	745,77	0,000 *
Zona de medición	1	3988	138,56	0,000 *
Error	57	29		
Árbol N°2. Medición indirecta del ángulo microfibrilar (MOP)				
Fuente de Variación	DF	MS	F	P
Anillo de crecimiento	1	12256	518,10	0,000 *
Zona de medición	1	14413	609,25	0,000 *
Error	57	24		

(*) Diferencia significativa = $P < 0,05$

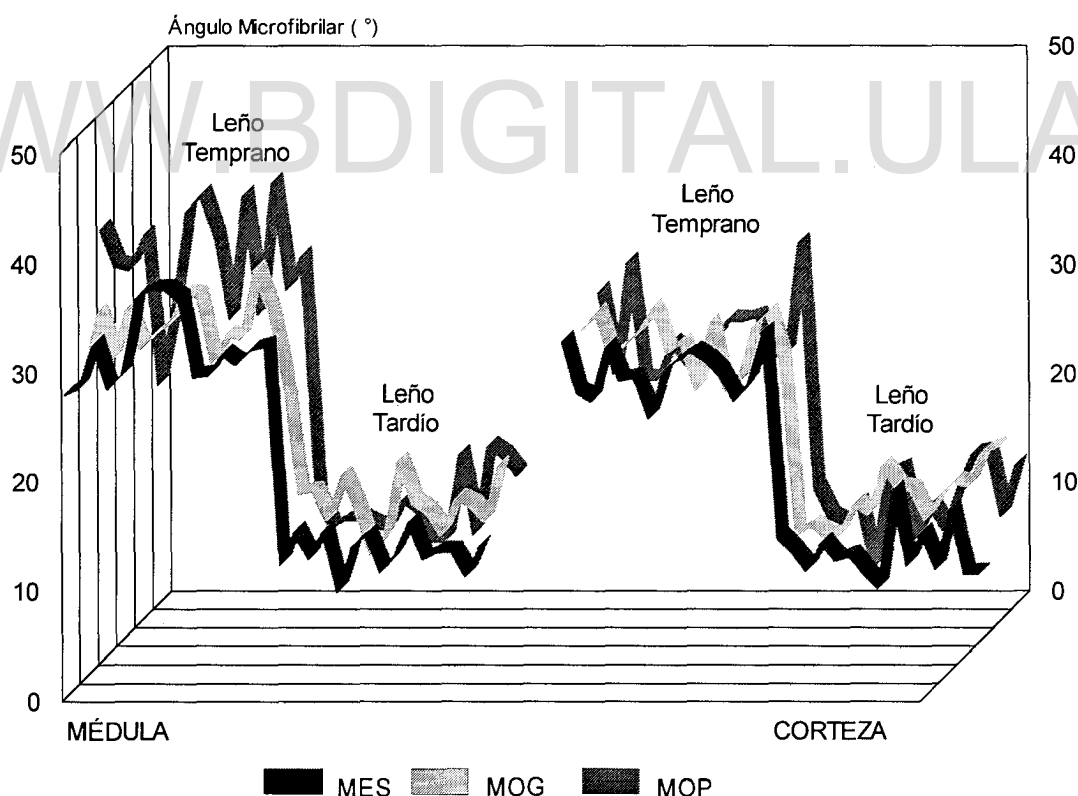
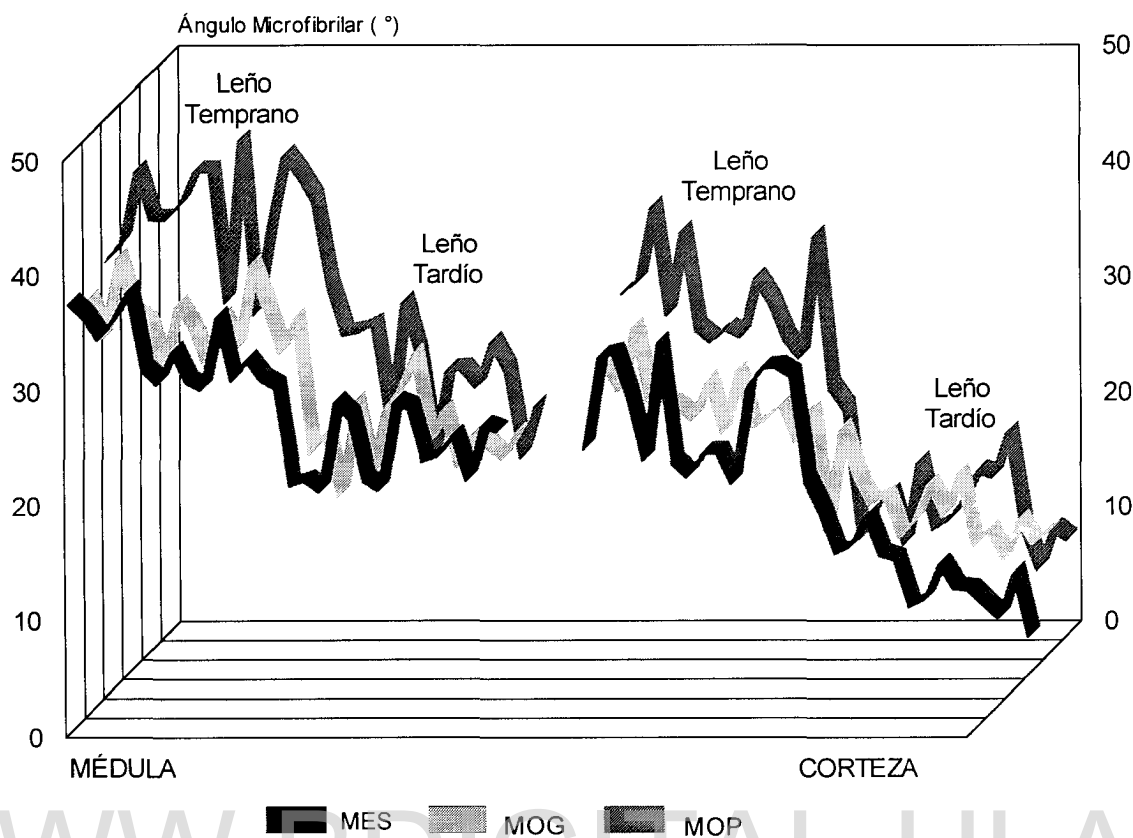


Figura 22. Comparación del ángulo microfibrilar entre las técnicas de medición, dentro de los anillos de crecimiento y desde la zona cercana a la médula a la zona cercana a la corteza, para el árbol N°1



Leyenda: MES: medición del ángulo microfibrilar con el microscopio electrónico.

MOP: medición del ángulo de orientación de las punteaduras con el microscopio óptico.

MOG: medición del ángulo de orientación de las grietas con el microscopio óptico.

Figura 23. Comparación del ángulo microfibrilar entre las técnicas de medición, dentro de los anillos de crecimiento y desde la zona cercana a la médula a la zona cercana a la corteza, para el árbol N°2.

5.- Trayectoria del Ángulo Microfibrilar desde la Zona Cerca de la Médula a la Zona Cerca de la Corteza.

Una clara disminución del ángulo microfibrilar se observó desde las muestras tomadas cerca de la médula a las muestras tomadas cerca de la corteza o zona cambial, por las tres técnicas de medición utilizadas en ambos árboles examinados (Figuras 22 y 23). Los resultados del análisis estadístico entre estas

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

zonas de medición, arrojaron diferencias altamente significativas en la evaluación del ángulo microfibrilar para las tres técnicas de medición (Tablas 7, 8 y 9). Este comportamiento del ángulo microfibrilar es debido a la presencia de madera juvenil en el centro del árbol, en donde el ángulo microfibrilar es mayor, disminuyendo luego progresivamente a medida que el cambium vascular del árbol madura, lo que implica una producción de madera adulta (Cave y Walker, 1994; Donaldson, 1996; Panshin y De Zeeuw, 1980). De forma similar a la variación del ángulo microfibrilar dentro de un anillo de crecimiento, desde la médula a la corteza las tres técnicas muestran un comportamiento paralelo.

6.- Significado Práctico de la Medición del Ángulo Microfibrilar por Medio de las Técnicas Indirectas

Las técnicas indirectas de medición representan una oportunidad de conocer la calidad de la madera de pino caribe, por medio de la delimitación del material o madera juvenil con un elevado ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S_2 , lo cual implica una relación inversa o negativa con las propiedades de resistencia y la edad, así como una relación lineal o positiva con la contracción longitudinal de la madera. Por lo tanto, puede predecirse una correlación que permita la estimación de estos parámetros a través de la medición del ángulo microfibrilar, considerando la edad de los árboles.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran además, una variación muy similar del ángulo microfibrilar desde la médula a la corteza en comparación a los valores reportados en otros trabajos, con diferentes técnicas de medición y diferentes especies de coníferas (Tabla 10). Una clara disminución gradual del ángulo microfibrilar se observa desde la madera cercana a la médula, a la madera cercana a la corteza, como función de la edad del árbol.

Tabla 10. Valores promedios del ángulo microfibrilar para diferentes especies de coníferas medido por diferentes técnicas, desde la médula a la corteza.

Especie	Técnica de medición	Anillo	AM (°)	Fuente
Pino Radiata (<i>Pinus radiata</i>)	Difracción de rayos X	1	43	Donaldson, 1996.
		15	32	
Norway Spruce (<i>Picea abies</i>)	Difracción de rayos X	5	28	Saranpää et al., 1998.
		20	12	
Sugi (<i>Cryptomeria japonica</i>)	Óptico. Aberturas de las punteaduras	2	50	Hirakawa et al., 1998.
		20	20	
Loblolly Pine (<i>Pinus taeda</i>)	Óptico. Inducción de grietas	1	35	Lu Ying y Kreschmann y Bendsen, 1994.
		13	19	
Pino Caribe (<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>) <u>Árbol N°1.</u>	Microscopio electrónico	4	22,5	Valores promedios del ángulo microfibrilar en cada anillo de crecimiento, para las tres técnicas de medición ensayadas en este estudio.
		17	16,4	
	Óptico. Inducción de grietas	4	23,9	
		17	17,8	
	Óptico. Aberturas de las punteaduras.	4	26,2	
		17	18,1	
Pino Caribe (<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>) <u>Árbol N°2.</u>	Microscopio electrónico	1	28,8	
		16	15,7	
	Óptico. Inducción de grietas	1	29,7	
		16	16,7	
	Óptico. Aberturas de las punteaduras.	1	34,2	
		16	18,7	

Leyenda: Anillo = Posición del anillo de crecimiento desde la médula.

AM = Ángulo microfibrilar promedio entre leño temprano y tardío de las muestras estudiadas.

VII.- CONCLUSIONES

Existe en la especie *Pinus caribaea* Mor. var. *hondurensis* Barr. una evidente relación entre la orientación de las aberturas de las punteaduras y la orientación de las grietas inducidas en la pared celular, con la orientación de las microfibrillas de la capa S₂.

Las técnicas de medición indirecta representan una vía rápida y efectiva para estimar la variación del ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S₂ de la pared celular. La apreciable precisión con respecto al valor verdadero del ángulo microfibrilar, la fácil lectura o medición y preparación de las muestras, así como la simplicidad y disponibilidad de los equipos, son las principales ventajas de estas técnicas de medición sobre las técnicas directas de medición.

Entre las técnicas de estimación indirecta del ángulo de orientación de las microfibrillas en la capa S₂, de la pared secundaria de las traqueidas de la madera de pino caribe, el método de inducción de grietas en la pared celular es el de mayor precisión. Una clara diferenciación entre el leño temprano y el tardío y entre la madera juvenil y la madera cerca de la corteza puede lograrse mediante el empleo de esta técnica.

Tomando en consideración que entre el leño juvenil y el adulto puede existir una variación superior a 20° (Cave y Walker, 1994; Lu Ying, Kretschmann y Bendsen, 1994), en la práctica una diferencia estadística cercana a los 3°, obtenida entre la técnica de medición de la orientación de las aberturas de las punteaduras y el valor de la medición del microscopio electrónico, es de poca importancia si se busca establecer o delimitar el leño juvenil del adulto.

El comportamiento de las técnicas de medición microfibrilar indirectas (MOG y MOP), evaluadas en las diferentes zonas de medición, mostraron un patrón similar a la medición directa (MES), detectando las variaciones del ángulo microfibrilar

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

dentro de los anillos de crecimiento y entre la madera cerca de la médula y cerca de la corteza.

El leño tardío y las zonas cercanas a la corteza presentan los menores ángulos de orientación de las microfibrillas y la menor variación entre las mediciones debido a un mayor arreglo de las microfibrillas en estas zonas en comparación con el resto.

VIII.- RECOMENDACIONES

Una apreciable disminución en tiempo y en costos de medición puede ser obtenida, incorporando o adaptando en el ocular del microscopio óptico una escala de medición angular, evitando así la necesidad de tomar fotomicrografías a varias secciones, para luego mediante el programa de diseño calcular el ángulo microfibrilar. Aunque esta variante en la metodología disminuiría drásticamente los tiempos y costos de medición, se obtiene también una menor exactitud del ángulo real, pero ésta puede ser compensada aumentando el número de mediciones.

Para obtener en el campo la variación del ángulo microfibrilar es recomendable emplear la técnica de medición de la orientación de las aberturas de las punteaduras, la cual es más versátil, considerando que las secciones pueden ser preparadas a mano alzada evitando así el uso del micrótopo.

Es indispensable realizar un estudio de variabilidad completo de la madera de pino caribe, que incluya la medición del ángulo microfibrilar de la capa S_2 , por medio de las técnicas de medición indirectas, en diferentes anillos de crecimientos desde la médula a la corteza y a distintas alturas del árbol.

Para establecer una clara identificación del tipo y calidad de la madera es recomendable realizar ensayos de correlación, entre el ángulo microfibrilar (obtenido por cualquiera de las técnicas de mediciones indirectas), con las pruebas de resistencias de la madera y con la contracción longitudinal.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Estableciendo luego, formulas de regresión múltiple que permitan conocer rápidamente los valores de resistencias y de contracción longitudinal aproximados, empleando la simple medición del ángulo microfibrilar como indicador.

Se recomienda ensayar la técnica de medición de la orientación de las grietas, inducidas en la pared celular en especies de latifoliadas.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

IX.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Butterfield, B.G. 1998. Preface. Microfibril Angle in Wood. In: Butterfield, B.G. (Ed.), Microfibril Angle in Wood. Proceeding of the IUFRO/IAWA International Workshop on the Influence of Microfibril Angle to Wood Quality (pp. 11-12). University of the Canterbury Printers. Canterbury, New Zealand.

Cave, I.D. & J. Walker. 1994. Stiffness of Wood in Fast-grown Plantation Softwoods : the influence of microfibril angle. Forest Product Journal. 44(5):43-48.

Cave, I.D. & W. Robinson. 1998. Measuring Microfibril Angle Distribution in the Cell Wall by Means of X-Ray Diffraction. In: Butterfield, B.G. (Ed.), Microfibril Angle in Wood. Proceeding of the IUFRO/IAWA International Workshop on the Influence of Microfibril Angle to Wood Quality (pp. 108-115). University of the Canterbury Printers. Canterbury, New Zealand.

Donaldson, L.A. 1991. The Use of Pit Apertures as Windows to Measure Microfibril Angle in Chemical Pulp Fibers. Wood and Fiber Science.23(2):290-295.

Donaldson, L.A. 1996. Effect of Physiological Age and Site on Microfibril Angle in *Pinus radiata*. IAWA Journal.17(4):421-429.

Haygreen, G. & L. Bowyer. 1994. Forest Products and Wood Science. Second Edition. Iowa State University Press / Ames. USA.

Herman, M.; P. Dutilleul & T. Shaw-Avella. 1999. Growth Rate on Intra-ring and Inter-ring Trajectories of Microfibrillar Angle in Norway Spruce (*Picea abies*). IAWA Journal. 20 (1):3-21.

Hirakawa, Y.; K. Yamashita; Y. Fujisawa; R. Nakada & Y. Kijidani. 1998 The Effects of S₂ Microfibril Angle and Density on MOE in Sugi Tree Logs. In: Butterfield, B.G. (Ed.), Microfibril Angle in Wood. Proceeding of the IUFRO/IAWA International Workshop on the Influence of Microfibril Angle to Wood Quality (pp. 312-322). University of the Canterbury Printers. Canterbury, New Zealand.

Hisashi, A.; J. Ohtani & K. Fukazawa . 1991. FE-SEM Observations on the Microfibrillar Orientation in the Secondary Wall of Tracheids. IAWA Bulletin. 12(4)-431-438.

Hisashi, A.; J. Ohtani & K. Fukazawa . 1992. Microfibrillar Orientation of the Innermost Surface of Conifer Tracheid Walls. IAWA Bulletin. 13(4):411-417.

Huang, C. 1995. Revealing Fibril Angle in Wood Sections by Ultrasonic Treatment. Wood and Fiber Science. 27(1): 49-54.

Huang, C.; P.N. Kutscha; G.J. Leaf & R.A Megraw, 1998. Comparison of Microfibril Angle Measurement Techniques. In: Butterfield, B.G. (Ed.), Microfibril Angle in Wood. Proceeding of the IUFRO/IAWA International Workshop on the Influence of Microfibril Angle to Wood Quality (pp. 177-205). University of the Canterbury Printers. Canterbury, New Zealand.

Jozsa, L.A. & G.R. Middleton. 1999. Discussion of Wood Quality Attributes and Their Practical Implications. [ONLINE]. Available: [http://www. Lumber.com/grading/woodquality.html](http://www.Lumber.com/grading/woodquality.html). [1999, May 20].

Krestschmann D.; H. Alden & S. Verrill. 1998. Variations of Microfibril Angle in Loblolly Pine: Comparison of Iodine Crystallization and X-Ray Diffraction Techniques. In: Butterfield, B.G. (Ed.), Microfibril Angle in Wood. Proceeding of the IUFRO/IAWA International Workshop on the Influence of Microfibril

Angle to Wood Quality (pp. 157-176). University of the Canterbury Printers. Canterbury, New Zealand.

Logan, J. D. 1999. Sensitivity to Fundamental Wood Properties in the Metriguard Model 7200 HCLT. [ONLINE]. Available:<http://www.Lumber.com/grading/MSR.Lumber> [1999, May 20].

Lotfy M.; M. El-Osta; R.W. Wellwood & R.G. Butters 1972. A Mechanistic Approach to Crystallite Length as Related to Cell-Wall Structure. Wood and Fiber. 6(1):36-45.

Mark R. E. 1981. Molecular and Cell Wall Structure of Wood. In: F.F. Wangaard (Ed.), Wood, Its Structure and Properties (pp. 43-100). State University of New York.

Mendenhall W. & T. Sincich. 1997. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. 4th. Edition, Prentice-Hall Hispanoamérica, S.A. México.

Meylan B.A. & M.C. Probine. 1969. Microfibril Angle as a Parameter in Timber Quality Assessment. Forest Product Journal. 19(4):30-34.

Nilsson T. 1981. Helical Orientation of the Microfibril in Fibres of *Mastixiodendron pachyclados* (K. Schum) Melch. IAWA Bulletin n.s, Vol.(2)4:186.

Ninin, L. 1993. La Anatomía de la Madera y la Resolución de Problemas Tecnológicos. Revista Forestal Venezolana.(37):107-116.

Panshin, A.J. & C. De Zeeuw. 1980. Textbook of Wood Technology, 4th. Edition. McGraw-Hill Series in Forest Resources. McGraw Hill Book Company, New York.

Saranpää P. ; R. Serimaa; S. Andersson; E. Pesonen; T. Suni & T. Paakkari.

1998. Variation of Microfibril Angle of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) – Comparing X-ray Diffraction and Optical Methods. In: Butterfield, B.G. (Ed.), Microfibril Angle in Wood. Proceeding of the IUFRO/IAWA International Workshop on the Influence of Microfibril Angle to Wood Quality (pp. 240-252). University of the Canterbury Printers. Canterbury, New Zealand.

Senft, F.J. & B.A. Bendtsen. 1985. Measuring Microfibrillar Angles Using Light Microscopy. *Wood and Fiber Science*. 17(4):564-567.

Shupe, T.F.; E.T. Choong; D. Stokke & M. Gibson. 1996. Variation in Cell Dimensions and Fibril Angle for Two Fertilized Even-Aged Loblolly Pine Plantations. *Wood and Fiber Science*. 28:268-275.

Sirviö J. & P. Kärenlampi. 1998. Pits as Natural Irregularities in Softwood Fibers. *Wood and Fiber Science*. 30(1):27-39.

Ying Lu; D. Kretschmann & A. Bendtsen. 1994. Longitudinal Shrinkage in Fastgrown Loblolly Pine Plantation Wood. *Forest Product Journal*. 44(1):58-62.

Zobel, B.J. & J.P. Van Buijtenen. 1989. *Wood Variation: It Causes and Control*. Springer-Verlag, Berlin.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)