

**FRACTURAS EN MADERA DE *EUCALYPTUS NITENS*:
EFECTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A NIVEL ULTRAESTRUCTURAL
Y DE LA ANATOMÍA CELULAR**

**FRACTURE IN *EUCALYPTUS NITENS* WOOD: EFFECT OF NANOMECHANICAL
PROPERTIES, ULTRASTRUCTURE AND ANATOMICAL LEVEL**

Paulina Valenzuela C.^{1*}, Cecilia Bustos A.², Jean Pierre Lasserre³, William Gacitúa E.²

RESUMEN

Se realizó un estudio para indagar en las causas y posibles factores que originan la fractura en la estructura de la madera de *Eucalyptus nitens*. Para esto se examinó el comportamiento nanomecánico de la lamela media (LM), de las capas S1 y S2 de la pared celular. También se determinaron el número, área y diámetro de los vasos que están asociados a niveles de agrietamiento extremos (alto y bajo). Se estudiaron dos familias de *Eucalyptus nitens* procedentes de dos sitios de la 8^{va} Región de Chile. Mediante el cálculo y análisis de la razón de ductilidad (E/H), se determinó que la LM es más quebradiza que la capa S1, y ésta a su vez más quebradiza que la capa S2; existiendo diferencias significativas en la ductilidad de estas capas. La LM y capa S1 se comportan como materiales resilientes, no así la capa S2. La diferencia en el módulo de resiliencia se relacionó con las mayores tensiones de corte que se presentaron en las interfaces LM/S2 y S1/S2. La caracterización de los vasos mostró que la familia con nivel de agrietamiento mayor, tiene mayor frecuencia, área y diámetro de vasos, los cuales contribuyen a la concentración de esfuerzos en la estructura celular de la madera. Los resultados evidenciaron que la capa S1 fue más débil que la capa S2 y LM dada la diferencia en resistencia entre ellas y que complementado con las tensiones internas que se generan en el proceso de crecimiento del árbol se producen las microgrietas.

Palabras claves: *Eucalyptus nitens*, nanoindentaciones, propiedades nanomecánicas, anatomía de la madera, fracturas de la madera.

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the causes and posibles factors related to fractures in the cellular structure in *Eucalyptus nitens*. Nanomechanical cell wall properties at the middle lamella level (ML), S1 and S2 layers were evaluated. In addition, the area, and diameter of vessels were measured. These parameters were associated with extreme levels of cracking (high and low) in two *Eucalyptus nitens* families. The samples were taken from two sites of the 8th Region of Chile. The analysis of the ductility ratio (E/H) demonstrated that the ML is more brittle than the S1 layer; and the S1 is more brittle than S2 layer. The ML and S1 layer behave like resilient materials, but not the S2 layer. The difference in the modulus of resilience was related to higher shear stresses at the ML/S2 and at S1/S2 interfaces. The characterization of the vessels showed that the families with greater level of cracking have also lower frequency and greater area and diameter of vessels. The S1 layer was

¹ M. Sc., Ingeniero Civil en Industrias Forestales, Depto. Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería, Centro de Biomateriales y Nanotecnología (CBN). Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. nvalenzu@ubiobio.cl

² Profesor Asociado, Depto. Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería, Centro de Biomateriales y Nanotecnología (CBN). Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

³ CMPC Forestal Mininco S.A., Concepción. Chile.

Autor correspondencia: *nvalenzu@ubiobio.cl

Recibido: 06.09.2011 Aceptado: 24.03.2012

weaker than S2 layer and LM due to their difference in resistance between them and combined with the internal stresses might propagate the microcracks.

Keywords: *Eucalyptus nitens*, nanoindentations, nanomechanical properties, wood anatomy, wood cell fracture.

INTRODUCCIÓN

Las grietas en la madera de *Eucalyptus nitens* han sido un problema en la industria Chilena debido a la disminución en el rendimiento y en la producción de madera. Las grietas se producen por tensiones internas que se desarrollan durante el crecimiento del árbol (Smith 2003, INFOR 2004). Para disminuir este problema se han investigado diferentes factores que pueden afectar en la formación de estas grietas, y también se ha aplicado en el mejoramiento genético para obtener madera de calidad según las necesidades de las industrias.

Las grietas se manifiestan en la madera a nivel de la ultraestructural, debido a la fracturas que ocurren entre las capas de la pared celular (Putoczki *et al.* 2007, Gacitúa *et al.* 2007, Donaldson 1995, Coté y Hanna 1983). Estas fracturas o microgrietas han sido clasificadas en tres tipos: Fracturas que ocurren entre las células a nivel de la lamela media (LM) separando las células adyacentes; fracturas en la pared celular o dentro de la pared secundaria, generalmente en la interfase S1/S2 y fracturas en la pared celular o ruptura completa de la pared, incluyendo todas las capas (Putoczki *et al.* 2007, Smith *et al.* 2003, Zink *et al.* 1994, Côté y Hanna 1983). Putoczki *et al.* (2007) mencionan que las fracturas se producen por la diferencia que existe entre los módulos de elasticidad, o por diferencias en la resistencia de los componentes de la pared celular. Por el contrario, Donaldson (1995) relaciona la formación de fracturas con la distribución de lignina en las diferentes capas de la pared celular. La lignina se concentra en mayor cantidad en la lamela media, incluyendo la pared primaria (Bodig y Jayne 1982), variando entre 75 a 85 % en maderas duras y entre 65 a 75 % en maderas blandas.

Una técnica utilizada y útil para el estudio de las propiedades mecánicas a nivel ultraestructural de la madera es la nanoindentación. Esta técnica ha sido utilizada en diversos estudios para diferentes especies de madera tanto en coníferas (Xing *et al.* 2009, Tze *et al.* 2007, Gindl y Schöberl 2004, Wimmer y Lucas 1997) como en latifoliadas (Wu *et al.* 2009, Gacitúa *et al.* 2007). Algunas de las propiedades mecánicas que se pueden obtener en base a la nanoindentación son por ejemplo, el módulo de elasticidad, dureza, módulo de resiliencia, diferencia en el módulo de resiliencia, y la razón de ductilidad (E/H). Esta última se asocia a materiales quebradizos cuando su valor es bajo, y a materiales dúctiles cuando es alto (Bolshakov y Pharr 1998). El cálculo de la razón de ductilidad permite conocer si la lamela media es más quebradiza que la capa S2 de la pared celular en madera de *Eucalyptus nitens* (Valenzuela 2011). Por lo que, las microgrietas se propagarían sin mayor resistencia por las zonas menos dúctiles que corresponden a la lamela media y capa S1 (Gacitúa *et al.* 2007).

La variabilidad de la madera en su anatomía influye en la naturaleza de las grietas (Valenzuela 2011, Coté y Hanna 1983). Así, en las latifoliadas la presencia de vasos puede afectar la aparición de grietas, principalmente la geometría, el área, el diámetro y la frecuencia de éstos, que generan discontinuidades en la madera concentrando esfuerzos en esas zonas. El máximo esfuerzo tangencial ocurre en el borde del vaso y lo largo de éste, desde el centro hacia el borde de éste (Sanford 2003). Estos esfuerzos se generan por tensiones internas durante el crecimiento del árbol. Los esfuerzos son mayores en la dirección tangencial que en la dirección radial (Vignote *et al.* 1996).

Los vasos se encuentran en mayor cantidad y con mayor diámetro en la madera de primavera con respecto a la madera de verano (Sjöström 1993, Hägglund 1951). En ensayos de esfuerzo tangencial se ha observado que el plano de fractura avanza por los vasos en madera de primavera, en los cuales

las paredes son delgadas y los lúmenes son grandes (Coté y Hanna 1983). Según algunos autores, las grietas visibles se presentan en la madera de primavera mayormente en la sección perpendicular a los anillos de crecimiento (Gacitúa *et al.* 2007, Putoczki *et al.* 2007, Shelbourne *et al.* 2002, Lausberg *et al.* 1995). Los vasos a menudo se encuentran rodeados de células parenquimáticas que poseen paredes delgadas (Hägglund 1951) y estas condiciones pueden influenciar la propagación de grietas.

El objetivo de este estudio es relacionar las propiedades mecánicas de la pared celular (razón de ductilidad (E/H), módulo de resiliencia (u_r) y diferencia en el módulo de resiliencia (Du_r) y la morfología de los vasos en dos familias-procedencia de *Eucalyptus nitens*, que presentan un alto y un bajo grado de agrietamiento en la madera. Esto con el fin de conocer los factores que influyen en el origen de las fracturas en la estructura celular.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cuatro árboles de *Eucalyptus nitens* de 12 años de edad fueron utilizados en este estudio, correspondientes a dos familias-procedencia, los cuales fueron facilitados por la empresa Forestal Mininco S.A. La clasificación de las familias corresponde a la procedencia de las semillas que se localizan en zonas de Australia y los árboles de cada procedencia fueron generados a partir de un progenitor común (madre). Dos árboles se obtuvieron del fundo de Nihuinco, comuna de Mulchén con suelo arcilloso y árboles sin raleo y los otros dos árboles procedentes del fundo Rucamanqui con suelo trumao, comuna de Yungay con árboles raleados. Estos árboles, de dos familias provenientes de la 8^{va} región del Bío-Bío, poseen distintas características; la familia 2 posee menor nivel de agrietamiento que la familia 6. La elección de estas familias se basó en el estudio de Valenzuela (2011), quienes determinaron que estas familias presentan niveles de agrietamientos extremos.

El porcentaje de grietas de cada árbol fue determinado y relacionado con la razón de ductilidad (E/H) el módulo de resiliencia (u_r) y la diferencia en el módulo de resiliencia (Δu_r) para la LM y para las capas S1 y S2. El número, área y diámetro de vasos también fue determinado.

La medición de grietas en ambas familias se realizó en la mitad de las rodela (semi-rodela), y bajo el supuesto que el comportamiento de las grietas es simétrico en ambas mitades de las rodela. Las rodela se secaron previamente durante 30 días a temperatura ambiente (promedio 20°C) y una humedad relativa de 66% para bajar el contenido de humedad y provocar agrietamiento. Las imágenes de las rodela fueron capturadas utilizando una cámara fotográfica digital (Panasonic DMC FZ8). Las grietas de estas rodela fueron medidas utilizando el programa Image-Pro Plus donde se aplicaron filtros para mejorar la calidad de las imágenes y evitar errores en las mediciones. Se midió el porcentaje de área de las grietas respecto al área total de la semi-rodela.

Para la nanocaracterización de la madera se obtuvieron rodela de 5 cm de espesor ubicadas a 3 metros de altura, medidos desde la base del árbol. Del centro de estas rodela se cortaron a lo largo de la sección transversal listones de 10 mm de ancho, 10 mm de espesor y de largo variable pues depende de la dimensión de la sección transversal de las rodela, utilizando solamente la sección desde la médula hacia la corteza y en dirección norte que es donde se presenta la acción del viento. De éstos listones se cortaron cubos de 3mm por lado que incluían los anillos de crecimiento 6 y 7, localizados en la madera de primavera en la cual se generan las grietas en el *Eucalyptus nitens* (Gacitúa *et al.* 2007, Valenzuela 2011). Estos cubos corresponden al volumen representativo de estas familias, según el estudio realizado previamente por Valenzuela (2011).

Los cubos obtenidos fueron impregnados con resina epóxica para otorgarle soporte mecánico a la pared celular y obtener superficies de calidad en los cubos luego del corte en micrótopo, para facilitar así las mediciones y ensayos en el nanoindentador. Para evitar el daño mecánico de la superficie que

se produce al realizar un corte con el micrótopo, se realizó un corte en forma de pirámide en una cara transversal de cada cubo dejando aproximadamente un área de 0.5 mm^2 expuesta para nanoindentar según la técnica de Jakes *et al.* (2007). La preparación de la superficie de la pirámide truncada se efectuó en un micrótopo de rotación. Inicialmente se cortó la superficie de la punta de la pirámide con una cuchilla de vidrio, para finalizar con cortes utilizando una cuchilla de diamante. El avance de la cuchilla de diamante en el micrótopo se ajustó al mínimo (hasta 250 nm) para mejorar la calidad de la superficie en el cubo. Las probetas así obtenidas, fueron colocadas en un disco metálico para su montaje en la placa-base del nanoindentador. Las indentaciones se realizaron en el modo control de carga (Load-Control) usando un nanoindentador marca Hysitron Triboindenter TI-900, equipado con una punta de diamante cube corner. Se diseñó un ciclo de carga para la lamela media, y para las capas S1 y S2. El criterio de diseño se basó en la eliminación de la fluencia en la respuesta “deformación”, no incluyendo así los efectos viscoelásticos en la descarga elástica. Se obtuvieron los parámetros elásticos módulo de elasticidad, y dureza (Zou *et al.* 2009). El ciclo de carga para la lamela media y la capa S2 se definió con una carga inicial por 5 s, hasta una carga máxima de $100 \mu\text{N}$, luego la carga se mantuvo constante por 60 s, y finalmente se realizó la descarga en 5 s. Para la capa S1, se utilizó un ciclo de carga por 5 s, hasta alcanzar un máximo de $20 \mu\text{N}$, luego se mantuvo la carga por 110 s, para finalmente realizar la descarga en 5 s.

La figura 1 muestra las marcas o huellas dejadas en la lamela media y en las capas S1 y S2, luego de un ensayo de nanoindentación.

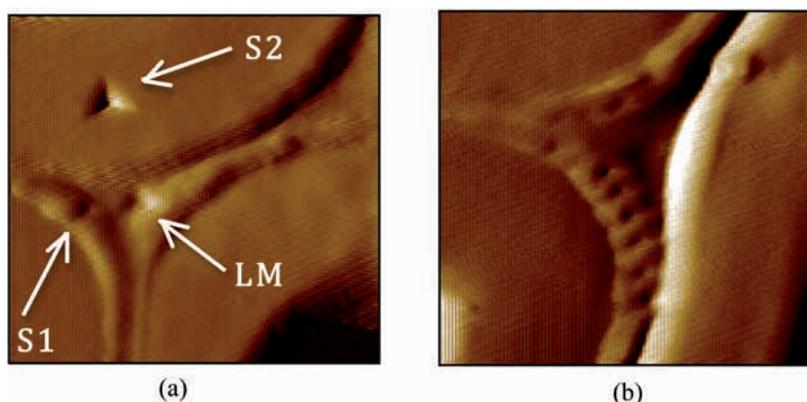


Figura 1. Imagen de nanoindentaciones en familias de *Eucalyptus nitens*. (a) En la lamela media (LM), y las capas S1 y S2, (área de escaneo: $5 \times 5 \mu\text{m}^2$). (b) En capa S1, (área escaneo: $4 \times 4 \mu\text{m}^2$).

Para obtener las variables razón de ductilidad (E/H) y módulo de resiliencia (u_r), se obtuvo primero el módulo de elasticidad del material (E_s) mediante la ecuación 1 (Gindl y Schöberl 2004)

$$E_r = \left[\frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \right]^{-1} \quad (1)$$

La razón de poisson ν_s y ν_i representan a la muestra (pared celular o lamela media) y a la punta de diamante, respectivamente. E_i es el módulo de elasticidad de la punta de diamante (1140 GPa).

La dureza (H) se obtuvo dividiendo la carga máxima aplicada ($P_{\text{máx}}$), por el área de la geometría de la huella o indentación proyectada (A).

Para obtener el módulo de resiliencia se utilizó la ecuación 2 (Beer y Johnston 1992)

$$u_r = \frac{\sigma_y^2}{2E} \quad (2)$$

Utilizando el módulo de resiliencia de la LM y de las capas S1 y S2 se logró obtener la diferencia en el módulo de resiliencia (Δu_r). Si esta diferencia aumenta, las tensiones en la interface entre la LM y las capas S1 y S2 aumentan, lo que generara grandes tensiones que facilitan la separación entre ellas.

Los listones se utilizaron para caracterizar morfológicamente los vasos presentes en los anillos de crecimiento 6 y 7. La geometría de los vasos fue medida con un microscopio óptico (Nikon SMZ1000), conectado a una cámara digital (Q-Imaging). La captura de imágenes se realizó con el programa Q-Capture y se analizaron con el programa Image-Pro Plus obteniendo de esta forma la geometría y la frecuencia de vasos, en un área de interés de 1 mm² (Figura 2).

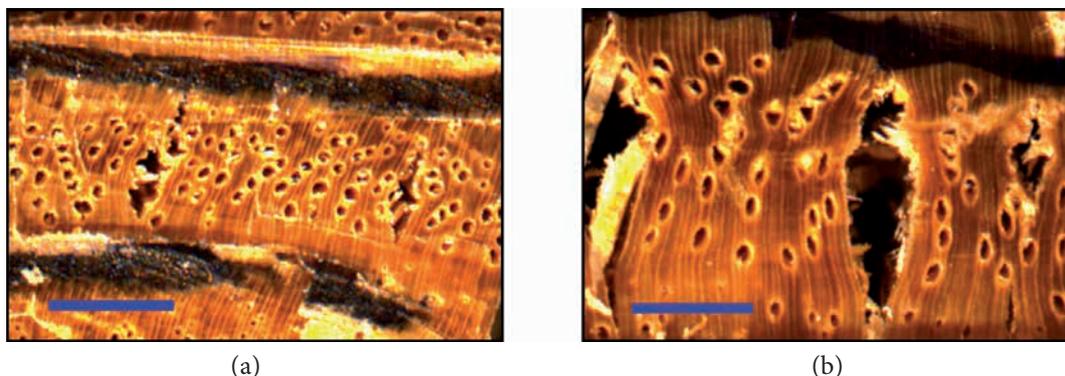


Figura 2. Imagen de microgrietas y vasos en familias de *Eucalyptus nitens*. (a) Anillo de crecimiento 6, sitio de Mulchén. (b) Anillo de crecimiento 7, sitio de Yungay.

Escala de barra= 1 mm.

Se aplicó un diseño factorial 2^k para analizar la geometría y número de vasos, porcentaje de grietas, razón de ductilidad (E/H) y el módulo de resiliencia (u_r); los factores fueron: Familia (con dos niveles: familia 2 y 6) y sitio (con dos niveles: Mulchén y Yungay).

También se utilizó un diseño factorial general para el análisis de la diferencia del módulo de resiliencia (Δu_r). Los factores fueron: Interfaces (3 niveles: LM/S1, LM/S2 y S1/S2) y sitio-familia (4 niveles: Mulchen-familia 2, Mulchen-familia 6, Yungay-familia 2 y Yungay-familia 6). Se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95%.

RESULTADOS

La figura 3 muestra el porcentaje de frecuencia de grietas en las semi-rodelas obtenido para cada familia y para cada sitio. El análisis de varianza mostró que existe una diferencia significativa entre las familias estudiadas (2 y 6). La familia 2 presenta un menor porcentaje de agrietamiento que la familia 6. Se distinguió un leve aumento en el porcentaje de grietas en el sitio de Yungay; sin embargo, las diferencias no fueron significativas. El aumento de grietas en el sitio de Yungay se puede explicar debido al mayor diámetro de sus árboles en comparación a los árboles del sitio de Mulchén (18 y 29 cm respectivamente), por lo tanto, existe un mayor área y un mayor volumen de madera para la aparición de grietas.

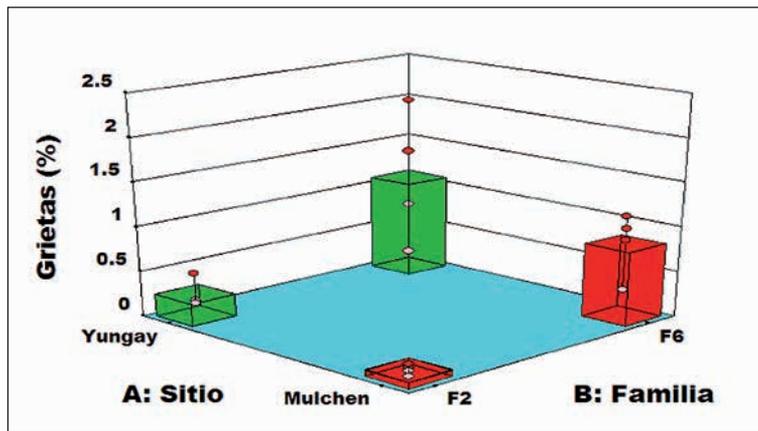


Figura 3. Muestra el porcentaje de agrietamiento en las familias 2 y 6, para cada sitio (Mulchén y Yungay). Los puntos indican valores individuales.

La formación de grietas se debe al comportamiento mecánico a nivel ultraestructural de la madera, en particular las relaciones esfuerzo-deformación de la pared celular y de la LM. La figura 4a muestra la razón de ductilidad, la cual está asociada con la condición de fragilidad de la madera. Este parámetro fue medido a nivel ultraestructural en muestras de la familia 2 y 6, y en ambos sitios (Mulchén y Yungay). Se observa que existen diferencias entre las capas de la pared celular y la LM, siendo esta última la más quebradiza. La capa S1 es más quebradiza que la capa S2, lo que evidencia la diferencia de resistencia y elasticidad de las capas de la pared celular como una de las posibles causas para que se formen fracturas. Resultados similares fueron reportados por Potoszki *et al.* (2007). Estos autores señalan que cuando existe diferencia en resistencia, o en elasticidad entre las capas de la pared celular, la capa flexible resistirá la deformación impuesta por la fuerza aplicada, mientras que la más elástica se doblará. La diferencia en la flexibilidad de las capas de la pared celular resulta en la separación de las mismas debido a los esfuerzos de cizalle producidos en las interfaces de las capas.

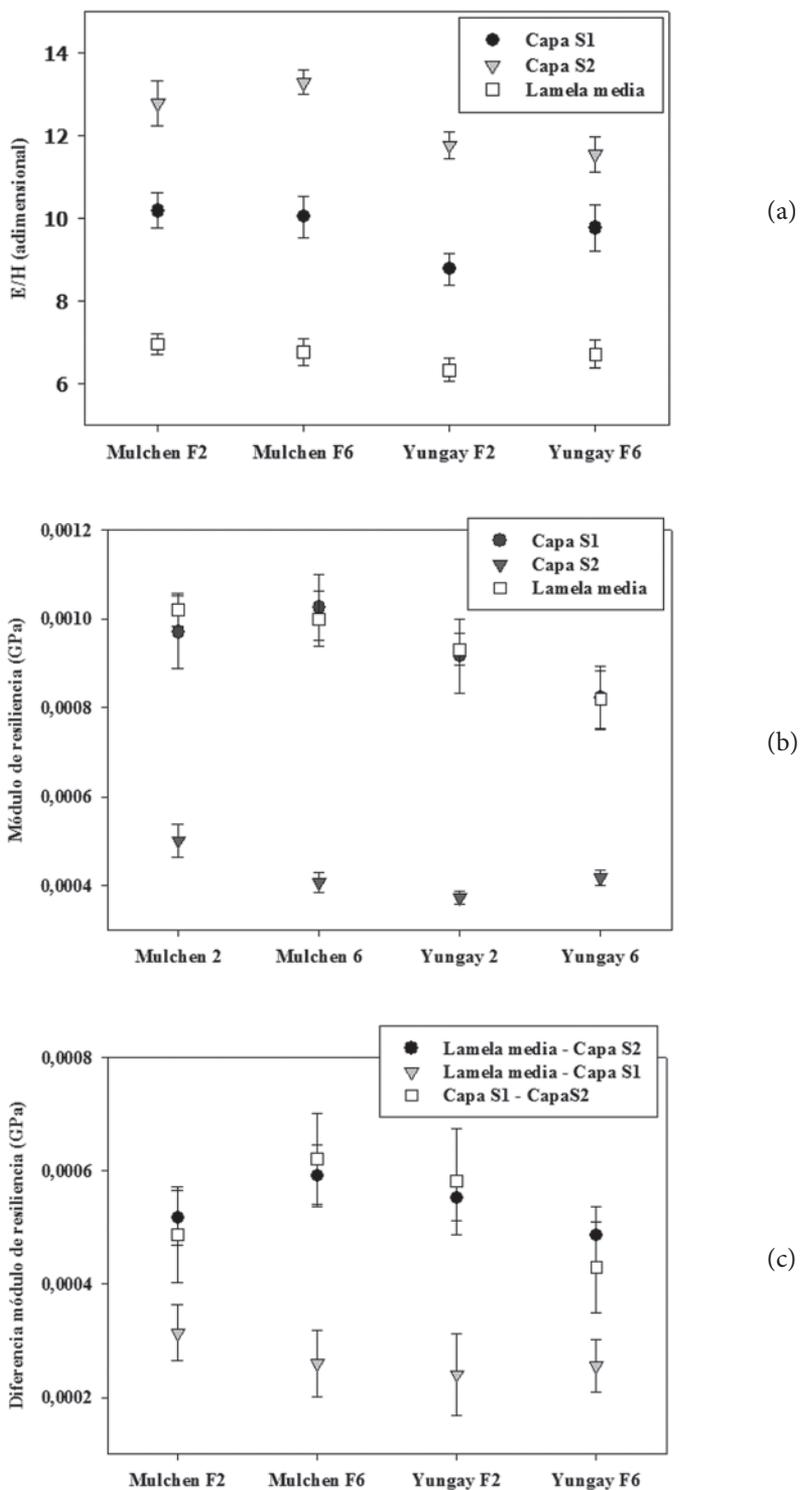


Figura 4. Propiedades nanomecánicas en las capas S1, S2, lamela media e interfaces para familias (2 y 6) y para sitio de muestreo (Mulchén y Yungay). (a) E/H ; razón de ductilidad (E/H ; adimensional) (b) Módulo de resiliencia (c) Diferencia en el módulo de resiliencia.

El hecho que la LM y la capa S1 sean más quebradizas que la capa S2, puede deberse a la mayor cantidad de lignina presente en cada una de ellas. La lamela media contiene 70% de lignina, mientras que la capa S1 40% y la capa S2 20%. La lignina es una sustancia que aporta rigidez aunque provoca fragilidad en los materiales (Bodig y Jayne 1982).

Los valores de razón de ductilidad de la capa S1 se encuentran por debajo de los de la capa S2 y por sobre de los de la lamela media (figura 4a). Este fenómeno podría provocar las micro-fracturas en la interface LM/S1, y en la interface de las capas S1/S2, las cuales se podrían propagar y generar fallas o grietas visibles principalmente en la madera de primavera. Resultados similares fueron reportados por Donaldson (1995), quien mostró que la frecuencia de fracturas observadas en *Pinus radiata* D. Don ocurrieron en la capa S1. Como la LM y la capa S1 son más frágiles que la capa S2, es posible que la mayor frecuencia de fractura ocurra en las interfaces LM/S2 y S1/S2 ya que entre estas capas existe diferencia en flexibilidad y/o propiedades mecánicas, como lo reportaron Putoczki *et al.* (2007), Gacitúa *et al.* (2007) y Donaldson (1995).

Al comparar las familias 2 y 6 no se encontraron diferencias significativas en las propiedades nanomecánicas entre las capas S1, S2 y la lamela media. Se observó que existe un efecto de sitio en las propiedades nanomecánicas de las capas S1 y S2. Es decir, que las paredes celulares de los árboles que crecen en el sitio de Yungay son más quebradizas que las paredes celulares de los árboles del sitio Mulchén. Esto se relaciona con el porcentaje de grietas que fue levemente mayor en las semi-rodela obtenidas del sitio Yungay, aunque estas diferencias no son significativas.

La figura 4b, muestra el comportamiento del módulo de resiliencia en las capas S1, S2 y en la LM. El análisis estadístico señaló que existen diferencias en el módulo de resiliencia en las capas S1 y la LM con respecto a la capa S2. Se observó que la capa S1 y la LM tienen mayor capacidad de absorber deformación elástica, por lo que pueden disipar mayores esfuerzos sin sufrir fallas permanentes (Gacitúa *et al.* 2007), y por lo tanto se comportan como un material resiliente (Valenzuela 2011). De esta forma, la LM y la capa S1 son más resiliente que la capa S2, con un módulo de elasticidad bajo y un alto límite elástico asociado al alto valor de esfuerzo de fluencia ($\sigma_{ys} = H/3$). Esto significa que se pueden recuperar cuando el esfuerzo es liberado, facilitando el movimiento interno o deformación sin fractura durante el crecimiento del árbol.

Según la razón E/H , la capa S2 es más dúctil respecto a la capa S1 y LM, (figura 4a), por lo que absorbe menor energía de deformación generando diferencias de ésta con ambas capas, provocando mayores tensiones en las interfaces LM/S2 y S1/S2.

No se observó un efecto significativo en las familias y sitios para las propiedades nanomecánicas de las capas S1, S2 y de la LM. Sólo se observaron diferencias significativas en las propiedades nanomecánicas de la capa S2 de la familia 2 al comparar sitios: la razón de ductilidad de la capa S2 de arboles de Mulchén es mayor que la de Yungay (figura 4a). En el sitio de Mulchén, la ductilidad de la capa S2 de la familia 2 es mayor que la de la familia 6. Esto implica que la familia 2 de Mulchén, tiene mayor absorción de energía en la capa S2, soportando mayores esfuerzos de deformación, evidenciando un menor porcentaje de grietas en los arboles de las familias de Mulchén.

La razón de ductilidad (figura 4a) mostró que la LM es la más frágil, seguida por la capa S1 son más frágiles con respecto a la capa S2, además, el módulo de resiliencia de ambas capas fue similar (figura 4b), lo que implica se produzca entre éstas una zona vulnerable, facilitando la formación y propagación de grietas.

Una forma de conocer los niveles de deformación que pueden soportar las capas S1, S2 y la LM es mediante el cálculo de la diferencia del módulo de resiliencia (Δu_r), estudiado por Valenzuela (2011). En este estudio se señala que si la Δu_r aumenta, las tensiones en la interface LM/S2 se incrementan

generando tensiones de corte en la interface que pueden llegar a la formación de microgrietas, solo visibles a alta magnificación.

Por otro lado, la figura 4c muestra la diferencia entre los módulos de resiliencia (Δu_r) de las interfaces entre las capas S1, S2 y LM. Los resultados no mostraron diferencias significativas en las interfaces LM/S2 y S1/S2. Sin embargo ambas, fueron significativamente diferentes con la interface LM/S1, teniendo esta última valores inferiores. Dado que los módulos de resiliencia de las interfaces LM/S2 y S1/S2 son mayores que la interface LM/S1 se pueden producir mayores tensiones de corte responsables de la formación de microgrietas.

Estos resultados se relacionan con los parámetros de razón de ductilidad y módulo de resiliencia para la LM y capa S1 (figura 4a y 4b), mostrando un comportamiento similar en fragilidad y resiliencia. Como la diferencia en el módulo de resiliencia (Δu_r) es menor entre la lamela media y la capa S1 se generan bajas tensiones en su interface (LM/S1), en comparación con la capa S2 que es mas dúctil. Esto genera mayores tensiones en la interface LM/S2 y en la interface S1/S2. La diferencia de resiliencia que existe entre LM-capa S2 y capa S1-capa S2 es mayor, provocando el aumento de las tensiones en estas interfaces. Esto podría facilitar que la separación de capas ocurra con mayor frecuencia en la interface S1/S2.

La figura 5 muestra por separado la diferencia de módulo de resiliencia (Δu_r) entre las interfaces LM/S2 y S1/S2, donde ocurren las mayores tensiones. Se observaron diferencias significativas entre el factor sitio-familia aunque no hubo diferencias significativas en la interface. Así, el factor Mulchén-familia 6 fue mayor que el factor Yungay-familia 6. Este resultado no tiene relación con el porcentaje de grietas obtenido ya que éste fue menor en el sitio de Mulchén. Se observaron también diferencias para el sitio-familia 2, con mayor diferencia en el factor Yungay-familia 2. Esto significa que se generan mayores niveles de tensión y está relacionado con el alto porcentaje de grietas observados en las semi- rodelas provenientes de los arboles del sitio de Yungay.

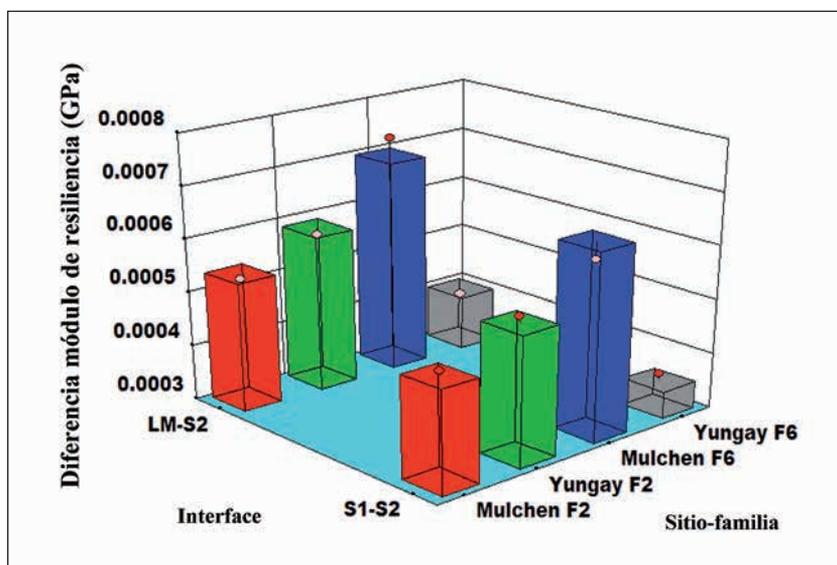


Figura 5. Superficie respuesta para la diferencia del módulo de resiliencia entre la lamela media y capa S2 (LM-S2) y entre la capa S1 y capa S2 (S1-S2) para el cada sitio y familia (Mulchén-Yungay y la Familia 2 (F2)-familia 6 (F6)). Los puntos indican valores individuales.

Se observaron diferencias significativas en las diferencias del módulo de resiliencia (Δu_r) entre los factores sitio-familia. Para el sitio de Mulchén, el factor Mulchén-familia 2 fue menor que Mulchén-familia 6 (mayores tensiones), lo cual se relaciona con el mayor porcentaje de grietas observadas en la familia 6, resultados similares se reportaron en el estudio de Valenzuela (2011). Por otro lado, en el sitio de Yungay, se presentó un mayor valor de diferencia en el módulo de resiliencia del factor de Yungay-familia 2 con respecto al factor de Yungay- familia 6, no mostrando una directa relación con la cantidad de grietas dado que la familia 6 mostró una mayor presencia de éstas.

En la figura 6 se muestra el promedio de número de vasos en la madera de primavera para los anillos de crecimiento 6 y 7 de los sitios de Mulchén y Yungay, mientras que en la figura 7 se muestra la geometría de los vasos. Se observa un mayor número de vasos en muestras provenientes del sitio Mulchén-familia 2, y menor número en las muestras provenientes del sitio de Yungay-familia 6 (figura 6). El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los factores sitio y familia. Por otro lado, el área y diámetro de los vasos fueron menores en el sitio de Mulchén-familia 2 y mayores en el sitio de Yungay-familia 6 (ver figura 7a y 7b).

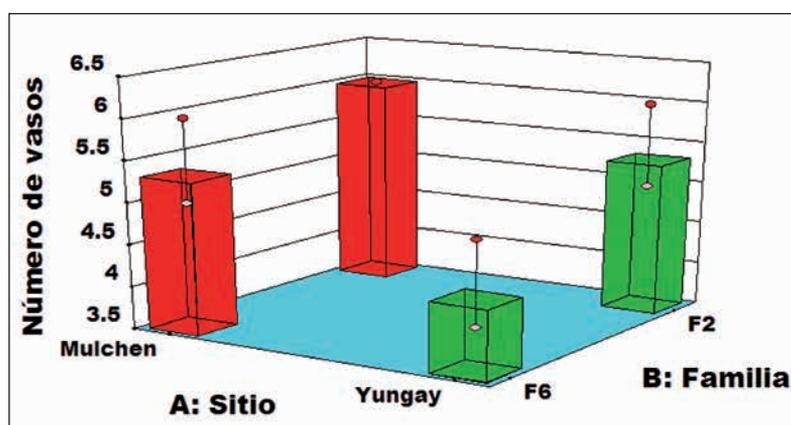


Figura 6. Promedio de números de vasos de los anillos de crecimiento 6 y 7 en los sitios Mulchén y Yungay, y en las familias 2 y 6. Los puntos indican valores individuales de las familias.

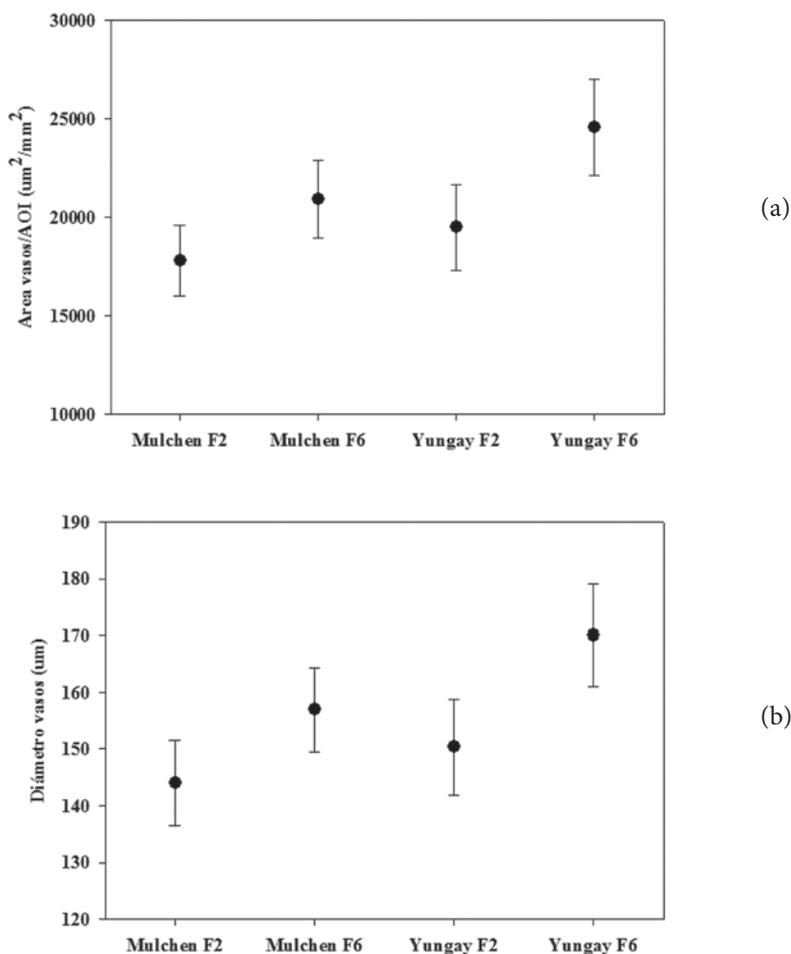


Figura 7. Geometría de los vasos en madera de primavera (95% de intervalo de confianza) (a) Área de vasos ($\mu\text{m}^2/\text{mm}^2$), y (b) Diámetro de vasos (μm), para los sitios Mulchén y Yungay, y las familias 2 (F2) y 6 F6.

En general, se observó que a menor número de vasos, mayor es el área y diámetro de los mismos. Esto se puede relacionar con la presencia de grietas que fue mayor en las semi-rodela provenientes de árboles del sitio Yungay, resultados que fueron similares a los informados por Valenzuela (2011). Al haber mayor área y diámetro de los vasos se forman mayores esfuerzos tangenciales, producto de las tensiones internas que se generan en la dirección tangencial a los anillos de crecimiento (Gacitúa *et al.* 2007). Los vasos en estos anillos de crecimiento (6 y 7) son principalmente de forma elíptica. En los vasos con morfología elíptica, se generan mayores esfuerzos ($\sigma_{max} = 7\sigma$) que en los vasos con geometría circular ($\sigma_{max} = 3\sigma$). Estos esfuerzos se proyectan desde el centro del vaso y perpendicular a la dirección del esfuerzo tangencial, formando fracturas en la orientación tangencial-radial. Estas fracturas se extienden en dirección radial según la teoría de fractura mecánica de sólidos (Sanford 2003, Smith *et al.* 2003). La morfología de los vasos está fuertemente asociada a la concentración de esfuerzos que ocurren alrededor de los vasos. Las rodela utilizadas del sitio de Yungay poseen mayores diámetros en su volumen, lo que significa que los anillos de crecimiento son más anchos permitiendo que el área y diámetro de los vasos sean mayores, generando elevadas concentraciones de esfuerzos en la periferia de los vasos, lo que podría producir mayor cantidad de grietas.

Por otro lado, un mayor número de vasos, implica mayores imperfecciones en el sólido poroso (madera), que interrumpen la continuidad del sólido aumentando el esfuerzo que se origina alrededor de las imperfecciones o vasos (Beer y Johnston 1992). De este modo, el aumento en área y diámetro de vasos provenientes de la familia 6 indicaría un mayor nivel de agrietamiento en ésta (figura 8).

En la figura 9, se muestran las células parenquimáticas ubicadas alrededor de los vasos, al mismo tiempo, se observan las delgadas paredes y sus amplios lúmenes. Según Hägglund (1951), este tipo de morfología provocaría una menor resistencia de estos componentes. De esta forma, es en las células parenquimáticas que rodean los vasos, donde se produciría la separación de las interfaces LM/S2 y S1/S2, generando las fracturas en la madera hasta hacerse éstas visibles.

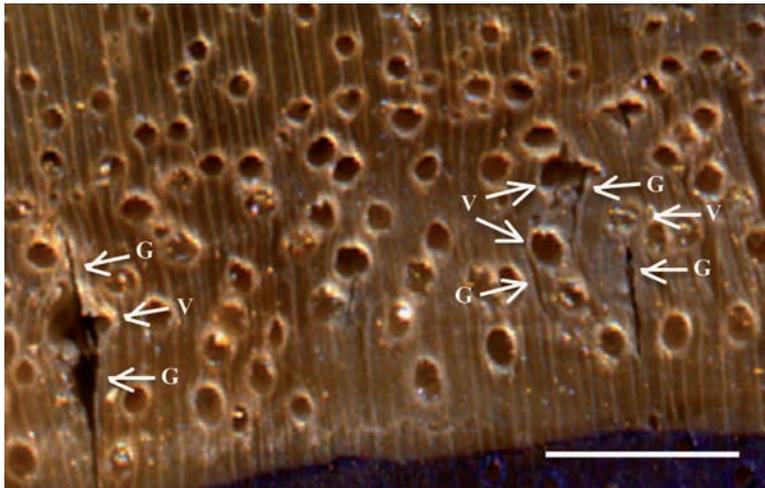


Figura 8. Anillo de crecimiento 6, del sitio de Mulchén-familia 6. Se observa alrededor de los vasos el inicio de microfracturas que se producen por las elevadas concentraciones de esfuerzos. G= Grietas; V= Vasos.
Escala de barra = 1 mm.

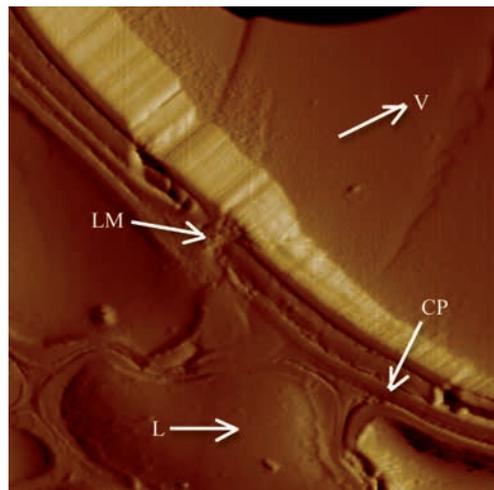


Figura 9. Borde de un vaso rodeado de células parenquimáticas de paredes delgadas y lúmenes amplios. V=Vaso; L=Lumen; CP= Célula parenquimática; LM= Lamela media (Área de escaneo= 30µm).

CONCLUSIONES

Los parámetros nanomecánicos, junto a la frecuencia y geometría de los vasos relacionados a los niveles de agrietamiento en *Eucalyptus nitens*, permitieron establecer las posibles causas y conocer las zonas donde se forman las microgrietas que se transforman en grietas visibles en la madera.

La lamela media, según el parámetro razón de ductilidad (E/H), es más frágil que la capa S1 y ésta a su vez más frágil que la capa S2. El módulo de resiliencia de la lamela media y la capa S1 en términos de absorción de energía se comportan similarmente. La capa S2 absorbe menor energía de deformación elástica.

Se encontró que el origen de la separación de las capas se produce en las interfaces LM/S2 y S1/S2

La frecuencia y geometría de los vasos evidenció una fuerte influencia en la concentración de esfuerzos alrededor de éstos provocando microgrietas en esa zona.

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos para el proyecto FONDEF D07i1101 de CONICYT por el apoyo financiero. Al Centro de Biomateriales y Nanotecnología (CBN) del Departamento de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío por el equipamiento facilitado y a Forestal Mininco S.A. por proveer la materia prima (*Eucalyptus nitens*) para este estudio.

BIBLIOGRAFIA

Bodig, J.; Jayne, B.A. 1982. *Mechanics of Wood and Wood composites*. Van Nostrand Reinhold Inc: USA. 712 p.

Bolshakov, A.; Pharr, M. 1998. Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques. *Journal of Materials Research* 13(4): 1049-1058.

Côte, W.; Hanna, R. 1983. Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces. *Wood Fiber Sci.* 15(2): 135-163.

Donaldson, L.A. 1995. Cell Wall fracture properties in relation to lignin distribution and cell dimensions among three genetic groups of radiata pine. *Wood Science and Technology* 29(1): 51-63.

Beer, F.P.; Johnston, E.R. Jr. 1992. *Mechanics of material*. 2ª edición, McGraw-Hill Inc: New York. 742 pp.

Gacitúa, W.; Ballerini, A.; Laserre, J.P.; Bahr, D. 2007. Nanoindentaciones y ultraestructura en madera de *Eucalyptus nitens* con micro y meso fracturas. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 9(3): 259-270.

Gindl, W.; Schöberl, T. 2004. The significance of the elastic modulus of wood cell walls obtained from nanoindentation measurements. *Composites Parte A* 35: 1345-1349.

Hägglund, E. 1951. *Chemistry of Wood*. Academic Press INC: New York. 631 pp.

INFOR, 2004. *Eucalyptus nitens* en Chile: Primera monografía. Informe técnico N° 164. *Instituto forestal*. Valdivia, Chile. 143 p.

Jakes, J.E.; Stone, D.S.; Frihart, C.R. *Nanoindentation size effects in Wood*. 30th Annual Meeting of The Adhesion Society, Inc. February 18-21, 2007. Tampa Bay, FL. ISSN 1086-9506.

Lausberg, M.J.F.; Gilchrist, K.F.; Skipwith, J.H. 1995. Wood properties of *Eucalyptus nitens* grown in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 25 (2): 147-163.

Putoczki, T.; Nair, H.; Butterfield, B.; Jackson S. 2007. Intra-ring checking in *Pinus radiata* D. Don: the occurrence of cell wall fracture, cell collapse, and lignin distribution. *Trees* 21(2): 221-229.

Sanford, R.J. 2003. *Principles of fracture mechanics*. Pearson Education Inc. Prentice Hall Upper Saddle River: New Jersey. 416 pp.

Shelbourne, C.J.A.; Nicholas, I.D.; McKinley, R.B.; Low, C.B.; McConnochie, R.M.; Lausberg, M.J.F. 2002. Wood density and internal cheking of young *Eucalyptus nitens* in New Zealand as affected by site and height up the tree. *New Zealand Journal of Forestry Science* 32 (3): 357-385.

Sjöström, E. 1993. *Wood Chemistry: Fundamentals and applications*. 2° edition. Academic Press: San Diego, California, USA. 223 pp.

Smith, I.; Landis, E.; Gong, M. 2003. *Fracture and Fatigue in Wood*. John Wiley and Sons Southern Gate Chichester: England. 234 pp.

Tze, W.; Wang, S.; Rials, T.; Pharr, G.; Kelley, S. 2007. Nanoindentation of wood cell walls: continuous stiffness and hardness measurement. *Composite Parte A* 38: 945-953.

Valenzuela, P. 2011. *Fracturas, propiedades nanomecánicas y anatomía de familias de Eucalyptus nitens*. Tesis de Magister. Departamento de ingeniería en maderas. Universidad del Bío Bío. Concepción. Chile. 91p.

Vignote, S.; Molinero, I.; Gerard, J.; Diez M.R. 1996. Estudio de las tensiones de crecimiento del *Eucalyptus globulus* Labill en Galicia y su relación con las características de la estación y morfológicas del propio árbol. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 5(1): 154-176.

Wimmer, R.; Lucas, B. 1997. Comparing mechanical properties of secondary wall and cell corner middle lamella in Spruce wood. *IAWA Journal* 18(1): 77-88.

Wu, Y.; Wang, S.; Zhou, D.; Xing, C.; Zhang, Y. 2009. Use of nanoindentation and silviscan to determine the mechanical properties of 10 hardwood species. *Wood and Fiber Science* 41(1): 64-73.

Xing, C.; Wang, S.; Pharr, G. 2009. Nanoindentation of juvenil and mature loblolly pine (*Pinus taeda* L.) wood fibers as affected by thermomechanical refining pressure. *Wood Science and Technology* 43 (7-8): 615-625.

Zink, A.; Pellicane, P.; Shuler, C. 1994. Ultrastructural analysis of softwood fracture surfaces. *Wood Science and Technology* 28 (5): 329-338.

Zou, L.; Jin, H.; Lu, W.; Li, X. 2009. Nanoscale structural and mechanical caracterizacion of the cell Wall of bamboo fibers. *Materials Science and Engineering C*. 29 (4) 1077-1502.