



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Forestales - Programa de Magister en Ciencias Forestales



**Tensiones de crecimiento longitudinales en árboles de
Eucalyptus nitens con dimensiones aserrables**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Forestales

MARGARETTE EVELYN OMONTE PAREDES
CONCEPCIÓN-CHILE
2014

Profesor Guía: Luis Valenzuela Hurtado
Dpto. Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Concepción



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Forestales - Programa de Magister en Ciencias Forestales



**Tensiones de crecimiento longitudinales en árboles de
Eucalyptus nitens con dimensiones aserrables**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Forestales

MARGARETTE EVELYN OMONTE PAREDES
CONCEPCIÓN-CHILE
2014

Profesor Guía: Luis Valenzuela Hurtado
Dpto. Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Concepción

TENSIONES DE CRECIMIENTO LONGITUDINALES EN ÁRBOLES DE *Eucalyptus nitens* CON DIMENSIONES ASERRABLES

Comisión Evaluadora:

Luis Valenzuela Hurtado (Profesor guía)

Ingeniero de Ejecución en Madera, Ph. D.

Eduardo Peña Fernández (Profesor co-guía)

Ingeniero Forestal, Dr.

Luis Soto Fariña (Comisión evaluación)

Ingeniero Forestal, MSc.



Director de Postgrado:

Regis Teixeira Mendonça

Ingeniero Químico, Dr.

Decano Facultad de Ciencias Forestales:

Manuel Sánchez Olate.

Ingeniero Forestal, Dr.

DEDICATORIA



A mi familia, por su amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A la Empresa Forestal Mininco S.A., por proporcionar el material para el desarrollo de este estudio.

A Don Luis Valenzuela Hurtado, por su apoyo fundamental durante este proceso de formación.

A don Luis Soto Fariña, a don Jean Pierre Lasserre y a don Sandro Díaz Bravo, por compartir sus conocimientos, y confiarme este trabajo.

A todas las personas que de alguna u otra forma colaboraron con la realización de este estudio.

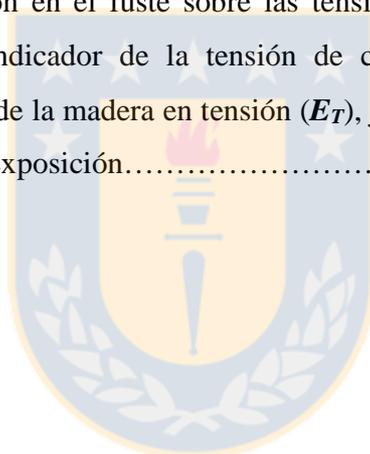


ÍNDICE GENERAL

TEMA	Nº de pág.
Capítulo I. Tensiones de crecimiento longitudinales en árboles de <i>Eucalyptus nitens</i> con dimensiones aserrables.....	1
1. Resumen.....	1
2. Abstract.....	2
3. Introducción.....	3
4. Métodos.....	6
4.1 Indicador de la tensión de crecimiento (<i>GSI</i>).....	6
4.2 Módulo de elasticidad de la madera en tensión (<i>E_T</i>).....	7
4.3 Tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L).....	8
4.4 Análisis de datos.....	8
5. Resultados y Discusión.....	10
5.1 Niveles de tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L).....	10
5.2 Variación fustal de las tensiones de crecimiento longitudinales, indicador de la tensión de crecimiento y módulo de elasticidad de la madera en tensión.....	11
5.3 Relaciones entre las tensiones de crecimiento longitudinales, indicador de la tensión de crecimiento y módulo de elasticidad de la madera.....	14
6. Conclusiones.....	17
7. Bibliografía.....	18

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N°	N° de pág.
1. Significancia de los efectos: altura y exposición en el fuste, y de su interacción, en las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T).....	11
2. Efecto de la altura en el fuste sobre las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T), junto con los valores medios obtenidos por altura.....	12
3. Efecto de la exposición en el fuste sobre las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T), junto con los valores medios obtenidos por exposición.....	13



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N°	N° de pág.
1. Instrumento para medir el indicador de la tensión de crecimiento, GSI , según el método CIRAD-Fôret.....	7
2. Relaciones entre las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T). a) E_T versus GSI , b) σ_L versus GSI , y c) σ_L versus E_T	15



Capítulo I. Tensiones de crecimiento longitudinales en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables.

Chapter I. Longitudinal growth stresses in *Eucalyptus nitens* trees with sawable dimensions.

1. Resumen

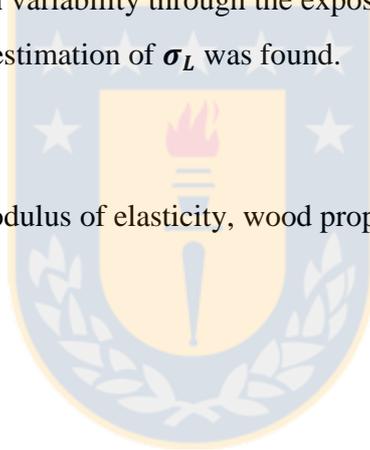
En el presente estudio se investigan los niveles de tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L) en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables. Junto con esto, se investiga la variación fustal de las σ_L , del indicador de la tensión de crecimiento (**GSI**, Growth Stress Indicator, obtenido por el método CIRAD-Fôret) y del módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T), y se examinan las relaciones entre estas variables. Se escogieron aleatoriamente nueve árboles de una plantación de *E. nitens* de 18 años de edad, crecida en la Región del Biobío, Chile. En cada árbol se midió el **GSI**, en las exposiciones Norte, Sur, Este y Oeste, para una altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la altura comercial del árbol, así como también, se determinó el E_T y las σ_L en estas mismas exposiciones y alturas. El nivel medio de σ_L encontrado fue de 28,3 MPa. Las σ_L , el **GSI** y el E_T , variaron significativamente a través de las alturas y exposiciones en el fuste. Se encontró una alta influencia del **GSI** en la estimación de los niveles de σ_L .

Palabras claves: Módulo de elasticidad, propiedades de la madera, tensiones de crecimiento.

2. Abstract

In this study, the levels of longitudinal growth stresses (σ_L) in *Eucalyptus nitens* trees with sawable dimensions were investigated. Furthermore, tree stem variations of the σ_L , growth stress indicator (GSI , using CIRAD-Fôret method) and modulus of elasticity in tension (E_T) were also investigated, and the relationships between these variables were examined. Nine trees were randomly selected from a plantation of *E. nitens* trees of 18 years old, grown at the Biobío region, Chile. GSI were measured in each tree at North, South, East and West stem expositions, at 2 m height, and at 33, 66 and 100% of the tree merchantable height, in which E_T and σ_L were also determined. The mean level of σ_L found was 28,3 MPa. All variables (σ_L , GSI and E_T) showed high variability through the expositions and heights in the tree stem. High influence of GSI on the estimation of σ_L was found.

Keywords: Growth Stress, modulus of elasticity, wood properties.



3. Introducción

Un factor clave que limita el uso de las plantaciones del género *Eucalyptus*, como madera aserrada de calidad, son los altos niveles de tensiones de crecimiento en el interior de la madera (Yang *et al.* 2001, Yang y Waugh 2001, Yang *et al.* 2005, Trugilho *et al.* 2006). Estas tensiones, que se encuentran en equilibrio en el árbol en pie (Malan y Gerischer 1987), son liberadas durante la corta y trozado del árbol, y a lo largo de las operaciones de aserrío posteriores, generando un conjunto de deformaciones que provocan distintos defectos en las trozas o productos ya aserrados (Touza 2001, INFOR 2004).

Las tensiones de crecimiento son originadas durante el proceso de maduración de las células que produce el cambium (Nicholson 1973, Trugilho *et al.* 2002). Durante este proceso, las células que crecen cada año sobre la periferia del fuste, tienden a expandirse lateralmente y a contraerse longitudinalmente, sin embargo, estos cambios dimensionales son impedidos por las células que ya están lignificadas y que han sido formadas en años anteriores, lo que genera un conjunto de tensiones (Vignote *et al.* 1996, Touza 2001, Yang y Waugh 2001, Yang *et al.* 2005, Biechele *et al.* 2009). Con el paso del tiempo estas tensiones se acumulan, y como consecuencia, el centro del fuste se encuentra sometido a tensiones de compresión, cuya magnitud aumenta hacia la médula, mientras que la periferia del tronco, se encuentra sometida a esfuerzos en tracción que se incrementan en dirección a la corteza (Touza 2001, Yang *et al.* 2005).

Las tensiones de crecimiento en dirección longitudinal son las más intensas y variables (Trugilho y Oliveira 2008), y las más importantes desde el punto de vista de la calidad de la madera sólida (Yang y Waugh 2001). Aunque las tensiones de crecimiento no pueden ser medidas directamente, estas pueden ser calculadas a partir de mediciones de deformación y del módulo de elasticidad de la madera en tensión, E_t (Yang y Waugh 2001, Raymond *et al.* 2004, Yang *et al.* 2005).

La deformación en dirección longitudinal, que es provocada por la liberación de las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), es considerada como un estimador directo de los niveles de σ_L (Valencia *et al.* 2011). Distintos métodos han sido desarrollados para poder medir estas deformaciones longitudinales, siendo los más utilizados: el método Nicholson, el método CIRAD-Forêt y el método “strain gauge”; y que básicamente difieren entre sí, en la forma en que las σ_L son liberadas, y por lo tanto, en la cantidad de deformación longitudinal que es medida (Yang y Waugh 2001).

El método CIRAD-Fôret permite realizar mediciones repetibles de deformación longitudinal (Raymond *et al.* 2004) y puede ser considerado como un método no destructivo debido a su reducido daño físico en el fuste (Trugilho y Oliveira 2008). Este método básicamente permite registrar el desplazamiento longitudinal que experimentan dos clavos insertos en la madera a una distancia fija, luego de liberar las σ_L . Este desplazamiento registrado, es conocido como “indicador de la tensión de crecimiento”, *GSI*, y aunque no corresponde directamente a la deformación longitudinal, se considera proporcional a ésta (Yang *et al.* 2005), y por lo mismo han sido ampliamente utilizados para estimar los niveles de σ_L (Raymond *et al.* 2004, Valdés 2004, Vignote *et al.* 1996, Biechele *et al.* 2009, Medhurst *et al.* 2011, Valencia *et al.* 2011, Díaz *et al.* 2012).

La deformación longitudinal puede ser obtenida a través del *GSI*, y mediante un factor de conversión que depende la geometría del sensor y de la anisotropía elástica de la madera en el plano longitudinal-tangencial (Baillères 1994, Fournier *et al.* 1994, Yang *et al.* 2005).

La utilización de las especies del género *Eucalyptus* en usos de mayor valor agregado, se ve limitada por la presencia de altos niveles de σ_L en la madera (Yang *et al.* 2001, Yang y Waugh 2001, Yang *et al.* 2005, Trugilho *et al.* 2006). En Chile, *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) es la especie forestal de más rápido crecimiento que ha sido establecida industrialmente (INFOR 2004, Valencia y Cabrera 2009). Sin embargo, y aunque esta especie ha alcanzado un alto grado de desarrollo y aceptación como materia prima para la fabricación de celulosa,

estudios sobre la calidad de su madera para generar productos sólidos son aún escasos (Díaz *et al.* 2012).

La mayoría de los estudios en *E. nitens* en relación a las σ_L , miden el **GSI** a través del método CIRAD-Fôret, y lo utilizan como un indicador del nivel de σ_L (Valdés 2004, Biechele *et al.* 2009, Medhurst *et al.* 2011, Valencia *et al.* 2011, Díaz *et al.* 2012). Trabajos en los cuales se calculan las σ_L , sólo han sido realizados en árboles jóvenes, de 8 años de edad (Chafe 1985, 1990).

A pesar de los distintos efectos no deseados que pueden provocar los altos niveles de σ_L , en la utilización de la madera sólida, descritos con detalle por Yang y Waugh (2001), y de la importancia que tiene el conocimiento de la distribución fustal de estas tensiones para la generación de estrategias de aserrío adecuadas, no existe información acerca de los valores que estas σ_L pueden alcanzar en árboles de *E. nitens* con dimensiones aserrables, ni tampoco de su variación a lo largo del fuste.

En el presente estudio se investigó el nivel de σ_L en árboles de *E. nitens* con dimensiones aserrables, de 18 años de edad. Junto con esto, se investigó la variación fustal de las σ_L , del **GSI**, y del E_T , y además, se examinaron las relaciones entre éstas variables.

4. Métodos

El estudio fue realizado en una plantación de *Eucalyptus nitens* de 18 años de edad, ubicada a 340 m s.n.m. en la Región del Biobío, Chile (37° 51' S y 72° 07' O). La plantación fue manejada para producir madera sólida y fue intervenida con dos raleos, efectuados a los 7 y 9 años de edad, con densidades residuales de 500 y 300 árboles ha⁻¹, respectivamente. El sitio de la plantación presenta una topografía plana y pendientes inferiores a 7%, una precipitación promedio anual que supera los 1000 mm, distribuidos en un 80% entre abril y octubre, y temperaturas promedios que oscilan entre los 5°C la mínima y los 21°C la máxima (Díaz *et al.* 2012).

Se escogieron nueve árboles aleatoriamente, sin evidencia de daño o enfermedad, y sin inclinación con respecto a la posición vertical. Con un diámetro a 1,3 m sobre el nivel del suelo (*DAP*) mínimo y máximo de 28,8 y 48,1 cm respectivamente, y con alturas totales en un rango de 39,3 a 44,7 m.

Para analizar la variación fustal de las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), del indicador de la tensión de crecimiento (*GSI*) y del módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T), cada una de estas variables fueron obtenidas en cuatro posiciones distintas alrededor de la circunferencia del árbol (exposiciones Norte, Sur, Este y Oeste del fuste), a la altura fija de 2 m, y al 33, 66 y 100% de la altura comercial del árbol (*AC*, con un diámetro límite de utilización = 20 cm), configurándose un total de 16 posiciones de muestreo distintas en el fuste. Las alturas relativas 33, 66 y 100% de la *AC*, promedio de los 9 árboles, correspondieron a los 8, 16 y 24 m respectivamente.

4.1 Indicador de la tensión de crecimiento (*GSI*)

Las mediciones del *GSI* fueron realizadas sobre el árbol abatido, en cada una de las 16 posiciones de muestreo configuradas, utilizando el método CIRAD-Forêt, basado en el método de un orificio único “the single hole method” (Fournier *et al.* 1994).

En la figura 1, se muestra el instrumento utilizado. Este está formado por dos clavos que se insertan en la madera (sin corteza), separados entre sí a una distancia de 45 mm, a lo largo de la fibra, y además, una estructura metálica que contiene un comparador digital, y que es apoyada sobre los clavos una vez insertos en la madera. Para liberar las σ_L en la periferia del fuste, se realiza un orificio con una broca de 20 mm de diámetro en el punto medio entre los dos clavos, y como consecuencia, estos clavos se separan. Este desplazamiento de los clavos es registrado por el comparador digital, y corresponde al *GSI* medido en micrómetros.



Figura 1. Instrumento para medir el indicador de la tensión de crecimiento, *GSI*, según el método CIRAD-Fôret.

4.2 Módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T)

Vigas de madera de 2 x 2 x 30 cm, en alto, ancho y largo respectivamente, fueron extraídas de cada una de las 16 posiciones de muestreo configuradas, lo más cercano posible al punto de medición del *GSI*. En total se obtuvieron 144 vigas en estado verde, que fueron sometidas a flexión estática bajo una carga centrada en la cara tangencial, a una razón l/h de 14 (donde l y h es la luz y el alto de la viga, respectivamente), en una máquina universal de ensayos.

Debido a que los valores de módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos de flexión, corresponden a valores aparentes (*MOEs* aparentes, Bodig y Jayne 1982), estos debieron ser corregidos por los efectos del cizalle paralelo a la fibra. Para realizar estas correcciones, se condujeron ensayos anexos en flexión, para seis vigas de 2 x 2 x 55 cm, en alto, ancho y largo respectivamente, las que fueron extraídas al azar de las distintas posiciones de los árboles muestreados. Estas vigas fueron ensayadas a distintas relaciones l/h (8, 14, 18, 22 y 24), siguiendo la metodología propuesta por Timoshenko (1955), citado y usado por Biblis (1965), y utilizado por Biblis (2001) y Adamopoulos *et al.* (2007), con el objetivo de obtener el módulo de elasticidad real, E , y el módulo de rigidez, G , en flexión.

De este ensayo se obtuvo un E de 14010 MPa y un G de 350 MPa, donde la relación E/G fue de 40. Con este valor, se corrigieron los *MOEs* aparentes de las 144 vigas, siguiendo las deducciones de Bodig y Jayne (1982), y se obtuvieron sus módulos de elasticidad reales en flexión, E_s , sin efectos del cizalle, los cuales son equivalentes a los módulos de elasticidad en tensión E_T , paralelo a la fibra. En promedio los *MOEs* aparentes de las vigas incrementaron en un 20%.

4.3 Tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L)

Las tensiones de crecimiento longitudinales fueron calculadas como el producto entre el E_T y la deformación de crecimiento longitudinal (ϵ_L). Esta última, que fue obtenida a través de la relación $\epsilon_L = 12.3^{-6} \times GSI$, que utiliza un factor de conversión aproximado para angiospermas estándar (Fournier *et al.* 1994).

4.4 Análisis de datos

La variación fustal de las variables de interés (σ_L , GSI y E_T), fueron examinadas mediante el ajuste de modelos lineales mixtos, que tuvieron la siguiente estructura:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \tau_j + b_k + (\alpha\tau)_{ij} + e_{ijk}$$

donde Y_{ijk} es la observación realizada sobre la i -ésima altura, en la j -ésima exposición del k -ésimo árbol, μ es la media total, α_i es el efecto fijo de la i -ésima altura (con $i = 2$ m, 33% AC, 66% AC y AC), τ_j es el efecto fijo de la j -ésima exposición (con $j =$ Norte, Sur, Este y Oeste), $(\alpha\tau)_{ij}$ es la interacción entre la i -ésima altura y la j -ésima exposición, b_k es el efecto aleatorio del k -ésimo árbol y e_{ijk} es el residual aleatorio.

Los modelos fueron ajustados utilizando el procedimiento PROC MIXED del software estadístico SAS (SAS 2009). La significancia estadística de los efectos fijos fue testada mediante el valor F computado por el procedimiento, y los contrastes entre medias fueron realizados mediante la prueba HSD de Tukey. Las relaciones entre variables fueron realizadas a través de análisis de regresión lineal simple.



5. Resultados y Discusión

5.1 Niveles de tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L)

Los niveles de σ_L obtenidos a distintas alturas y exposiciones del fuste se encontraron en un rango de 10,5 a 56,1 MPa, con una media global de 28,3 MPa y un coeficiente de variación (*CV*) de 31,4%. Una alta variabilidad ha sido reportada entre árboles de una misma especie, y también dentro de un mismo árbol, para los niveles de σ_L (Nicholson 1973), y también para su estimador, el *GSI* (Raymond *et al.* 2004, Muneri *et al.* 1990). El amplio rango de σ_L observados en este estudio, posiblemente refleja tales diferencias.

La magnitud promedio encontrada para las σ_L , es superior a la que reportan árboles de la misma especie a la edad de 8 años (Chafe 1990), y a la que reportan árboles adultos de *Eucalyptus oblicua* (Nicholson 1973) y *Eucalyptus regnans* (Nicholson 1973, Chafe 1990), sin embargo, es menor a la que exhiben árboles de *Eucalyptus dunnii* a los 8, 13, 15 y 19 años de edad (Trugilho y Oliveira 2008) y similar a la que presentan clones de *Eucalyptus* a los 6 años (Trugilho *et al.* 2002). Aun así, se encuentra dentro del rango de valores publicados para distintas especies del género *Eucalyptus*. Aunque también, se debe considerar en las comparaciones más directas, que las metodologías empleadas para estimar las σ_L , difieren entre la mayoría de los estudios, al igual que las posiciones en el fuste en que estas σ_L son muestreadas.

En el caso del *GSI*, obtenido a través de un método estándar “CIRAD-Fôret”, es ampliamente utilizado para estimar el nivel de σ_L . Como referencia, los niveles del *GSI* encontrados en este estudio tuvieron un valor medio de 147 μm , con un *CV* de 26,1%; y son similares a los que reportan árboles de la misma especie a la edad de 15 años, creciendo en la misma área de estudio (Díaz *et al.* 2012), pero son bastante mayores al *GSI* medio de 58 μm (Medhurst *et al.* 2011) y 70 μm (Valencia *et al.* 2011), que reportan árboles de *E. nitens* de 22 años creciendo en Australia. No obstante, en estos estudios el *GSI* fue medido sólo a 1,3 m sobre el nivel del suelo.

5.2 Variación fustal de las tensiones de crecimiento longitudinales, indicador de la tensión de crecimiento y módulo de elasticidad de la madera en tensión

Los resultados del análisis de los efectos fijos (Tabla 1), indicaron que la altura en el fuste tuvo un efecto altamente significativo sobre las σ_L , el GSI y el E_T . Para el caso de la exposición en el fuste, su efecto fue altamente significativo en las σ_L y el GSI , y significativo en el E_T . La interacción altura-exposición no tuvo un efecto en las σ_L , GSI y E_T .

Tabla 1. Significancia de los efectos: altura y exposición en el fuste, y de su interacción, en las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T).

Efectos	σ_L		GSI		E_T	
	F-Valor	Pr > F	F-Valor	Pr > F	F-Valor	Pr > F
Altura	17,27	<0,001	9,05	<0,001	15,55	<0,001
Exposición	11,22	<0,001	10,57	<0,001	3,28	<0,05
Altura*Exposición	0,57	0,8170	0,77	0,6475	0,80	0,6170

El efecto individual de la altura en el fuste, sobre las σ_L , el GSI y el E_T , se presenta en la Tabla 2. Los niveles medios de σ_L encontrados al 33% de la AC (34,8 MPa), fueron significativamente mayores a los encontrados en las otras alturas de muestreo ($P < 0,05$). De esta misma posición (33% de la AC), la magnitud de las σ_L disminuyó de forma significativa con la altura, hasta la AC . Los mayores niveles del GSI , también fueron encontrados al 33% de la AC siendo significativo respecto al resto ($P < 0,05$), sin embargo, no se reportaron diferencias entre las otras alturas. En el caso del E_T , sus valores más altos fueron encontrados al 33 y 66% de la AC , y fueron significativamente mayores a los encontrados en la altura de 2 m ($P < 0,05$).

Tabla 2. Efecto de la altura en el fuste sobre las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T), junto con los valores medios obtenidos por altura.

Altura	σ_L (MPa)	GSI (μm)	E_T (MPa)
2 m	26,0 bc	147 b	14366,1 c
33% AC	34,8 a	167 a	16819,9 a
66% AC	28,4 b	144 b	16011,1 ab
AC	24,1 c	129 b	15204,3 bc

NOTA: Promedios seguidos de letras iguales en la misma columna no difieren significativamente a $P < 0,05$.

En general, los niveles medios de las σ_L , del GSI y del E_T , tendieron a aumentar desde la base del fuste (altura de 2 m) hasta el 33% de la AC, y desde esta misma posición, disminuyeron con la altura, hasta la AC. Los patrones de variación axial en el fuste, para las σ_L , el GSI y el E_T , aún no han sido bien entendidos, especialmente en árboles adultos de *Eucalyptus*. Aun así, el aumento en los niveles del GSI encontrado en este estudio, entre los 2 m y el 33% de AC (8 m), concuerda con el que reportan árboles de *Eucalyptus globulus*, a los 20 y 23 años de edad, entre los 1,3 y 3,7 m (Raymond *et al.* 2004).

Árboles jóvenes de *E. nitens*, a la edad de 8 años, reportan una disminución en los niveles de tensiones de crecimiento, módulo de elasticidad de la madera y deformación longitudinal, con la altura en el fuste, entre los 1,5 y 15 m (Chafe 1985). En el presente estudio, las σ_L , el GSI y el E_T , mostraron un patrón similar, pero entre los 8 y 24 m. Al parecer, tanto en árboles jóvenes como en árboles adultos de *E. nitens*, estas variables mecánicas disminuyen con la altura en el fuste. Sin embargo, la altura axial para los mayores niveles de estas variables mecánicas, parece diferir con la edad de los individuos.

El efecto individual de la exposición en el fuste, sobre las σ_L , el GSI y el E_T , se presenta en la Tabla 3. Los niveles de σ_L encontrados en la exposición Sur del fuste, fueron estadísticamente mayores ($P < 0,05$) a los encontrados en la exposiciones Norte y Oeste. En el caso del GSI , solo los valores encontrados en la exposición Norte fueron distintos, y significativamente

menores ($P < 0,05$). Los valores de E_T observados en la exposición Sur, fueron mayores y diferentes estadísticamente a los observados en la exposición Oeste ($P < 0,05$).

Tabla 3. Efecto de la exposición en el fuste sobre las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T), junto con los valores medios obtenidos por exposición.

Exposición	σ_L (MPa)	GSI (μm)	E_T (MPa)
Sur	32,0 a	158 a	16324,7 a
Este	30,6 ab	161 a	15369,6 ab
Oeste	27,0 bc	143 a	15307,5 b
Norte	23,7 c	124 b	15399,3 ab

NOTA: Promedios seguidos de letras iguales en la misma columna no difieren significativamente a $P < 0,05$.

Variaciones en los niveles de σ_L con la exposición en el fuste, reportadas en árboles adultos de *E. regnans* y *E. oblicua*, son principalmente asociadas a los requerimientos de soporte del árbol (Nicholson 1973), y además, los altos niveles de tensiones de crecimiento, son asociados a la presencia de madera de reacción (Yang y Waugh 2001). Diferencias en los niveles de GSI entre exposiciones, también han sido reportadas en árboles de *E. nitens* (Valencia *et al.* 2011, Díaz *et al.* 2012) y *E. globulus* (Raymond *et al.* 2004, Vignote *et al.* 1996), y los mayores niveles de GSI , reportados en ciertas exposiciones del fuste, son principalmente atribuidos a los efectos del viento predominante (Vignote *et al.* 1996, Medhurst *et al.* 2011, Valencia *et al.* 2011, Díaz *et al.* 2012).

En árboles de *E. nitens* de 15 años de edad, crecidos en la misma área que los árboles utilizados en este estudio, se reportan diferencias significativas en los niveles de GSI y módulo de elasticidad dinámico de la madera, entre las exposiciones Norte y Sur del fuste, los cuales fueron siempre mayores en la exposición Sur (barlovento), frente a los vientos predominantes del lugar (Díaz *et al.* 2012). En el presente estudio, los niveles de σ_L , GSI y E_T encontrados en la exposición Sur, también fueron mayores a los encontrados en la exposición

Norte del fuste. En efecto, las demandas mecánicas producidas por los vientos predominantes, pueden ser sugeridas como una de las posibles causas de las variaciones encontradas.

Aunque los árboles estudiados se encontraban aparentemente rectos, éstos presentaron una alta variabilidad dentro del fuste, en los niveles de σ_L , GSI y E_T . Sin embargo, también se ha señalado que en fustes verticales, las σ_L son desarrolladas como una adaptación a las demandas mecánicas sobre el fuste (Gartner 1997), como una respuesta o en “anticipación” a éstas.

De acuerdo con los resultados encontrados en este estudio, los mayores niveles de tensiones de crecimiento longitudinales se encontraron al 33% de la AC del árbol, así como también, estas tensiones fueron significativamente mayores en la exposición Sur a lo largo del fuste aserrable. Por lo tanto, se espera que en esta altura y exposición a lo largo del fuste, se presenten los mayores defectos asociados a las altas tensiones de crecimiento.

5.3 Relaciones entre las tensiones de crecimiento longitudinales, indicador de la tensión de crecimiento y módulo de elasticidad de la madera en tensión

La relación encontrada entre el GSI y el E_T , aunque fue significativa ($P < 0,05$), fue bastante débil ($R^2 = 0,035$, Figura 2a). Relaciones similares han sido reportadas en árboles de *E. globulus* (Yang y Ilic 2003), y en árboles de *E. nitens* y *E. regnans* (Chafe 1990), pero entre el módulo de elasticidad de la madera y la deformación longitudinal, sin embargo, en ninguno de los casos esta relación fue significativa.

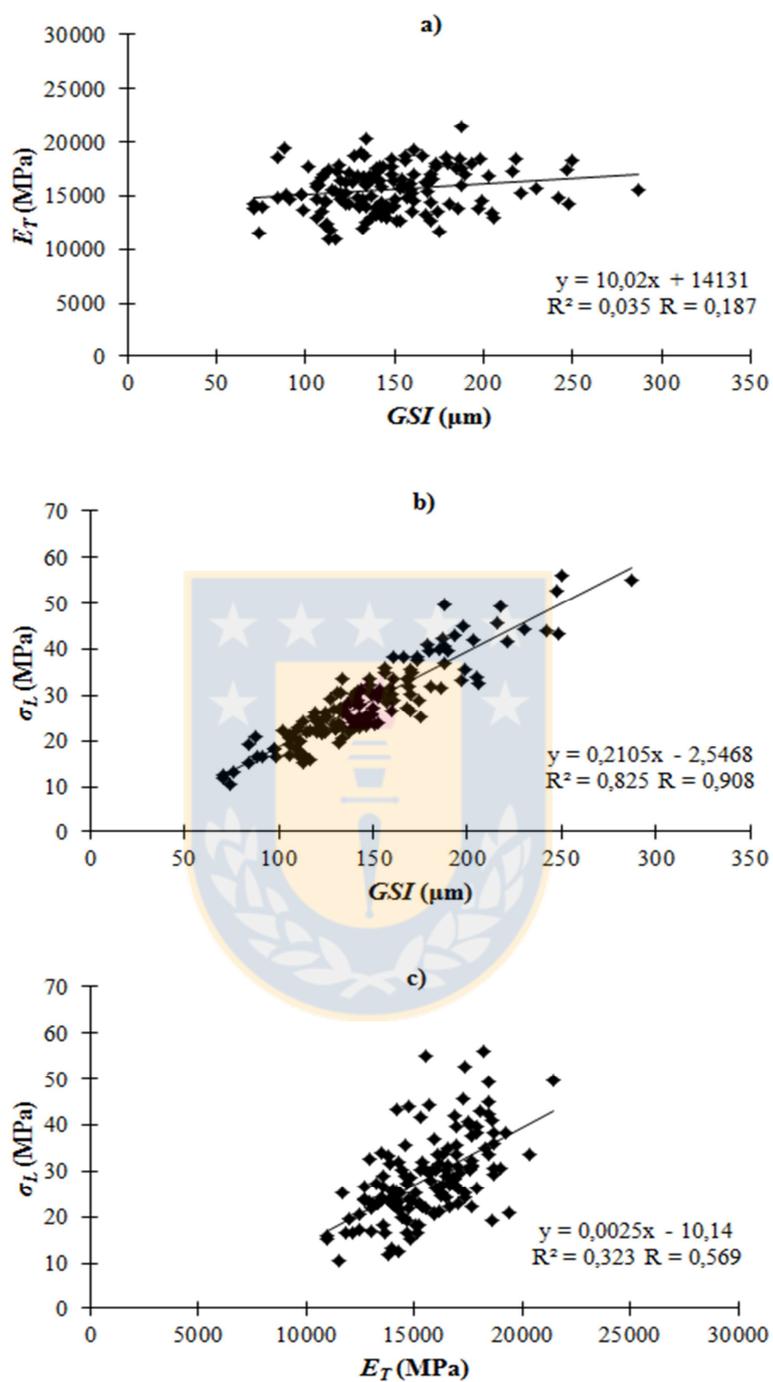


Figura 2. Relaciones entre las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T). a) E_T versus GSI , b) σ_L versus GSI , y c) σ_L versus E_T .

La relación encontrada entre las σ_L y el GSI fue fuerte y significativa ($P < 0,01$), con un coeficiente de correlación igual a 0,91 (Figura 2b). Esta fuerte correlación encontrada entre el σ_L y el GSI , es similar a la que reportan árboles de *E. dunnii* a las edades de 13, 15 y 19 años (Trugilho y Oliveira 2008), y también similar a la relación entre el σ_L y la deformación longitudinal que reportan árboles de *E. globulus* de 10 años (Yang y Ilic 2003) y árboles de *E. nitens* y *E. regnans* de 8 y 36 años respectivamente (Chafe 1990).

La relación entre las σ_L y el E_T fue significativa ($P < 0,01$) y positiva ($R = 0,57$, Figura 3), pero más débil a la relación encontrada entre las σ_L y el GSI . En árboles de la misma especie, a la edad 10 años, se han reportado relaciones similares pero poco consistentes (Chauhan y Walker 2004).

Aunque los valores de E_T y GSI están involucrados en el cálculo de las tensiones de crecimiento, la contribución efectiva de cada uno de ellos, puede ser examinada a través de su relación con los niveles de σ_L (Chafe 1990). Como se muestra en la Figura 2b, la relación entre las σ_L y el GSI fue más fuerte y significativa que la relación entre las σ_L y el E_T (Figura 2c), y de acuerdo con Trugilho y Oliveira (2008), estos resultados indican que la influencia del GSI , en la estimación de los niveles de σ_L , es mayor a la del E_T , por lo tanto, el GSI puede ser utilizado como un buen estimador de las tensiones de crecimiento.

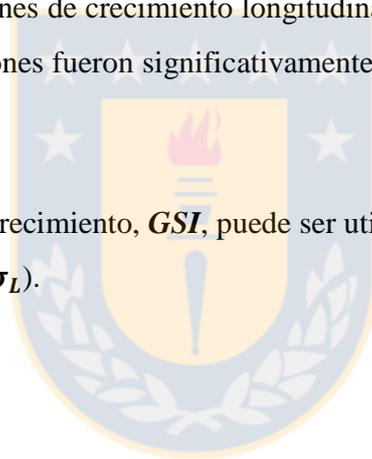
6. Conclusiones

Los niveles de tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), encontrados en árboles de *E. nitens* con dimensiones aserrables, estuvieron en un rango de 10,5 a 56,1 MPa, y en general, se encuentran dentro del rango de valores publicados para especies del género *Eucalyptus*.

Las tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L), el indicador de la tensión de crecimiento (GSI) y el módulo de elasticidad de la madera en tensión (E_T), variaron significativamente a través de las alturas y exposiciones en el fuste.

Los mayores niveles de tensiones de crecimiento longitudinales (σ_L) se encontraron al 33% de la AC del árbol. Y estas tensiones fueron significativamente mayores en la exposición Sur a lo largo del fuste aserrable.

El indicador de la tensión de crecimiento, GSI , puede ser utilizado como un buen estimador de las tensiones de crecimiento (σ_L).



7. Bibliografía

- Adamopoulos, S.; Passialis, C.; Voulgaridis, E. 2007. Strength properties of juvenile and mature wood in black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Wood and Fiber Science* 39 (2): 241-249.
- Baillères, H. 1994. Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'*Eucalyptus* (Pointe Noire – Congo): hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques. L'Université de Bordeaux I, 162 pp.
- Biblis, E.J. 1965. Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. *Forest Products Journal* 15 (2): 81-88.
- Biblis, E.J. 2001. Tension parallel to grain, pure flexural stiffness, and modulus of rigidity of clear wood of seven eastern red oaks. *Forest Products Journal* 51 (4): 87-89.
- Biechele, T.; Nutto, L.; Becker, G. 2009. Growth strain in *Eucalyptus nitens* at different stages of development. *Silva Fennica* 43 (4): 669-679.
- Bodig, J.; Jayne, A. 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold Company Inc. 712 p.
- Chafe, S.C. 1985. Variation in longitudinal growth stress with height in trees of *Eucalyptus nitens* Maiden. *Australian Forest Research* 15 (1): 51-55.
- Chafe, S.C. 1990. Relationships among growth strain, density and strength properties in two species of *Eucalyptus*. *Holzforschung* 44 (6): 431-437.
- Chauhan, S.; Walker, J. 2004. Relationships between longitudinal growth strain and some wood properties in *Eucalyptus nitens*. *Australian Forestry* 67 (4): 254-260.

- Díaz, S.; Espinoza, M.; Valenzuela, L.; Cancino, J.; Lasserre, J.P. 2012. Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 14 (3): 373-388.
- Fournier, M.; Chanson, B.; Thibaut, B.; Guitard, D. 1994. Mesures des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres, en relation avec leur morphologie. Observations sur différentes espèces. *Annals of Forest Science* 51: 249-266.
- Gartner, B.L. 1997. Trees have higher longitudinal growth strains in their stems than in their roots. *Journal Plant Science* 158 (4): 418-423.
- INFOR. 2004. *Eucalyptus nitens* en Chile: Primera monografía. Informe Técnico N°165. Valdivia, Chile. Instituto Forestal. 143 p.
- Malan, F.S.; Gerischer, G.F.R. 1987. Wood property differences in South African grown *Eucalyptus grandis* trees of different growth stress levels. *Holzforschung* 41 (6): 331-335.
- Medhurst, J.; Ottenschlaeger, M.; Wood, M.; Harwood, C.; Beadle, C; Valencia, J.C. 2011. Stem eccentricity, crown dry mass distribution, and longitudinal growth strain of plantation-grown *Eucalyptus nitens* after thinning. *Canadian Journal of Forest Research* 41: 2209-2218.
- Muneri, A.; Leggate, W.; Palmer, G. 1999. Relationships between surface growth strain and some tree, wood and sawn timber characteristics of *Eucalyptus cloeziana*. *Southern African Forestry Journal* 186: 41-49.
- Nicholson, J.E. 1973. Growth stress differences in eucalypts. *Forest Science* 19: 169-174.

- Raymond, C.A.; Kube, P.D.; Pinkard, L.; Savage, L.; Bradley, A.D. 2004. Evaluation of non-destructive methods of measuring growth stress in *Eucalyptus globulus*: relationships between strain, wood properties and stress. *Forest Ecology and Management* 190: 187-200.
- SAS Institute inc. 2009. SAS/STAT ® 9.2 user's guide, second edition. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Timoshenko, S. 1955. Strength of materials. 3rd. Ed. Part I. Elementary theory and problems. Van Nostrand, New York. (citado por Biblis (1965)).
- Touza, M.C. 2001. Tensiones de crecimiento en *Eucalyptus globulus* de Galicia (España). Influencia de la silvicultura y estrategias de aserrado. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 3 (1-2): 68-89.
- Trugilho, P.F.; Lima, J.T.; Rosado, S.C.S.; Mendes, L.M.; Mori, F.A.; Souza, M.A.M. 2002. Avaliação da tensão de crescimento em clones de *Eucalyptus*. *Floresta e Ambiente* 9 (1): 38-44.
- Trugilho, P.F.; Lima, J.T.; de Pádua, F.A.; de Carvalho, L.; Andrade C.R. 2006. Deformação residual longitudinal (DRL) e tangencial (DRT) em seis clones de *Eucalyptus* spp. *Cerne* 12 (3): 279-286.
- Trugilho, P.F.; Oliveira, J.T. 2008. Relationships and estimates of longitudinal growth stress in *Eucalyptus dunnii* at different ages. *Revista Árbore* 32 (4): 723-729.
- Valdés, R. 2004. Determinación de tensiones de crecimiento de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden mediante un método no destructivo. Memoria de título para optar al grado de ingeniero en industrias de la madera, Universidad de Talca, Chile. 48 p.

- Valencia, J.C.; Cabrera, J.A. 2009. Modelo de consorciamiento ciencia-empresa orientado a rentabilizar plantaciones de *Eucalyptus nitens* en Chile. ECOGESTION 2009. Primera reunión sobre planificación y legislación forestal. p. 42-49.
- Valencia, J.; Hardwood, C.; Washusen, R.; Morrow, A.; Wood, M.; Volker, P. 2011. Longitudinal growth strain as a log and wood quality predictor for plantation-grown *Eucalyptus nitens* sawlogs. *Wood Science and Technology* 45: 15-34.
- Vignote, S.; Molinero, I.; Gerard, J.; Diez, M.R. 1996. Estudio de las tensiones de crecimiento de *Eucalyptus globulus* Labill en Galicia y su relación con las características de estación y morfológicas del propio árbol. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 5 (1): 153-165.
- Yang, J.L.; Fife, D.; Matheson, A.C. 2001. Growth strain in three provenances of plantation-grown *Eucalyptus globulus* Labill. *Australian Forestry* 64 (4): 248–256.
- Yang, J.L.; Waugh, G. 2001. Growth stress, its measurement and effects. *Australian Forestry* 64 (2): 127-135.
- Yang, J.L.; Ilic, J. 2003. A new method of determining growth stress and relationships between associated wood properties of *Eucalyptus globulus* Labill. *Australian Forestry* 66 (2): 153-157.
- Yang, J.L.; Baillères, H.; Okuyama, T.; Muneri, A.; Downes, G. 2005. Measurement methods for longitudinal surface strain in trees: a review. *Australian Forestry* 68 (1): 34-43.