

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN VISUAL
ESTRUCTURAL PARA MADERA DE PINOS DEL NORESTE URUGUAYO**

por

Andrea CARDOSO MACIEL

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias opción
Ciencias Vegetales

MONTEVIDEO
URUGUAY
Agosto 2018

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Dr. Gustavo Daniluk, Dra. Vanesa Baño, PhD. Abel Vega y Dr. Andrés Dieste, el 21 de agosto de 2018. Autora: Ing. Agr. Andrea Cardoso. Directora Dra. Laura Moya, Co-directora Ing. Agr. (MSc.) Alejandra Borges.

AGRADECIMIENTOS

A Laura y Alejandra por su paciencia y dedicación a lo largo de todo este trabajo de tesis, muchas gracias. A Hugo, Matías, Francisco, Martín, Eduardo, Ignacio, Javier, Alicia y Patricia por ayudarme, enseñarme, acompañarme y aconsejarme durante mi pasaje por LATU. Sin ellos este trabajo no hubiera sido posible. A Vanesa y Hugo también, por sus comentarios y grandes aportes en la preparación de los Seminarios y siempre que lo necesité. A mis padres por su apoyo incondicional, y en especial a Paco y a Inés.

Agradezco a LATU por el apoyo al proyecto “Clasificación visual de madera de pino en grados estructurales” en el que se incluye este trabajo de tesis. A la Dirección Nacional de Industrias de MIEM por la financiación del mismo. A todo el personal de los aserraderos, en Tacuarembó y en Rivera.

Muchas gracias a todos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>.....	1
1.1. CLASIFICACIÓN VISUAL DE LA MADERA.....	2
1.2. VARIABLES VISUALES.....	5
1.2.1. <u>Anillos de crecimiento</u>.....	5
1.2.2. <u>Nudos</u>.....	6
1.2.3. <u>Médula</u>.....	6
1.2.4. <u>Arista faltante y corteza</u>.....	7
1.2.5. <u>Combado, encorvadura y torcedura</u>.....	7
1.2.6. <u>Grietas y rajaduras</u>.....	8
1.3. RELACIÓN ENTRE VARIABLES VISUALES Y PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA.....	8
1.3.1. <u>Anillos de crecimiento</u>.....	8
1.3.2. <u>Nudosidades y propiedades mecánicas de flexión</u>.....	9
1.3.3. <u>Médula</u>.....	9
1.3.4. <u>Estimación del módulo de elasticidad por técnicas no destructivas</u>.....	10
1.4. MODELADO.....	11
1.4.1. <u>Árboles de regresión</u>.....	12
1.4.2. <u>Bosques aleatorios</u>.....	13
1.4.3. <u>Modelos generalizados aditivos</u>.....	14
1.5. CONTEXTO NORMATIVO.....	15
1.6. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	18
1.7. DESARROLLO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	19

<u>2. PREDICTION OF BENDING STIFFNESS OF URUGUAYAN LOBLOLLY AND SLASH PINE TIMBER APPLYING DIFFERENTS STATISTICS TECHNIQUES.....</u>	20
2.1. INTRODUCTION.....	21
2.2. MATERIALS AND METHODS.....	23
2.2.1. <u>Phase 1</u>	24
2.2.2. <u>Phase 2</u>	25
2.2.3. <u>Property determination</u>	26
2.2.4. <u>Statistical analysis</u>	27
2.3. RESULTS AND DISCUSSION	28
2.3.1. <u>Influence of each individual variable on the modulus of elasticity</u>	28
2.3.1.1. Knots	28
2.3.1.2. Warp.....	29
2.3.1.3. Pith.....	29
2.3.1.4. Annual ring.....	29
2.3.1.5. Dynamic modulus of elasticity.....	30
2.3.2. <u>Multivariate analysis of modulus of elasticity prediction</u>	31
2.4. CONCLUSIONS.....	34
2.5. ACKNOWLEDGMENTS.....	34
2.6. REFERENCES.....	34
<u>3. DISEÑO DE REGLAS DE CLASIFICACIÓN VISUAL ESTRUCTURAL PARA MADERA DE PINO PROVENIENTE DE PLANTACIONES DE RÁPIDO CRECIMIENTO DEL NORESTE DE URUGUAY.....</u>	41
3.1. RESUMEN.....	41
3.2. SUMMARY.....	41
3.3. INTRODUCCIÓN.....	42
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
3.4.1. <u>Análisis de datos</u>	47
3.4.1.1. Análisis descriptivo de las piezas sin clasificar.....	48
3.4.1.2. Modelos de predicción del módulo de elasticidad.....	48
3.4.1.3. Formulación de la propuesta de clasificación visual.....	49

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
3.5.1. <u>Análisis descriptivo de las piezas sin clasificar</u>	49
3.5.2. <u>Modelos de predicción del módulo de elasticidad</u>	50
3.5.3. <u>Formulación de la propuesta de clasificación visual</u>	55
3.6. CONCLUSIONES.....	60
3.7. REFERENCIAS.....	60
4. <u>DISCUSIÓN GENERAL</u>	66
4.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO Y RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES VISUALES Y EL MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	66
4.1.1. <u>Nudos</u>	67
4.1.2. <u>Anillos de crecimiento</u>	67
4.1.3. <u>Alabeos</u>	68
4.1.4. <u>Médula</u>	68
4.1.5. <u>Módulo de elasticidad dinámico</u>	69
4.2. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DELMÓDULO DE ELASTICIDAD.....	69
4.2.1. <u>Modelado 1</u>	69
4.2.2. <u>Modelado 2</u>	70
4.3. UMBRALES.....	71
5. <u>CONCLUSIONES FINALES</u>	75
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	77

RESUMEN

La promoción de plantaciones de rápido crecimiento en las últimas tres décadas, ha provocado un aumento en la disponibilidad de madera aserrada uruguaya. Gran parte de la misma tendrá potencial uso estructural, en la medida que se cuente con especificaciones técnicas, usualmente estimadas mediante metodologías de clasificación no destructivas. Siguiendo esta línea, la tesis se planteó los siguientes objetivos: i) determinar las variables visuales con mayor influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas a flexión de vigas de *Pinus elliottii* y *P. taeda*; ii) realizar una propuesta de clasificación visual a partir de un modelado de estas variables con diferentes técnicas estadísticas; y iii) definir una calidad visual estructural para las vigas que se asocie a una clase resistente del cuerpo normativo europeo. Se utilizaron dos muestras de vigas de tamaño estructural provenientes de una plantación de *Pinus taeda* de 14 años ubicada en Tacuarembó, y otra de *P. elliottii* de 27 años en Rivera. Las muestras fueron evaluadas visualmente y por técnicas no destructivas, y luego ensayadas a flexión estática, para estimar el módulo de elasticidad dinámico, y la resistencia y rigidez de flexión. Se aplicaron técnicas estadísticas de Árboles de regresión, Bosques aleatorios y Modelos generalizados aditivos para seleccionar las variables visuales más relevantes y sus correspondientes límites, y predecir el módulo de elasticidad longitudinal. Número de anillos de crecimiento por centímetro, diámetro de nudo mayor de cara y de canto, encorvadura y torcedura, resultaron ser las variables visuales más relevantes para predecir el módulo de elasticidad longitudinal. Se formuló una propuesta de clasificación visual para la madera de pino del noreste de Uruguay, que incluyó dos calidades visuales: EC7 con propiedades que permiten su asignación a la clase de resistencia C14 de la norma Europea EN 338; y EC5, con valores medios de rigidez de 5458 MPa, y valores característicos de resistencia de flexión de 12 MPa, y de densidad de 0,317 g/cm³. La calidad EC5 permite recuperar 42% de la madera aserrada que no califica como EC7.

Palabras clave: Clasificación visual estructural, propiedades mecánicas, clases de resistencia, Modelos generalizados aditivos, pinos uruguayos de rápido crecimiento

DESIGN OF STRUCTURAL VISUAL GRADING METHODOLOGY FOR URUGUAYAN NORTHEASTERN PINES

SUMMARY

The promotion of fast growing plantations in the last three decades had increased the availability of Uruguayan sawn timber. Graded timber, with structural properties usually estimated by non-destructive evaluation, will have the potential for structural use. The objectives of the work were: i) to determine the visual variables with the greatest influence on the physical and mechanical properties of *Pinus elliottii* and *P. taeda* beams; ii) to propose a visual grading rule, based on models of these variables with different statistical techniques; and iii) to define a structural visual quality that could be associated with a strength class of the European standards. For this purpose an empirical project was developed using two samples comprised of structural size beams from two north-eastern plantations: one comprised of 14-year-old loblolly pine located at Tacuarembó, and a second, of 27-year-old slash pine located at Rivera. Specimens from both samples were first visually evaluated, and non-destructively tested to estimate the dynamic modulus of elasticity. Then the beams were destructively tested in 4-point bending to obtain the stiffness and strength. Statistical techniques of Regression Trees, Random Forests and Generalized Additive Models were applied to determine the most relevant visual parameters and their corresponding limits, for stiffness prediction. Number of growth rings per centimeter, major knot diameter, crook and twist, were the most relevant visual variables on the modulus of elasticity prediction. A grading rule for pine timber from northeast of Uruguay, including two visual grades was proposed: EC7 with properties corresponding to the strength class C14 of EN 338; and EC5, with mean stiffness of 5458 MPa, and characteristic values of bending strength of 12 MPa, and density of 0.317 g/cm³. The EC5 quality allowed to recover 42% sawn timber rejected in EC7.

Keywords: Visual strength grading, mechanical properties, strength classes, Generalized Additive Models, Uruguayan fast growth pine

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay, la superficie efectiva forestada es de 990.030 hectáreas, de la cual 26% está plantada principalmente con especies de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (MGAP, 2012). El 72% de la superficie ocupada por estas plantaciones está ubicada en la región noreste del país, en los departamentos de Rivera y Tacuarembó (MGAP, 2012), donde además, se encuentran instaladas las principales industrias de transformación mecánica de pino. Dieste (2012) estimó la oferta anual de madera de pino proveniente de esta zona para el período 2010-2030 en 3 millones de m³, de los cuales 1,7 millones m³/año son destinados a la transformación mecánica y el resto queda sin capacidad de industrialización. Según MGAP (2016) en el período 2010-2015 la tasa promedio de producción de madera aserrada de coníferas fue de 1,7 millones m³/año, constatándose una alta oferta proveniente del noreste del país. El procesamiento y agregado de valor a la madera de pino requiere entonces, de la instalación de mayor capacidad industrial, e incorporación tecnológica, tal como la clasificación por resistencia y la correspondiente asignación a clases resistentes. La madera aserrada clasificada según reglas normalizadas para cada especie, o conjunto de especies similares, y según su procedencia, permitirá agregarle valor comercial y potenciar sus usos.

Según la clasificación bioclimática de Koppen, Uruguay se encuentra en la zona “Cfa”. En comparación con otras zonas de país, la región noreste se caracteriza por presentar mayores precipitaciones y mejor distribuidas (1200-1300 mm promedio anuales), mayor radiación solar incidente, factores que aceleran el crecimiento de las plantaciones de *P. elliottii* y *P. taeda* (Brussoni y Cabris, 2006). El manejo silvícola, es similar para ambas especies, distinguiéndose únicamente la localización de las plantaciones: *P. taeda* en los altos del relieve, y *P. elliottii* en las laderas bajas por su mayor resistencia a las condiciones de anegamiento. Las podas y raleos que frecuentemente se aplican a estas plantaciones lleva a disponer de madera de raleos de 10-15 años, y en el caso de los árboles que se dejan hasta el turno final (20-25 años), este manejo incluye una o dos podas por altura (Pou, 2016). El manejo

silvícola y la rapidez de crecimiento de los árboles permite obtener diámetros comercialmente aserrables (450-600 mm) a los 20-25 años, priorizando la producción en volumen aserrables frente a la calidad en propiedades mecánicas de la madera. Varios autores indican que en coníferas el mayor porcentaje de madera juvenil se desarrolla entre los 5 o 10 años y los 20 años (Tuset y Durán 2008, Green *et al.* 1999), coincidente con la edad de corte. La madera de pino con altos porcentajes de madera juvenil se caracteriza por presentar valores de propiedades físicas y mecánicas inferiores a los de la madera madura (Kretschmann y Bendtsen, 1992). Por otro lado, no se han encontrado diferencias significativas en las propiedades físicas y mecánicas entre las especies de *P. elliotii* y *P. taeda* plantados en Uruguay (O'Neill y Tarigo 2008, O'Neill *et al.* 2004), y es usual encontrar en el mercado, madera comercializada en forma mezclada e indistinta de una u otra especie (Baño *et al.* 2015, Moya *et al.* 2015) razón por la que se estudian juntas.

Los destinos comerciales de la madera de pino nacional en Uruguay, son principalmente la producción de madera aserrada y de tableros contrachapados, y como material combustible para calderas. Información de la Dirección General Forestal (MGAP, 2016) indica que la producción de madera aserrada de pino viene incrementándose en los últimos años, alcanzando en 2015 un volumen máximo de 209 mil m³. Esta madera es volcada al mercado sin especificaciones técnicas sobre sus propiedades físicas y mecánicas, esto es, contenido de humedad, densidad, rigidez y resistencias, y por tanto, sin distinción de calidad y precio.

1.1. CLASIFICACIÓN VISUAL DE LA MADERA

La clasificación de la madera se realiza con fines de apariencia, para fabricación de muebles y carpintería, o con fines estructurales, para arquitectura e ingeniería civil. La clasificación consiste en agrupar piezas con características similares a partir del análisis individual de cada pieza. En la clasificación por apariencia se evalúa visualmente la mejor cara de una pieza considerando las singularidades de

crecimiento del árbol que desmejoran el aspecto general de la cara (Wagner, 2010). En la clasificación estructural, esto es, por resistencia, las piezas son agrupadas en calidades estructurales asociadas a valores de propiedades mecánicas y densidad. La clasificación por resistencia puede ser visual o mecánica. En la clasificación visual un operario entrenado evalúa la presencia y el tamaño de las singularidades (nudos, anillos de crecimiento, alabeos, rajaduras, grietas, etc.) que presenta la pieza, y la asigna a una calidad visual, con propiedades estructurales que se corresponden a una determinada clase resistente o grado estructural. En la clasificación mecánica por resistencia, la asignación a una clase resistente es realizada por un equipo que utiliza un modelo de clasificación incorporado. A nivel mundial, estas formas de clasificación están normalizadas, aunque no son de aplicación directa, debido a las diferencias de crecimiento entre las especies de distintas procedencias.

La clasificación visual por resistencia, asigna a cada pieza una calidad visual, a partir de la presencia de ciertos parámetros visuales y los límites establecidos para los mismos. La clasificación se basa en la influencia que los parámetros visuales ejercen sobre las propiedades mecánicas de la madera, y la medición de los mismos se realiza con ese objetivo. Los parámetros visuales se relacionan con la forma de crecimiento de los árboles (número de anillos de crecimiento, nudosidades, presencia de médula), con la forma de aserrado (aristas faltantes y presencia de corteza), con la forma de secado (alabeos, rajaduras, grietas), entre otros (Figura 1).

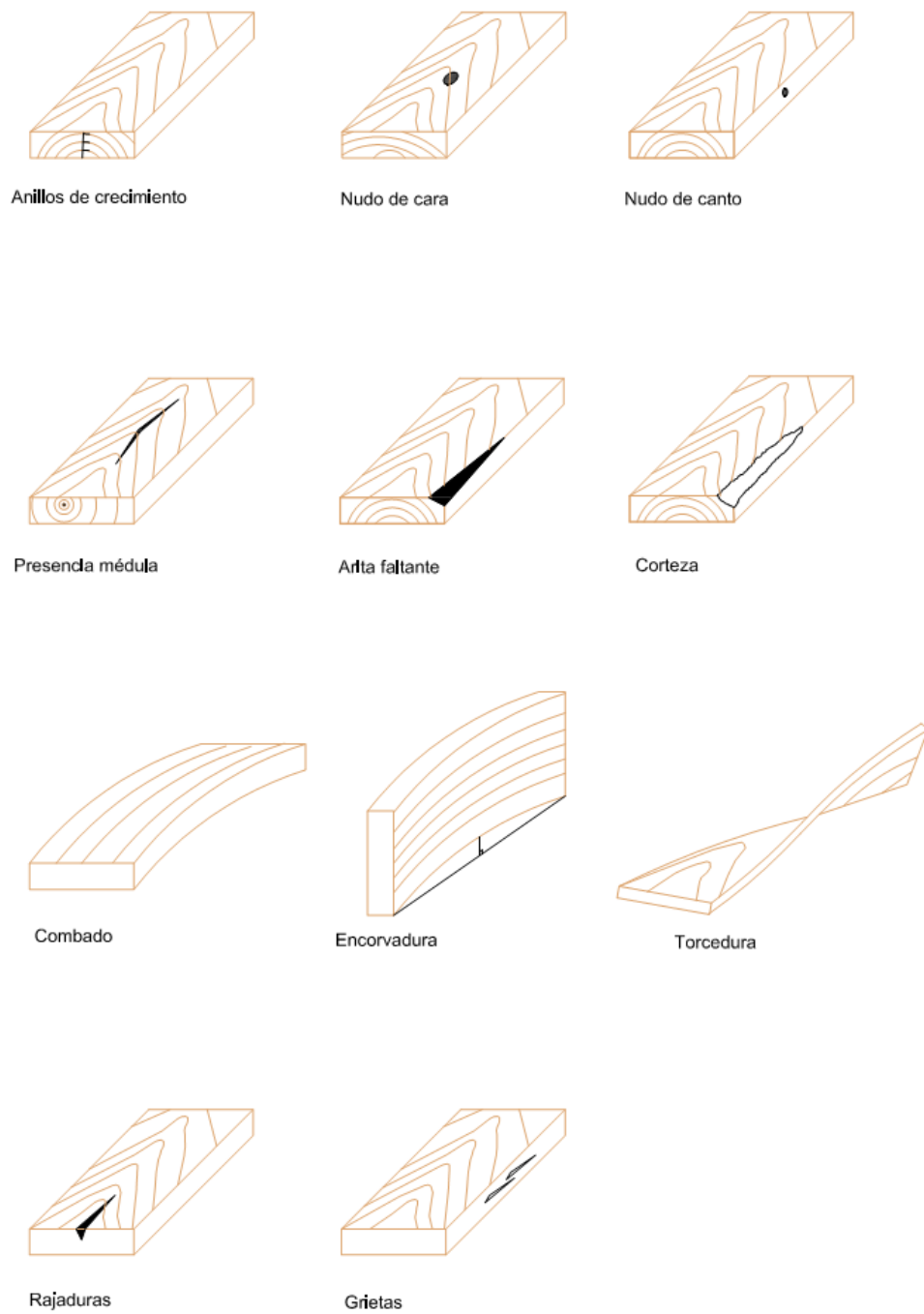


Figura 1. Parámetros visuales comúnmente evaluados en madera de coníferas.

1.2. VARIABLES VISUALES

Los parámetros visuales con mayor influencia en la calidad estructural de la madera de pino y su metodología de medición, se detallan a continuación:

1.2.1. Anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento se observan en la sección transversal de la pieza de madera, formando círculos concéntricos de diferente tonalidad. Cada anillo está formado por el leño temprano y el leño tardío, que corresponden a la madera generada al comienzo y al final, respectivamente, del período de crecimiento anual; siendo este último de una tonalidad más oscura y de menor ancho que el primero (Tuset y Durán, 2008). Se registra indistintamente, el número de anillos por unidad de longitud, o el ancho máximo del anillo de crecimiento (AENOR 2011, IRAM 2005). Ambas mediciones se realizan en dirección radial, sobre el segmento de recta de mayor longitud que siendo perpendicular a los anillos tenga su origen en la médula; en caso de ausencia de ésta, el registro se realiza sobre el segmento de recta de mayor longitud que siendo perpendicular a los anillos pase por el centro de la sección transversal. Sobre la longitud de ese segmento de recta se contabiliza el número de anillos completos (Figura 2).

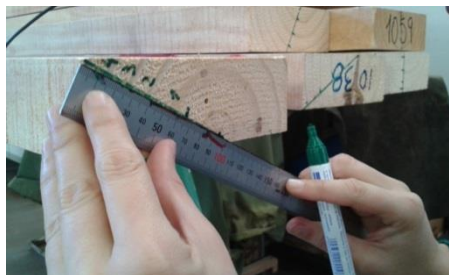


Figura 2. Anillos de crecimiento en una pieza de madera de pino.

1.2.2. Nudos

Se originan a partir de una rama que queda incluida en la pieza de madera. Se presentan como círculos u óvalos, generalmente con resina, con tonalidades más oscuras que el resto del leño (Baño *et al.* 2015, Tuset y Durán 2008). Pueden observarse en caras o cantos de la pieza. En general se considera el diámetro de los nudos de la pieza. Se registra el mayor diámetro del nudo medido de forma perpendicular al eje longitudinal de la pieza (Figura 3).

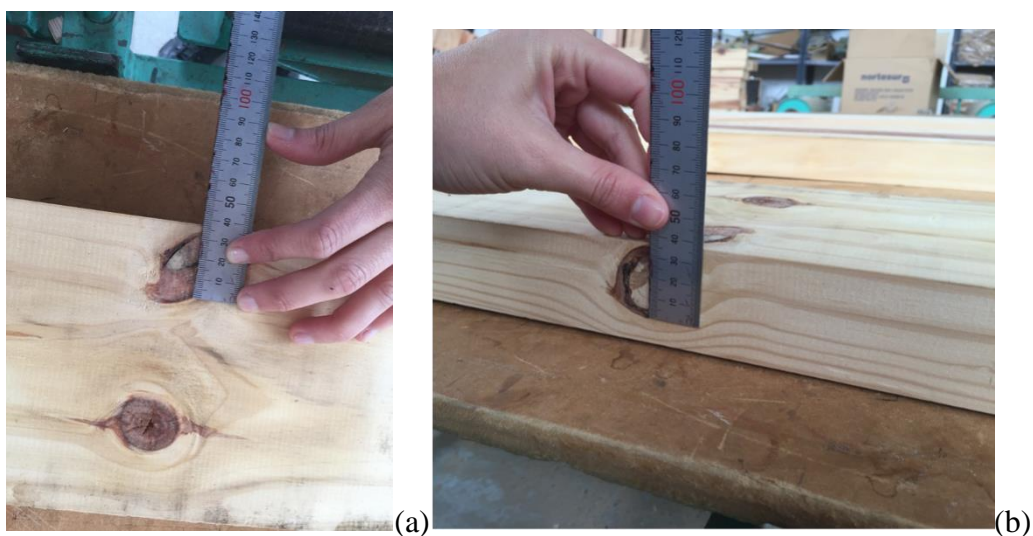
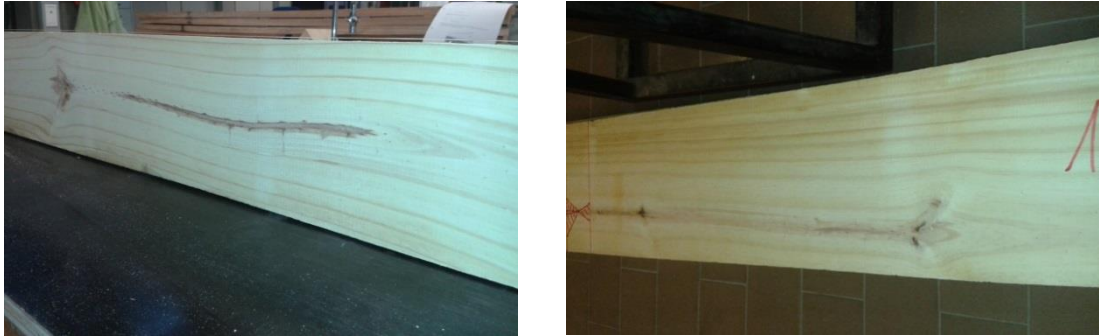


Figura 3: Nudo de cara (a) y nudo de canto (b) en una pieza de madera de pino

1.2.3. Médula

Tejido de aspecto esponjoso de color marrón oscuro, que se observa en el interior del primer anillo de crecimiento. Sus propiedades mecánicas son inferiores a las del leño que la rodea, relacionándose su presencia con madera juvenil (Baño *et al.*, 2015). En general se registra su presencia o ausencia en la pieza. Algunas normas incluyen el registro de su posición respecto al ancho de la pieza: centrada (si está ubicada principalmente en los dos cuartos centrales) o descentrada (si la mayor parte se encuentra en alguno de los cuartos exteriores) (Figura 4).



a)

b)

Figura 4: Posición de la médula centrada (a) y descentrada (b) en una pieza de madera de pino

1.2.4. Arista faltante y corteza

Superficie redondeada dada por la forma del tronco, con o sin corteza, que se manifiesta en las aristas de la pieza debido a la forma de aserrado. La diferencia entre arista faltante y corteza, es la ausencia o presencia de esta última en la pieza de madera. En ambos casos se miden sus dimensiones respecto al canto y a la cara de la pieza. En caso de existir más de una arista faltante o corteza, se registran los valores de la mayor (AENOR, 2011).

1.2.5. Combado, encorvadura y torcedura

Son deformaciones referidas también como “alabeos”, que se producen debido a las tensiones generadas durante del proceso de secado, y que generalmente están asociadas a la presencia de madera juvenil. El combado y la encorvadura son las deformaciones máximas que se producen en la cara y en el canto de la pieza, respectivamente (Figura 1) medidas ambas sobre una longitud de 2 metros respecto al eje longitudinal de la pieza. La torcedura es la deformación máxima de la superficie sobre una longitud de 2 metros medida desde el extremo de la pieza (Figura 1).

1.2.6. Grietas y rajaduras

Toda separación de las fibras en la dirección longitudinal, que generalmente provocada por el proceso de secado de la madera o por daños previos sobre el árbol, tales como durante su derribo, heladas, rayos, etc. Se diferencian grietas y rajaduras, en las primeras, la separación de las fibras se observa en una cara o en un canto solamente, mientras que en las segundas la separación se propaga en dos cantos o caras de la pieza (Figura 1). En general se registra el largo de la grieta o rajadura, y en caso de observarse más de una, se computa la sumatoria de las longitudes individuales. Se desprecian las grietas que presentan profundidades menores a un centímetro (AENOR, 2011).

1.3.RELACIÓN ENTRE VARIABLES VISUALES Y PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA

Los parámetros descritos en la sección anterior influyen sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera (Green *et al.* 1999, Kretschmann y Green 1999, Hoffmeyer 1995). En el caso de la madera de pino nacional, se ha reportado que algunos de estos parámetros afectan particularmente el módulo de elasticidad (Moya *et al.*, 2015), propiedad fundamental para el diseño y cálculo de estructuras (Moore, 2012).

1.3.1. Anillos de crecimiento

La velocidad de crecimiento, usualmente detectada a través de los anillos de crecimiento, puede estar relacionada o no con la densidad de la madera, dependiendo de la especie y la forma de crecimiento de los árboles. Saranpaa (2003) observó que en maderas de corte abrupto entre leño temprano y leño tardío, como la de *P. taeda* o *P. elliotii*, la velocidad de crecimiento prácticamente no tuvo influencia sobre la densidad. Por su parte, Megraw citado por Zobel y Sprague (2012) en su trabajo sobre madera juvenil de *P. taeda*, obtuvo una correlación negativa entre el ancho de anillo de crecimiento y la densidad.

La relación de los anillos de crecimiento con la rigidez, fue estudiada por Haselein *et al.* (2000) en madera de *P. elliottii* de 30 años procedente del sur de Brasil, e indicaron que a mayor número de anillos por centímetro, mayores son los valores del módulo de elasticidad. En línea con estas observaciones, Fank *et al.* (2016) compararon la incidencia del ancho de los anillos de crecimiento sobre la flexión y la tracción en madera de *Pinus elliottii* y *P. taeda* del nordeste de Argentina, y entre sus resultados observaron una relación inversa entre el ancho del anillo de crecimiento y la resistencia de flexión ($r = -0,52$). Contrariamente, Fernández-Golfín *et al.* (1997) y Fernández-Golfín y Diez (1994) en trabajos sobre coníferas españolas concluyeron que no hay influencia del ancho de los anillos de crecimiento sobre la rigidez de la madera. Estas diferencias en los resultados entre maderas de distintas procedencias justifica el estudio del comportamiento de las maderas en Uruguay.

1.3.2. Nudosidades y propiedades mecánicas de flexión

Respecto a las nudosidades, varios autores señalaron una relación inversa entre el tamaño de los nudos y la resistencia o la rigidez de una pieza de madera (Moya *et al.* 2015, Vega 2013, Guillaumet *et al.* 2007). Fank *et al.* (2017) reportaron para madera de pino resinoso argentino, una relación significativamente mayor entre nudosidad y resistencia a flexión ($r = 0,67$) que entre nudosidad y rigidez. Dávalos y Limón (2009) para madera de pino Durango mexicano presentaron coeficientes de determinación $r = 0,62$ y $r = 0,64$ para la regresión lineal entre la razón de área nudosa (relación entre superficie nudosa y total) y el módulo de elasticidad, y respecto a la resistencia, respectivamente. Gaunt (2005) para madera de pino radiata y Douglas –fir de Nueva Zelanda obtuvo valores de $r = 0,39$ a partir una regresión lineal entre la razón de área nudosa y el módulo de elasticidad, y de $r = 0,60$ respecto a la resistencia.

1.3.3. Médula

Dahlen *et al.* (2014) reportaron que la presencia de médula reduce en un 26% la rigidez a flexión de la madera de pino de plantaciones de rápido crecimiento de procedencia estadounidense. Guillaumet *et al.* (2007) estudiaron el comportamiento a

flexión del pino Paraná de Misiones en Argentina y concluyeron que la presencia de médula en las piezas de madera disminuyó un 12 % el módulo de elasticidad. Fank *et al.* (2016) arribaron a conclusiones similares para madera de *Pinus elliottii* y *P. taeda* de Misiones, donde la resistencia a flexión de piezas sin médula fue 43% mayor respecto a las que presentaron médula. Las normativas de clasificación visual de Argentina o de Chile consideran presencia y posición (descentrada) de médula como una restricción para la asignación a una clase o grado estructural superior (INN 2005, IRAM 2005). Contrariamente, las normas de clasificación de España o Brasil no incluyen este parámetro visual (AENOR 2011, ABNT 1997).

1.3.4. Estimación del módulo de elasticidad por técnicas no destructivas

Las técnicas de ensayos no destructivos generalmente se utilizan para complementar los métodos de clasificación visual y así mejorar la estimación de las propiedades mecánicas. Existen varias técnicas de ensayos no destructivos, comúnmente conocidos como NDT, del inglés “Non-destructive testing”, que se utilizan para detectar y evaluar singularidades de un material. Dentro de los NDT, destacan los métodos acústicos, que incluyen método de onda de impacto, técnicas de ultrasonido, y análisis de vibraciones, para obtener el módulo de elasticidad de la madera. El módulo de elasticidad dinámico estimado por NDT presenta una correlación alta con el módulo de elasticidad longitudinal, resistencia a flexión y densidad (Iñiguez 2007, O’Neill 2006, Acuña *et al.* 2001). La predicción de las propiedades mecánicas es más precisa mediante la aplicación combinada de NDT y técnicas de clasificación visual (Kessel *et al.*, 1998). Varios autores concluyen que el empleo de NDT combinado con técnicas de clasificación visual, incrementa el coeficiente de determinación de modelos que explican las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Casado *et al.* (2011) en su estudio sobre un híbrido de álamo de procedencia española (*Populus x euromaerica* I-214), reportaron valores de $R^2 = 0,68$ para explicar el módulo de elasticidad longitudinal, a partir del módulo de elasticidad dinámico determinado con técnicas de ultrasonido, la densidad, el diámetro de nudos y el ancho de los anillos de crecimiento. Conde *et al.* (2007) en un trabajo sobre pino

laricio y pino silvestre de procedencia española, encontraron que el modelo que incluyó las variables de densidad, tamaño de nudo de cara, y el módulo de elasticidad estimado mediante método de ultrasonido, explicó el mayor porcentaje de la variabilidad del módulo de elasticidad longitudinal, que aquel que no lo incluyó, $R^2 = 0,70$ versus $R^2 = 0,35$. Consistente con estos estudios, Ceccotti y Tongi (1996), en estudios previos, reportaron que la inclusión del módulo de elasticidad determinado mediante NDT mejoró en 13% el porcentaje de variabilidad explicada del modelo de predicción del módulo de elasticidad, que alcanzó valores de $R^2 = 0,71$.

1.4. MODELADO

Los modelos de regresión simple y múltiple han sido aplicados por numerosos autores (Fank *et al.* 2016, Conde *et al.* 2007, Ceccotti y Tongi 1996) para estimar el módulo de elasticidad a partir de variables visuales y/o de ensayos no destructivos. La aplicación de técnicas estadísticas modernas, tales como Árboles de regresión (AR), Bosques aleatorios (BA) y Modelos generalizados aditivos (MGA), facilitan la obtención de modelos de predicción y mejoran su precisión sin necesidad de cumplir con la verificación de supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Mier *et al.* (2005) comparó el uso de técnicas de regresión múltiple con la técnica de aprendizaje automático de Redes neuronales en la clasificación de madera estructural de *Pinus nigra* y encontró que esta última mejoró en 15% la precisión en la predicción de la resistencia de flexión. Las técnicas de aprendizaje automático tienen como ventaja respecto a las regresiones lineales múltiples, la posibilidad de usarse sin necesidad de verificar los supuestos, y además, la posibilidad de incluir variables independientes de tipo categórica, a diferencia de la regresión, que sólo permite el uso de variables numéricas. Las técnicas de AR y BA son más apropiadas para su uso en este estudio respecto a las Redes neuronales, dado que esta última requiere de la evaluación de un gran número de piezas para obtener una buena predicción, y un bajo número de variables independientes para simplificar el análisis.

1.4.1. Árboles de regresión:

La idea fundamental de los Árboles de regresión (AR) consiste en particionar los valores de las variables visuales o independientes de manera tal que los valores de la variable de respuesta continua sean cada vez más homogéneos dentro de las clases que se formen (Wilkinson, 2004). Los árboles de regresión crean un modelo de clasificación basado en diagramas de flujo. Clasifican casos en grupos y pronostican valores de una variable dependiente en base a valores de variables independientes (Berlanga *et al.*, 2013). Esta técnica resulta atractiva para su uso en clasificación visual de madera estructural, porque posibilita visualizar en forma esquemática la importancia de las variables independientes y sus interrelaciones para predecir el valor de una variable de respuesta como puede ser el módulo de elasticidad longitudinal (E_0). La Figura 5 describe el esquema de AR, que se lee desde arriba hacia abajo, y muestra una partición recursiva del set de datos en dos subgrupos más homogéneos, lo que resulta en la estructura ramificada. Al aumentar el número de particiones aumenta la homogeneidad en los grupos finales de la variable de respuesta (E_0).

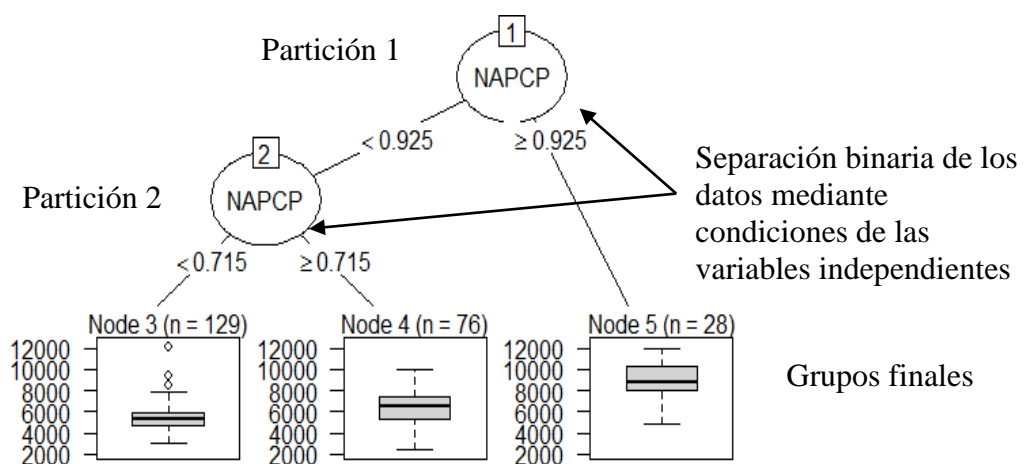


Figura 5. Ejemplo de esquema de Árboles de regresión. NAPCP = número de anillos por centímetro, variable detectada como de mayor importancia en la partición, luego de la evaluación conjunta de todas las variables independientes. Los números 1 y 2

indican el número de particiones binarias de los valores de NAPCP (en unidades de anillos/cm). “Node” 3, 4 y 5, indican los grupos finales de piezas de madera, homogéneos dentro de sí y diferentes entre sí. n = número de piezas de madera que quedó incluida en cada grupo final. Los valores medios, cuartil 25, cuartil 75, mínimo y máximo de la variable de respuesta (E_0) se observan en el gráfico de cajas correspondiente a cada grupo final, expresados en MPa.

1.4.2. Bosques aleatorios:

El método de Bosques aleatorios (BA) combina las predicciones de varios árboles de regresión obtenidos a partir de varios muestreos sobre la base de datos. Consiste en realizar muestreos sucesivos, de forma aleatoria y con reemplazo, asegurando la misma probabilidad de elección de las piezas cada vez. La ventaja de BA es que el modelo no queda sujeto a ciertas inestabilidades observadas en los AR, pero presenta la desventaja de impedir conocer los valores de partición de las variables independientes o predictoras, posibles de observar en AR (Breiman, 2001).

La importancia de las variables independientes, puede obtenerse utilizando el programa estadístico R (R Team Core, 2014) que arroja un gráfico, como el de la Figura 6, que indica el incremento de la pureza en los grupos resultantes de la partición para las variables del modelo. Cuanto mayor es el incremento de la pureza, mayor es la importancia de la variable. La pureza de una partición es calculada minimizando el error cuadrático medio de la variable predictora.

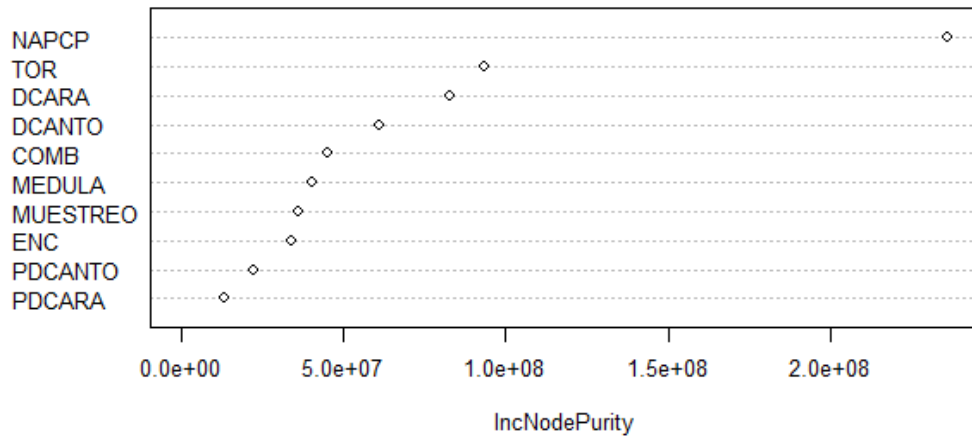


Figura 6. Gráfico de importancia de variables. Los puntos indican el incremento de la pureza en una partición (eje de abscisas) para cada una de las variables independientes del modelo (eje de ordenadas). “IncNodePurity” = incremento de la pureza debida a una partición; NAPCP = número de anillos de crecimiento por centímetro; TOR = torcedura; DCARA=diámetro de nudo mayor de cara; DCANTO= diámetro de nudo mayor de canto; COMB= combado; MEDULA= posición y presencia de médula; MUESTREO = localización de la muestra; ENC= encorvadura; PDCANTO = posición del nudo de diámetro mayor de canto; PDCARA= posición del nudo de diámetro mayor de cara.

1.4.3. Modelos generalizados aditivos

Este modelo permite predecir el valor de una variable de respuesta a partir de varias variables independientes. Es un modelo extendido a partir de los modelos de regresión lineal múltiple, que permite trabajar con respuestas no lineales de las variables dependientes, caracterizando de forma más adecuada los fenómenos de la naturaleza (James *et al.* 2013, Yee y Mitchell 1991).

Los resultados de la predicción del Modelo generalizado aditivo (MGA), se visualizan sobre gráficos de curvas de nivel o de contorno (Figura 7). Los valores de las variables independientes (visuales) que resultan significativas (p- valor < 0,05) a partir del modelo, están representadas de a pares sobre los ejes de coordenadas, y los

valores predichos de la variable de respuesta (E_0) se observan sobre las curvas de contorno. Este tipo de gráfico presenta además, un gradiente de color para señalar los valores predichos de la variable de respuesta: colores más claros indican valores más altos y colores más oscuros, se asocian a valores más bajos.

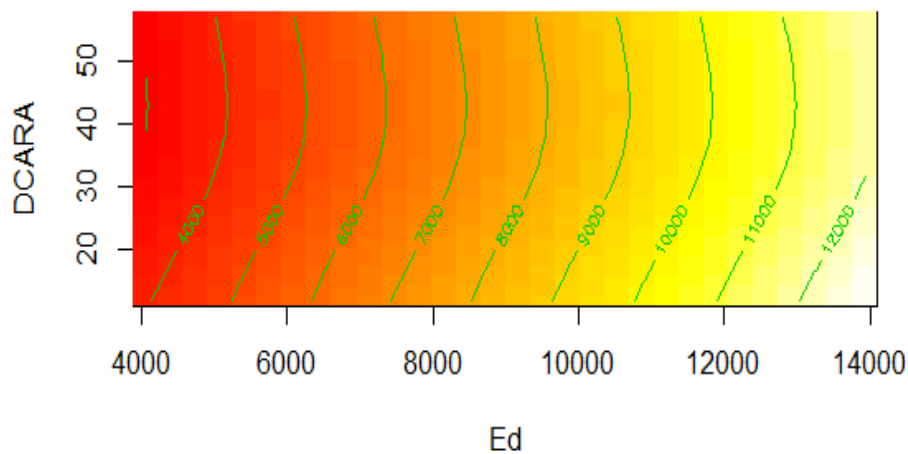


Figura 7. Ejemplo de gráfico de contorno resultante de un MGA. Sobre los ejes se indican los valores de las variables independientes: DCARA = diámetro de nudo mayor de cara (en unidades de %) y E_d = módulo de elasticidad dinámico (en MPa). Los valores predichos de la variable de respuesta, E_0 (en MPa) quedan representados por las curvas de contorno y por el gradiente de colores: los colores más oscuros indican valores bajos de E_0 y los más claros, valores altos de E_0 .

1.5. CONTEXTO NORMATIVO

A nivel mundial los países desarrolladores de la tecnología de construcción con madera han elaborado reglas o normas de clasificación por resistencia (visual y mecánica) para las especies más comúnmente empleadas en sus respectivos países. En Europa, las normas de clasificación visual fueron desarrolladas para cada país o región, atendiendo a las particularidades de las especies y a las condiciones de crecimiento. Así cada país tiene sus normas de clasificación visual por resistencia en donde están establecidas las características que debe cumplir la madera de cierta

especie para alcanzar una calidad visual particular. Por ejemplo, en España la norma UNE 56544 (AENOR, 2011) definió para sus principales coníferas dos calidades visuales: ME1 y ME2. A su vez, estas calidades visuales presentan ciertos valores de propiedades físicas y mecánicas y se asocian a alguna clase de resistencia de la norma Europea EN 338 (CEN, 2010a). Las clases de resistencia en esta norma están designadas por la letra “C” que refiere a coníferas y un número que indica el valor de resistencia: desde la clase C14 hasta la clase C50 (Tabla1). Una muestra de madera de conífera que cumpla con los requisitos indicados en el conjunto normativo europeo puede asociarse a alguna de estas clases de resistencia. Por ejemplo, una muestra de madera de *Pinus pinaster* de procedencia española que se clasificó visualmente como ME2, tiene propiedades físicas y mecánicas asociadas a la clase de resistencia C18.

Tabla 1. Propiedades de resistencia, rigidez y densidad de las clases de resistencia de la norma EN 338 (CEN, 2010a).

	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Prop. de resistencia (MPa)												
Resistencia media a flexión	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Prop. de rigidez (MPa)												
MOE medio	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
MOE 0,05	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10	10,7
Densidad (Kg/m ³)												
Densidad 0,05	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidad media	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550
C14, ..C50 = clases de resistencia para las coníferas según EN 338; MOE = módulo de elasticidad												

En nuestra región, la norma argentina de clasificación visual para madera de *Pinus elliottii* y *P. taeda* IRAM 9662-3 (IRAM, 2005) indica las características que debe cumplir la madera aserrada para alcanzar la clase resistente 1 o 2, cada una asociada a un conjunto de propiedades mecánicas y densidad definidas en la misma (IRAM, 2005). Si bien esta norma refiere a especies de pino similares a los uruguayos, vale subrayar que los criterios de clasificación visual no son de aplicación directa a nuestras maderas, ya que las condiciones climáticas, edafológicas y genéticas del árbol del cual provienen, influyen en su calidad.

En Uruguay, existen antecedentes de caracterización de madera de pino proveniente de diferentes zonas del país (O'Neill *et al.* 2008, O'Neill *et al.* 2004, O'Neill *et al.*

2003, O'Neill y Tarigo 2003, Pérez del Castillo y Venturino 2003, O'Neill *et al.* 2002, Pérez del Castillo 2001, Pérez Favaro *et al.* 2000), y de la influencia de los parámetros visuales sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de pino nacional (Moya *et al.* 2017, Baño *et al.* 2015, Moya *et al.* 2015). En 2015, se publicó un informe (Baño *et al.*, 2015) que incluye documentación técnica para generar un cuerpo normativo nacional sobre madera estructural. En ese informe se argumenta las ventajas para Uruguay de alinearse al cuerpo normativo europeo al que refiere como “consistente y coherente” porque incluye indicaciones técnicas de fabricación de productos, metodologías de ensayos, interpretación y análisis de resultados, entre otras. Adoptar ese cuerpo normativo permite el ahorro de tiempo destinado a la generación de normas de características similares y su actualización periódica. El informe también sugiere la ampliación de la base de datos de madera aserrada de pino para mejorar la representatividad de su caracterización e incluir la medición de los anillos de crecimiento en la propuesta de clasificación visual estructural como parámetro de predicción de la rigidez de la madera de pino uruguayo (Baño *et al.*, 2015). Recientemente, se creó un Comité UNIT para discutir y elaborar un cuerpo normativo nacional sobre madera estructural que incluya desde normas de clasificación visual de especies cultivadas en nuestro país hasta las reglas de diseño de estructuras de madera.

1.6. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Este trabajo plantea tres hipótesis: i) la madera de pino uruguayo presenta ciertos parámetros visuales que están asociados a las propiedades físicas y mecánicas de una pieza de madera estructural; ii) existe al menos una calidad visual estructural para la madera de pino nacional; iii) es posible formular una propuesta de clasificación visual por resistencia basada en modelos obtenidos con diferentes técnicas estadísticas.

El objetivo principal de esta tesis es diseñar una metodología de clasificación visual para vigas estructurales de madera aserrada de *Pinus elliottii* y *P. taeda* proveniente de plantaciones del noreste de Uruguay. Los objetivos específicos incluyen: i) determinar las variables visuales que influyen sobre la resistencia y el módulo de elasticidad de flexión, y la densidad de las vigas; ii) contribuir a la definición de calidades visuales para la madera de pino nacional; iii) elaborar una propuesta de clasificación visual basada en modelos obtenidos con diferentes técnicas estadísticas.

1.7. DESARROLLO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo de tesis se desarrolló en dos etapas: i) una etapa piloto donde se estudiaron todas las posibles variables visuales que pudieran tener influencia sobre el módulo de elasticidad, considerándose a esta propiedad como la más limitante. ii) En una segunda etapa considerando un número mayor de piezas de madera, se verificaron las variables visuales que resultaron más relevantes y se analizaron los modelos obtenidos con las diferentes técnicas estadísticas aplicadas. Este proceso buscó validar un modelo de predicción del módulo de elasticidad que permita realizar una propuesta de clasificación visual para la madera estructural de *Pinus elliottii* y *P. taeda* cultivado en el noreste del país.

La tesis está estructurada en cinco capítulos principales. El capítulo 1 introduce los conceptos de clasificación visual, variables visuales y relaciones con las propiedades físicas y mecánicas de la madera, además de contextualizar y justificar la tesis. Los capítulos 2 y 3, escritos en formato de artículos científicos, focalizan en definir las variables visuales más relevantes y los modelos estadísticos para predecir el módulo de elasticidad, y en caracterizar al menos una calidad visual y plantear una propuesta de clasificación visual. El capítulo 4 presenta una discusión general y el capítulo 5 sintetiza las conclusiones de la tesis.

2. PREDICTION OF BENDING STIFFNESS OF URUGUAYAN LOBLOLLY AND SLASH PINE TIMBER APPLYING DIFFERENT STATISTICS TECHNIQUES.¹

Cardoso Andrea,^{a,*} Moya Laura,^b Borges Alejandra^c

The aim of this study was to predict the bending stiffness of Uruguayan loblolly and slash pine timber applying three statistical techniques. Two samples of beams (50x150x2800 mm), from two commercial plantations, one comprised of 122 beams from a 14 year-old loblolly pine, and a second of 111 from a 27 year-old slash pine, were selected for this study. For each beam, a series of visual parameters was measured and the modulus of elasticity by both static and dynamic tests, were determined. Three statistical techniques, Regression Trees (*CART*), Random Forest (*RF*) and Generalizing Additive Model (*GAM*) were applied to predict the bending stiffness. Results showed that number of annual rings per centimeter, twist, crook, diameter of the major face knot and diameter of the major edge knot, were the most relevant visual variables for modulus of elasticity prediction. In addition, dynamic modulus of elasticity complemented the stiffness prediction by reducing on average 46% of the predicted error. The *GAM* model gave the best stiffness prediction showing 10% of the predicted error, and explaining 88% of the variability.

Keywords: Uruguayan Pinus taeda, Pinus elliottii, juvenile wood, Generalizing Additive Model, number of annual rings per centimeter

*Contact information: a: Gerencia de I+D+i, LATU, Montevideo, Uruguay; b: Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay, Montevideo, Uruguay; c: Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay; *Corresponding autor:andrea10del85@gmail.com*

¹ Artículo a publicar en la revista BioResources

2.1. INTRODUCTION

Physical and mechanical properties of timber are usually predicted by visual parameters. Pith presence and location within the piece of lumber (Dahlen *et al.* 2014), width or number of growth rings per centimeters (Mascia and Cramer 2009; Baño *et al.* 2015; Fank *et al.* 2016), knot diameter or knot area (Guillaumet *et al.* 2007; Dávalos and Limón 2009; Vega *et al.* 2011) have influence on the bending stiffness and strength. The number of annual rings per centimeter is an indicator of the growth rate of a tree, fast grown plantation produce high proportion of juvenile wood. Moya *et al.* (2015) in a study on Uruguayan *Pinus taeda* and *P. elliottii* from two samples of 15 and 24 years old found that juvenile wood had more influence on stiffness than on strength, being the former the limiting property for class assignment according to the European strength class system (EN 338 2010a).

The modulus of elasticity of a piece of lumber can be determined by destructive and/or non-destructive tests (NDT). Within NDT the dynamic modulus of elasticity is well correlated with the bending modulus of elasticity, strength and density (Acuña *et al.* 2001; O'Neill 2006; Iñiguez 2007). Kessel *et al.* (1998) indicated that the prediction of mechanical properties is more precise by using NDT than using knot features and density of a piece of lumber. Several authors reported that NDT combined with visual grading improved the prediction of modulus of elasticity (Ceccotti and Togni 1996; Conde *et al.* 2007; Casado *et al.* 2011).

Simple or multiple regression models are frequently used in wood technology to predict the modulus of elasticity (Hermoso *et al.* 2007; Guillaumet *et al.* 2007; Vega *et al.* 2012). Other statistical techniques such as Regression Trees (CART), Random Forests (RF) or Generalizing Additive Models (GAM) are widely applied in ecology (Yee and Mitchell 1991; Guisan *et al.* 2002; Austin 2007; Cutler *et al.* 2007; Meynard *et al.* 2007). CART is used in ecology due to its ability for interpretation, high classification accuracy and its potential to explain interaction between variables (Cutler *et al.* 2007). The fundamental of CART is to make a recursive binary partition of independent variables values in such a way that the values of the continuous response variable become more and more homogeneous within the

classes that form (Wilkinson2004; Cutler *et al.* 2007), showing the importance of variable predictors and their interrelationships(James *et al.* 2013).As its name suggests, RF combines the predictions of several regression trees obtained from re-sampling on the database, randomly and with replacement, ensuring the same probability of choosing pieces each time. RF do not have the instabilities of CART, but has the disadvantage that does not reveal partition values of the predictor variables, as observed in CART (Breiman 2001).GAM is an extended model from multiple linear regressions that allows predicting a response variable value from several independent variables, working with nonlinear responses of the dependent variables that improve the characterization of the phenomenon (Yee and Mitchell 1991; James *et al.* 2013).

Compared to multiple regressions, the application of CART, RF and GAM had the advantage that no verification about normality and homoscedasticity is needed, and they allow to combine categorical and numerical variables (James *et al.* 2013).

In spite of having a great potential in many scientific fields and have been applied for more than thirty years in ecological modeling, these statistical techniques are not often employed for wood analysis. In this area, Neural networks, a technique similar to CART and RF have been applied. A study by Mier *et al.* (2005) on visual grading of *Pinus nigra* compared the use of multiple regression techniques with neural networks, and found that the latter improved in 15%the precision of strength prediction. Esteban *et al.* (2009) applied Neural network to predict the modulus of elasticity of *Abies pinsapo* timber through the parameters of density, width, thickness, moisture content, NDT and visual grading of the pieces, and reported a $R^2 = 0.75$.Comparing CART and RF techniques with Neural networks, the latter require a high number of observations to reach a good prediction and a low number of independent variables to simplify the analysis. Due to, Neural networks were no apply on this study.

In Uruguay, ninety eight percent of pine forest is planted with loblolly and slash pine (*Pinus elliottii* and *P. taeda*) species, which are mainly located in the north of the country (MGAP 2012).An estimation of the average annual offer indicated it

will be about 3 million m³ of national pine lumber between 2010 and 2030 (Dieste 2012). Both species receive similar silvicultural practices (Pou 2016), and have similar physical and mechanical properties (O'Neill *et al.* 2004; O'Neill and Tarigo 2008). For this reason the two species are usually planted indistinctly mixed in the stand and are commercialized in a similar mixed manner in the Uruguayan market (Moya *et al.* 2013). Uruguayan pine plantations are characterized by fast growing rates due to climatic and soil conditions ("Cfa" Koppen index), particularly at the North-East of the country. These conditions generate on coniferous high percentages of juvenile wood from 5-10 until to 20 years old (Kretschmann and Bendtsen 1992; Green *et al.* 1999), characterized by low values of modulus of elasticity (Moya *et al.* 2015). Although, high offer of fast-grown pine wood is available in the country, very few studies relating with the visual parameters measured on Uruguayan pine lumber with the stiffness were done.

The aim of this study was to determine the most relevant variables to predict the bending modulus of elasticity of loblolly and slash pine timber from North-East Uruguayan plantations applying different statistics techniques.

2.2. MATERIALS AND METHODS

The material for this study came from two commercial plantations both having sawmills and located at the North-East of Uruguay: M1, in Tacuarembó province (32°06'53"S, 55°45'20"O) comprised of 14 years old loblolly pine trees with pruning; and M2, in Rivera province (30°54'09"S, 55°33'02"O) comprised of 27 years old slash pine trees with no pruning and no thinning. The lumber was randomly selected from the sawmill production line, and was pre graded (PREGRAD) in three categorical levels as described in the next section. They were dried to 12% moisture content (MC) and planned to their final dimensions (50 mm x 150 mm x 2800 mm). Cross section was selected based on being the most commonly used as structural component and due to limited availability in the industries.

The pieces were then wrapped with plastic film and transported to the Departamento de Proyectos Forestales of the Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), for further processing and analysis.

The study was carried out in two phases: i) phase 1 involved finding the most relevant variables to predict the modulus of elasticity; and ii) phase 2, focused on using the variables found in i) to propose a model for stiffness prediction.

2.2.1. Phase 1

A total of 94 beams, 50 from M1 and 44 from M2, were evaluated.

Typical visual parameters were measured on each beam according to UNE EN 1310 (1997), and referred to as: diameter of major knot on face (KFACE), diameter of major knot on edge (KEDGE), bow (BOW), crook (CRK) and twist (TWI). In addition, position of major knot on face (PKFACE), position of major knot on edge (PKEDGE), growth ring orientation (GRO), number of annual ring per centimeter (NARPC), were also measured. In this study, PKFACE and PKEDGE referred to as knot position in regards to the thirds of the length of the piece, and GRO to the orientation of the annual ring respect to the face of the piece. NARPC was defined as the number of an entire annual ring (comprised of early and latewood) measured on the longest segment being perpendicular to the rings, passes through the pith if it is present, or through the center of the cross section.

In addition, the largest area of the projection of all knot in a cross section divided by the cross section area (KAR1), projection of the largest knot on the cross section in relation to the cross section area (KAR2), projection of elongated knot on the cross section in relation to the cross section area (KAR3), the percentage of border area (BA) and presence and position of pith (PITH) were measured according to NCh 1207 (2005). As an additional variable, the number of knot area group (NKAG) was measured. NKAG was defined the number of the principals groups of knot projected on the cross section along the beam, based on NCh 1207 (2005).

An initial grading (PREGRAD) in green condition ($MC > 19\%$) divided specimens in three categorical levels similar to those established in NCh 1207 (2005): GS (superior) without pith and $KAR1 \leq 33\%$, G1 (intermediate) with

centered pith and $KAR1 \leq 66\%$, and G2 (inferior) with not-centered pith and $KAR1 \leq 66\%$.

The above variables, including Sample (SAMPLE) were considered as prediction variables and are listed in Table 1.

Table 1. Predicting variables and adopted values

Variable	Value
Percentage of major diameter knot on face (KFACE)	1 to 100 (percentage)
Percentage of major diameter knot on edge (KEDGE)	1 to 100 (percentage)
Position of the major knot on face (PKFACE)	1 = center of beam, 2= extremes of piece
Absence and position of the major knot on edge (PKEDGE)	0 = absence, 1 = center of beam, 2= extremes of piece
Number of group of knots (NKAG)	1 – 4
Knot area by section area (KAR1)	1 to 100 (percentage)
Individual knot area by section area (KAR2)	1 to 100 (percentage)
Elongated knot area by section area (KAR3)	1 to 100 (percentage)
Percentage of border area (BA)	1 to 100 (percentage)
Twist (TWI)	Mm
Crook (CRK)	Mm
Bow (BOW)	Mm
Number of annual rings per centimeter (NARPC)	0.1 – 3.0
Pith (PITH)	0= absence, 1= centered, 2= off-centered pith
Growth ring orientation (GRO)	T= tangential, R= radial, S= combination
Pre grading (PREGRAD)	GS = best class, G1 = intermediate class, G2 = inferior class
Sample (SAMPLE)	1 = <i>P. taeda</i> 14 years, 2 = <i>P. elliottii</i> 27 years

*in parenthesis denotes the code for the parameter

2.2.2. Phase 2

A total of 233 beams, 122 from M1 and 111 from M2, which included beams from phase 1, were evaluated.

In this phase, only the relevant variables found in phase 1 were considered.

2.2.3. Property determination

In addition to the parameters listed in Table 1, the dynamic modulus of elasticity (E_d) of the beams was estimated using NDT equipment (Fakopp Microsecond Timer) by Eq. 1,

$$E_d \text{ (MPa)} = \rho \times V^2 \quad (1)$$

where ρ is the density of the beams at moment of the test (kg/m^3) and V is the propagation wave velocity estimated with the Fakopp Microsecond Timer to cross the length of the piece (m/s).

Beams were tested in four points bending using a Universal Testing Machine (Minebea 250 kN) to determine the global modulus of elasticity (E_0) according to Eq. 2 from EN 408 (2011),

$$E_0 \text{ (MPa)} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \cdot \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb} \right)} \quad (2)$$

where a is the distance between the nearest load point and point of support (mm); L is the span in bending (mm); b and h are width and height, respectively (mm); G is the shear modulus of elasticity, calculated as $E_0/16$ (EN 384 2010b); $F_2 - F_1$ is the increment of load on the straight line position of the load deformation regression curve between 20% - 30% of the maximum load (N); $w_2 - w_1$ is the increment of deformation corresponding to $F_2 - F_1$ (mm).

Density (ρ) and moisture content (MC) of each piece were determined according to Eq. 3 and Eq. 4 respectively from EN 408 (2011),

$$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{m}{\text{vol}} \quad (3)$$

where m is the weight (g) and vol is the volume (cm^3), both at test moisture content.

$$\text{MC (\%)} = \frac{m_{\text{initial}} - m_{0\%}}{m_{0\%}} \quad (4)$$

where m_{initial} is the weight of the specimen at test time and $m_{0\%}$ is the anhydrous weight (g).

E_0 , ρ and E_d were adjusted to 12% MC.

It should be mentioned that the current EN 384: 2016 was not used in this work, because at the time this manuscript was being written the last version was not published.

2.2.4. Statistical analysis

Spearman correlation coefficient was first used to describe the association of each individual variable with the modulus of elasticity, and then non-parametric Wilcoxon – Mann-Whitney test was applied to detect stiffness differences between groups comprised of grading variables. This value was compared with other reported coefficients R^2 or r , in case the lineal regression has more than two variables, or just two variables respectively.

To rank and select variables that better predict the modulus of elasticity, three different statistical techniques were applied: CART, RF and GAM. For each technique, two different models were run: one with all variables listed in Table 1, and a second with all variables plus E_d .

Models were compared by percentage of explained variability (%EV) and percentage of prediction error (%PE). The %EV indicated the percentage of variability among observations explained by the model. The %PE indicated the error of the modulus of elasticity prediction if new beams were included in the model. For this purpose, was randomly sampled 50 times two-thirds of the data set as a learning sample to obtain prediction models and then the remaining one-third was used to test the prediction ability of each model. For each time, the mean square prediction error was calculated as the square of the quadratic difference between real and predicted elasticity values. The mean of these errors as a percentage respect of the $E_{0,mean}$, was defined as the %PE.

CART, RF and GAM analysis were performed using the statistical software R (R Team Core 2014) and for determination of Spearman coefficient and non-parametric Wilcoxon – Mann – Whitney test the statistic software InfoStat (Di Rienzo *et al.* 2013).

2.3. RESULTS AND DISCUSSION

2.3.1. Influence of each individual variable on the modulus of elasticity

2.3.1.1. Knots

In Phase 1, no association between E_0 and the variables related to knot area, *i.e.* KAR1, KAR2, KAR3 and BA, was found (p-value > 0.05). These results contradicted Dávalos and Limón (2009) findings, who reported an association between E_0 and the projected knot area, based on a square determination coefficient (r_d) of 0.62 from a simple regression model. Additionally, Gaunt (2005) in a study on Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and radiata pine (*Pinus radiata*), obtained a negative association between stiffness and projected knot area, with r_d of 0.39.

Stiffness was not associated (p-values > 0.05) with none of the following parameters: NKAG, PKFACE and PKEDGE.

In phase 2, the pre grading G0, showed significantly higher values of $E_{0,mean}$ than G1 and G2 (p-values < 0.05), but no significant difference between G1 and G2 was observed.

Conversely, variables related with knot diameter had a significant correlation with E_0 . In phase 2, the estimated correlation coefficient (r_c) for KFACE and E_0 was -0.23 (p-value < 0.05), similar to the obtained in phase 1. The decrease of mechanical properties due to knot size has been attributed to deviation of the wood fiber around the knot (Green *et al.* 1999; Kretschmann and Green 1999; Guillaumet *et al.* 2008; Fank *et al.* 2016). In pine timber, fiber around the knot frequently formed nearly 90 degree angle respect to the longitudinal axis of the piece. From our analysis, no correlation between KEDGE and E_0 (p-value = 0.15) was detected. Vega *et al.* (2011) in a study on *Castanea sativa* Mill. observed correlation coefficients of -0.24 and -0.18 between E_0 with KFACE and KEDGE, respectively.

2.3.1.2. *Warp*

In both phases, stiffness was significantly correlated with twist and crook, with correlation coefficients of -0.41 (p-value < 0.05) and -0.20 (p-value < 0.05) respectively.

No correlation between E_0 and bow (p-value = 0.10) was detected.

It is worth noting that these deformations were included in the analysis for standardization purposes (*i.e.*, to segregate strength classes). Warp is generally related to the transformation processes (particularly with drying) in the industry, and not with the mechanical properties of wood. The first findings relating twist and crook with E_0 , hinders to discriminate the effect of the intrinsic variables of the wood on the mechanical properties, and the effect of the variables generated by the transformation process.

2.3.1.3. *Pith*

Mean stiffness ($E_{0,\text{mean}}$) of M1 specimens (5558 MPa) was significantly lower (p-value < 0.05) than the respective of M2 (6872 MPa), result that could be explained by the presence of juvenile wood, usually between 5 or 10 to 20 years old, in coniferous trees (Kretschmann and Bendtsen 1992; Green *et al.* 1999; Tuset and Durán 2008). In this study the presence of pith was an indicator of juvenile wood, where 104 specimens from M1 and 56 from M2 contained pith. In both phases, significant differences between stiffness of beams with and without pith were observed (p-value < 0.05), yet pith position within the beam face did not have an effect (p-value > 0.05). Specimens with pith showed 21% lower values of $E_{0,\text{mean}}$ than those of without pith. This result is consistent with Dahlen *et al.* (2014) and Fank *et al.* (2016), who found differences of 35% and 43% respectively, for $E_{0,\text{mean}}$ in boards with pith versus those without pith.

2.3.1.4. *Annual ring*

In phase2, mean stiffness of flat sawn pieces, T (*i.e.* with tangentially oriented annual rings), resulted significantly higher compared to that of quarter sawn pieces,

R (*i.e.* with radially oriented annual rings) (p -value < 0.05), while in phase 1 not significant difference was observed.

A positive correlation between E_0 and number of annual rings per centimeter ($r_c = 0.56$; p -value < 0.05) was observed, being the correlation coefficient notoriously higher compared with those of all the other visual variables. It is widely accepted that fast growing trees produce high proportions of juvenile wood with large cell cavities and thin cell walls, low density and high fiber angle, which in turn, decreases the mechanical properties (Green *et al.* 1999). In coniferous species, each individual annual ring represents one growth year (Miller 1999), thus a large number of annual rings per centimeter reduces the proportion of juvenile wood respect to mature wood and therefore, improve the mechanical properties. In line with our findings, Haselein *et al.* (2000) in a study of 30 years old Brazilian *Pinus elliottii* reported a determination coefficient (R^2) of 0.78, using an adjusted linear multiple regression model to estimate E_0 considering percentage of mature wood and the number of annual rings per inch. Mascia and Cramer (2009) reported an association between E_0 and number of annual rings per inch, based on the square determination coefficient of a quadratic regression model ($r_d = 0.69$). Conversely, Fernández-Golfín and Diez (1994) evaluated the relation between E_0 and the width of annual ring on 25 years-old trees from three Spanish coniferous species, and obtained r_d values of 0.26 for *Pinus pinaster* and *P. silvestris*, and r_d of 0.37 for *P. radiata*. In a subsequent study on *P. radiata* and *P. pinaster*, Fernández-Golfín *et al.* (1997) indicated a r_d of 0.59 between E_0 and annual ring width, and they concluded from both studies that were not possible to predict the modulus of elasticity from the annual ring width.

2.3.1.5. Dynamic modulus of elasticity

In both phases, a high correlation coefficient of 0.92 (p -value < 0.05) between bending stiffness and dynamic modulus of elasticity (E_d) was observed (Fig 1). Similarly, Acuña *et al.* (2001) reported a R^2 of 0.71 for a linear multiple regression model, to estimate E_0 considering E_d and density of Spanish *Pinus sylvestris*. Iñiguez (2007) presented a r_d of 0.91 for a lineal regression between E_0 and E_d for Spanish *Pinus nigra*.

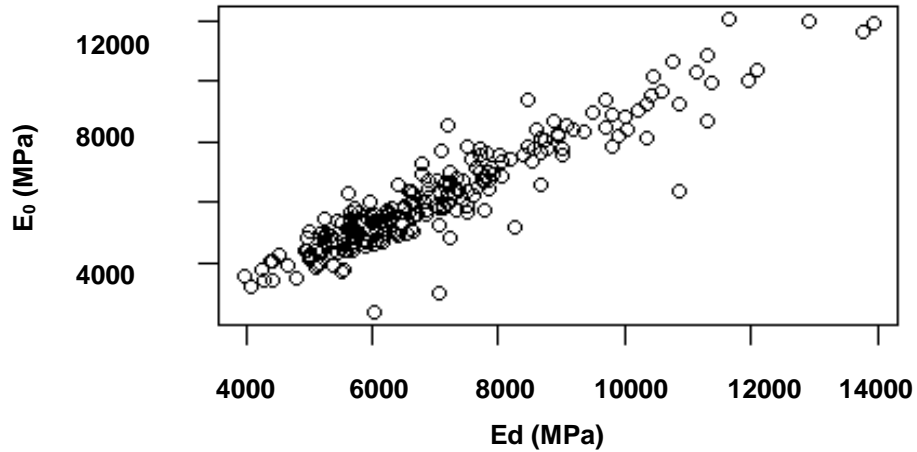


Figure 1. Graph of point relating bending stiffness (E_0) and dynamic modulus of elasticity (E_d)

Summarizing, the variables significantly correlated with E_0 were: KFACE, TWI, CRK, PITH, NARPC, SAMPLE, GRO, PREGRAD and E_d . Additionally, in this study, KEDGE was not significantly correlated with E_0 , however it was included in the following multivariate analysis, because most authors reported an association between KEDGE and E_0 (Vega *et al.* 2011; Baño *et al.* 2015).

2.3.2. Multivariate analysis for modulus of elasticity prediction

Six models were obtained using CART, RF and GAM techniques, as explained in the Materials and methods section. Table 2 summarized the relevant variables for E_0 prediction listed for CART, RF and GAM.

Table 2. Results and models for modulus of elasticity prediction obtained by CART, RF and GAM

Technique	Model number	Significant variables	EV ^a (%)	PE ^b (%)
CART	1	NARPC+ TWI	42	27
	2	Ed + NARPC	83	14
RF	3	NARPC+ TWI	45	21
	4	Ed + NARPC	81	13
GAM	5	NARPC+ TWI + CRK + KEDGE + KFACE	54	21
	6	Ed + KEDGE + KFACE + CRK	88	10

^a Explained variability ^b Predicted error

CART = Regression trees; RF = Random forest; GAM = Generalized additive model; NARPC=Number of annual ring per centimeter; TWI = twist; Ed = dynamic elasticity modulus; CRK = Crook; KEDGE = Percentage of major knot on edge; KFACE = Percentage of major knot on face.

When Ed was not included in the model (models 1, 3 and 5), NARPC and TWI were found as relevant variables for E_0 prediction, for each of the three techniques, fact that could be explained by the association of these two variables with the presence of juvenile wood and the reducing effect on stiffness. A low number of annual rings per centimeter usually indicate fast growing rates in a tree. If the tree is harvested before attained maturity, as usual in most of Uruguayan pine plantations, high proportions of juvenile wood and subsequent warp in a piece of lumber may be observed (Baño *et al.* 2015; Moya *et al.* 2015).

In addition to NARPC and TWI, GAM found that CRK, KEDGE and KFACE were relevant variables for E_0 prediction.

Conversely to the previous analysis, it is worth noting that no association between the whole range of KEDGEpercentageon the correlation analysis was observed, yet in narrow ranges (e.g., 70%-100%) possiblyGAM detected its influence on E_0 .

Comparison of models that exclude Ed on the stiffness prediction (models 1, 3 and 5) showed that the GAM model (model 5) presented the highest explained variability of E_0 (%EV = 54) and the lowest prediction error (%PE = 21). Hermoso *et al.* (2007) reported R^2 of 41.5% to explain the variability of bending stiffness from density and knots of Spanish radiata pine.

The inclusion of Ed in the models improved 48%, 38% and 52% the predicted error in CART, RF and GAM techniques, respectively. Moreover, percentages of explained variability of the model including Ed (model 2, 4 and 6), were higher than those from models without Ed (model 1, 3 and 5). Similar conclusions regarding combination of visual parameters with NDT for stiffness prediction were reported by several authors (Ceccotti and Togni 1996; Conde *et al.* 2007; Casado *et al.* 2011).

The dynamic modulus of elasticity was the most relevant variable detected by three techniques, as shown in the previous results. The number of annual rings per centimeter was found relevant by CART and RF but not by GAM. GAM was sensible to the co-linearity of the prediction variables, in agreement with Yee and Mitchell (1991), so NARPC was not detected as relevant by this technique because was co-linear with Ed ($r = 0.52$; p value < 0.05).

GAM gave the large amount of significant variables (p -value < 0.05), with highest percentage of explained variability and lowest predicted error (Table 2). Therefore, model 6 was the best model to predict the modulus of elasticity of loblolly and slash pine from North-east Uruguayan plantations. The 88% of EV and the 10% PE were superior to percentages reported in the literature for stiffness prediction with regression techniques. Casado *et al.* (2011) presented an R^2 of 0.68 for a model that combined NDT and visual variables of *Populus x euroamericana*. Conde *et al.* (2007) reported for a lineal multiple regression models an R^2 of 0.71 for Spanish *P. laricio/P. sylvestris* including NDT. Mieret *et al.* (2005) applied neural networks to predict the modulus of elasticity of *P. nigra* and *P. sylvestris* and obtained an R^2 of 0.73, which improved in 15% the predicted value obtained by multiple regression.

2.4. CONCLUSIONS

The relevant variables to predict the bending modulus of elasticity of loblolly and slash pine timber from North-East Uruguayan plantations were defined, and one of the three statistics techniques applied was considered better to predict the bending modulus of elasticity.

1. The significant visual variables that predicted the bending stiffness were: number of annual rings per centimeter, twist and crook, diameter of the major face knot and diameter of the major edge knot. Sample, pith presence, orientation of annual rings and pre classification were individually associated with E_0 , yet in the multivariate analysis they were not relevant.
2. The dynamic modulus of elasticity improved the stiffness prediction by reducing on average 46% the predicted error.
3. Three new techniques, CART, RF and GAM allowed to select and to rank the relevant visual parameters for modulus of elasticity prediction. The GAM was considered the best model to predict the bending stiffness of northeast Uruguayan loblolly and slash pine timber.

2.5. ACKNOWLEDGEMENTS

This study was developed in the frame of a timber strength grading project on *Pinus sp.* conducted by LATU and founded by DNI.

2.6. REFERENCES

Acuña, L., Llorente, A., Casado, M., and Herrera, C. (2001).“Clasificación de la madera de *Pinus sylvestris* L. mediante ensayos no destructivos”, in: *Proceedings of Spanish Forestry 2001 Congress*, 25 -28 September, Granada, Spain.

- Austin, M. (2007). "Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some possible new approaches", *Ecological modelling* 200(1), 1-19. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.07.005.
- Baño, V., Moya, L., O'Neill, H., Cardoso, A., Cagno, M., Cetrangolo, G., and Domenech, L. (2015). *Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera* (ISBN 978-9974-0-1344-5), Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay.
- Breiman, L. (2001). "Random Forest", *Machine Learning* 45, 5 – 32.
- Casado, M., Acuña, L., Vecilla, D., Basterra, L.A., Relea, E., and López, G. (2011). "Ultrasonido y parámetros de clasificación visual para la caracterización de madera estructural de Populus x euramericana I-214" in: *Proceedings of 1st Congreso Ibero-americano de madera en la construcción*, 7 – 9 June, Coímbra, Portugal.
- Ceccotti, A., and Togni, M. (1996). "NDT on large ancient timber beams: assessment of the strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods" in: *Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing of wood*, 26 -28 August, Lausanne, Switzerland.
- Conde, M., Fernández-Golfín, J.I., and Hermoso, E. (2007). "Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual". *Materiales de construcción* 57 (288), 49 – 59. DOI: 10.3989/mc.2007.v57.i288.64
- Cutler, D. R., Edwards, Jr. T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., and Lawler, J. J. (2007). "Random forests for classification in ecology", *Ecology* 88(11), 2783 – 2792. <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>
- Dahlen, J., Jones, R.D., Seale, R.D., and Shmulsky, R. (2014). "Sorting lumber by pith and its effect on stiffness and strength in southern pine N° 2 2x4 lumber". *Wood and Fiber Science* 46 (2), 186 – 194.
- Dávalos, R., and Limón, R. (2009). "Efecto de los nudos sobre la resistencia y rigidez en flexión de la madera de pino". *Ciencia Forestal en México* 34(106), 205-212.

- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., and Robledo, C.W. InfoStat version 2013. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Dieste, A. (2012). “Programa de promoción de exportaciones de productos de madera”.
- (http://gp.gub.uy/sites/default/files/documentos/programa_de_promocion_de_exportaciones_de_productos_de_madera_-_informe_preliminar_andres_dieste_-_2012.pdf), Accessed 3 August 2014.
- EN 408 (2011). “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas,” Comité Europeo de Normalización, Bruselas, Bélgica.
- EN 338 (2010a). “Madera estructural. Clases resistentes,” Comité Europeo de Normalización, Bruselas, Bélgica.
- EN 384 (2010b). “Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad,” Comité Europeo de Normalización, Bruselas, Bélgica.
- Esteban, L. G., Fernández, F. G., and de Palacios, P. (2009). “MOE prediction in *Abies pinsapo* Boiss. timber: Application of an artificial neural network using non-destructive testing,” *Computers & Structures* 87(21), 1360-1365. DOI: [10.1016/j.compstruc.2009.08.010](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.08.010).
- Fank, P.Y., Stefani, P.M., and Piter, J.C. (2016). “Análisis de la relación entre las propiedades mecánicas de flexión y tracción paralela a las fibras en la madera de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina” in: *Proceedings of XV Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira*, 9 – 11 March, Curitiba, Brasil.
- Fernández-Golfín, J.I., and Diez, M.R. (1994). “Influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de diversas especies. *Investigaciones Agrarias. Sistemas y recursos forestales* 3(2), 211-219.
- Fernández-Golfín, J.I., Diez, M.R., and Gutiérrez A. (1997). “Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los sistemas Central e Ibérico

- mediante probetas de tamaño estructural,”*Revista de Investigación Agraria* 6 (1-2), 183-215.
- Gaunt, D. (2005). “Upcoming changes to structural timber,” *New Zealand Timber Design Journal* 13(1), 19–25.
- Green, D.W., Winandy, J. E., and Kretschmann, D.E. (1999). “Mechanical properties of wood”, in: *Wood handbook. Wood as an engineering material*. Forest Products Society, USA, 4-1 to 4-4.
- Guillaumet, A. A., Manavella, R. D., Filippetti, M. C., Diab, J., and Armas, A. (2007). “Clasificación visual resistente de la *Araucaria angustifolia* procedente de El Dorado, Misiones Argentina”, in: *Proceedings of 3er Congreso Iberoamericano de Productos forestales y no forestales*, 3 -5 July, Buenos Aires, Argentina.
- Guillaumet, A. A., Manavella, R. D., Filippetti, M. C., Diab, J., and Armas, A.(2008). “Relación entre la nudosidad y las características resistentes de la *Araucaria angustifolia* (pino Paraná)”, in: *Proceedings of XX Jornadas Argentinas de Ingeniería estructural*, 15 – 17 October, Buenos Aires, Argentina.
- Guisan, A., Edwards Jr., T. E., and Hastie, T. (2002). “Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene,”*Ecological Modelling* 157 (2) 89–100. DOI: 10.1016/S0304-3800(02)00204-1
- Haselein, C.R., Cechin, E., Santini, E., and Gatto, D. (2000). “Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* Engelm aos 30 anos de idade,”*Ciencia Florestal*10(2) 135 – 144.
- Hermoso, E., Carballo, J., and Fernández-Golfín, J.I. (2007). “Caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del país vasco (España) acorde a las modificaciones normativas,”*Maderas. Ciencia y tecnología* 9 (3), 223 – 232.<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2007000300003>.
- Iñiguez G. (2007). *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural*, Doctoral Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

- James, G., Witten, D., Hastie, T., and Tibshirani, R.(2013). *An introduction to statistical learning with application to R*. Springer, New York.
- Kessel, M.H., Plinke, B., Augustin, R., and Huse, M. (1998).“Strength grading of construction timber with large cross sections” in: *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*,17 – 20 August, Montreux, Switzerland, pp. 557-562.
- Kretschmann, D., and Bendtsen B. (1992). “Ultimate tensile stress and modulus of elasticity of fast-grown plantation loblolly pine lumber,”*Wood and Fiber Science* 24(2), 189 – 203.
- Kretschmann, D., and Green, D. (1999).“Lumber Stress grades and design properties,” in: *Wood Handbook. Wood as an engineering material*.Forest Products Society, USA, pp. 6-1- 6-14
- Mascia, N. T., and Cramer, S. M. (2009).“On the effect of the number of annual growth rings, specific gravity and temperature on redwood elastic modulus,”*Maderas.Ciencia y Tecnología* 11(1), 47-60.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2009000100004>
- Meynard, C. N., and Quinn, J. F. (2007).“Predicting species distributions: a critical comparison of the most common statistical models using artificial species,” *Journal of Biogeography* 34(8), 1455-1469.DOI:10.1111/j.1365-2699.2007.01720.x.
- MGAP-Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. (2012). “Actualización de la cartografía forestal de Uruguay,”
(<http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/areacartografia2012.pdf>), Accessed 20 September 2016.
- Mier, R., García de Seca, J.L., Diez, M.R., Fernández-Golfín, J.I., and Hermoso Prieto, E. (2005). “Aplicación de Redes Neuronales a la clasificación de madera estructural. Comparación con otros métodos de clasificación”in: *Proceedings of 4to Congreso Forestal Español*, 26 -30 September, Zaragoza, Spain.
- Miller, R. (1999). “Structure of Wood,” in: *Wood Handbook. Wood as an engineering material*.Forest Products Society, USA, pp. 2-1 - 2-4

- Moya, L., Cardoso, A., Cagno, M., and O’Neill, H. (2015). “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay,” *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17 (3), 597 – 612. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000053
- Moya, L., Laguarda, M.F., Cagno, M., Cardoso, A., Gatto, F., and O’Neill, H. (2013). “Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay,” *Forest Products Journal* 63 (3/4), 128 – 137.
<https://doi.org/10.13073/FPJ-D-13-00024>
- NCh 1207 (2005). “Pino radiata – Clasificación visual para uso estructural- Especificaciones de los grados de calidad”. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- O’Neill, H. (2006). *Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos*. (Report No. 4) Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, Uruguay.
- O’Neill, H., and Tarigo, F. (2008). *Propiedades mecánicas de Pinus elliottii Eng. del norte de Uruguay*. (Report No. 7). Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, Uruguay.
- O’Neill, H., Tarigo, F., and Iraola, P. (2004). *Propiedades mecánicas de Pinus taeda L. del norte de Uruguay*. (Report No. 3). Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, Uruguay.
- Pou, R. (2016). *Forestación en Uruguay. Una apuesta al porvenir*, Plus-Ultra Ediciones, Montevideo.
- R Team Core. (2014). *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Tuset, R., and Durán, F. (2008). *Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización*. 2nd. Edition. Hemisferio Sur Publisher, Montevideo, Uruguay.
- UNE EN 1310 (1997). “Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades,” Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España.
- Vega, A., Guaita, M., Dieste, A., Majada, J., Fernández, I., and Baño, V. (2011). “Evaluation of the influence of visual parameter on wave transmission velocity

- in sawn chestnut timber,” in: *Proceedings of the 17th International Wood Non-destructive Testing Symposium*, 14 -16 September, Sopron, Hungary.
- Vega, A., Dieste, A., Guaita, M., Majada, J., and Baño, V. (2012). “Modelling of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. structural timber by combination of non-destructive variables and visual grading parameters,” *European Journal of Wood and wood products*. DOI 10.1007/S00107-012-0626-7
- Wilkinson, L. (2004). “Classification and regression trees,” in: *Systat 11*, SYSTAT Software, Inc., Richmond, California, pp. 35-56.
- Yee, T.W., Mitchell, N.D. (1991). “Generalized additive models in plant ecology,” *Journal of Vegetation Science* 2: 587 – 602.

3. DISEÑO DE REGLAS DE CLASIFICACIÓN VISUAL ESTRUCTURAL PARA MADERA DE PINO PROVENIENTE DE PLANTACIONES DE RÁPIDO CRECIMIENTO DEL NORESTE DE URUGUAY²

Andrea Cardoso¹, Alejandra Borges², Vanesa Baño³, Laura Moya⁴

3.1. RESUMEN

En las últimas tres décadas, se ha incrementado la disponibilidad de madera aserrada uruguaya proveniente de plantaciones de rápido crecimiento. Parte de la misma tendrá potencial uso estructural en la medida que se cuente con especificaciones técnicas, usualmente estimadas mediante metodologías de clasificación no destructivas. Este trabajo plantea el diseño de un método de clasificación visual estructural para madera aserrada de pino proveniente de plantaciones de rápido crecimiento del noreste del país. Se evaluaron dos muestras de madera procedentes de plantaciones comerciales: i) *Pinus taeda* de 14 años, ii) *P. elliottii* de 27 años. Sobre 233 piezas de tamaño estructural se midieron una serie de variables visuales y luego fueron ensayadas a flexión estática según EN 408, determinándose la resistencia y la rigidez de flexión, y la densidad. Se definió una calidad visual estructural EC7 asociada a la clase de resistencia C14 de la EN 338 y una calidad visual EC5 con propiedades físicas y mecánicas inferiores ($E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}=3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k=0,317$ g/cm³). Además del número de anillos de crecimiento, los diámetros de nudo mayor de cara y de canto, y la torcedura y encorvadura, resultaron ser variables relevantes en la predicción del módulo de elasticidad.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, módulo de elasticidad, madera estructural, pino uruguayo

3.2. SUMMARY

The promotion of fast-growing plantations at the governmental level has led to an increase in the availability of Uruguayan sawn timber. For structural applications,

² Artículo para publicar en Maderas. Ciencia y Tecnología.

there is still a need for structural grading of wood that allows classification according to its strength. This paper presents the results of a study on the design of a structural visual classification method for Uruguayan pine sawn from fast growing plantations in the northeast of the country. Was evaluated two wood samples from two commercial plantations in northeastern Uruguay, one from *Pinus taeda*, 14 years old, and one from *P. elliottii*, 27 years old. On 233 of structural size pieces, a series of visual variables were measured and then tested to static flexion according to EN 408, determining the flexural strength and stiffness, and the density. A structural visual quality EC7 associated to the C14 resistance class of EN 334 and a visual quality EC5 with lower physical and mechanical properties ($E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}=3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k=0.317$ g/cm³). In addition to the number of growth rings, the diameters of major face and edge knot, and twist and bent, proved to be relevant variables in the prediction of modulus of elasticity.

Keywords: growth ring, elasticity modulus, structural timber, Uruguayan pine

1: Consultor Junior. Gerencia de I+D+i, LATU, Montevideo, Uruguay. andrea10del85@gmail.com

2: Profesor adjunto. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. aborges@fagro.edu.uy

3: Profesor adjunto. Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. vanesab@fing.edu.uy

4: Profesor adjunto. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay, Montevideo, Uruguay. moya@ort.edu.uy

3.3.INTRODUCCIÓN

En Uruguay la superficie efectiva forestada es de 990.030 hectáreas, de las cuales 26% está plantada principalmente con especies de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (MGAP 2012). El 72% de la superficie ocupada por estas plantaciones, está ubicada al noreste del país entre los departamentos de Rivera y Tacuarembó (MGAP 2012), donde además se encuentran instaladas las principales industrias de transformación mecánica de pino. Para el período 2010-2030, Dieste (2012) estimó en 3 millones de

m³ la oferta anual de madera de pino proveniente de la zona norte del país con este destino, de los cuales 1,3 millones de m³/año quedan sin capacidad instalada de industrialización. MGAP (2016) presenta resultados similares, donde la tasa de crecimiento promedio de la producción de madera aserrada de coníferas para el período 2010-2015 fue de 1,7 millones m³/año.

En comparación con otras zonas de Uruguay, la región noreste se caracteriza por presentar mayores precipitaciones y mejor distribuidas (1200-1300 mm promedio anuales), mayor radiación solar incidente, factores que aceleran el crecimiento de las plantaciones de *P. elliotii* y *P. taeda* (Brussoni y Cabris 2006). Como consecuencia, la madera de estas plantaciones se cosecha a edades tempranas: entre 10-15 años se comercializa la madera obtenida de los raleos y, no superando en general los 20-25 años la madera cosechada al turno final. Varios autores indican que el mayor porcentaje de madera juvenil se desarrolla desde los 5 o 10 años hasta los 20 años en las coníferas (Green *et al.* 1999, Tuset y Durán 2008). La madera de pino con mayor porcentaje de madera juvenil, entre otras, es la causa principal de los valores bajos de las propiedades físicas y mecánicas de estas especies (Moya *et al.* 2015). En relación a las especies de coníferas más plantadas, no se han encontrado diferencias significativas de los valores de las propiedades físicas y mecánicas entre *P. taeda* y *P. elliotii* de plantaciones uruguayas (O'Neill *et al.* 2004, O'Neill y Tarigo 2008). Es usual encontrar en el mercado madera con la misma denominación, que pertenecen indistintamente a una especie u otra (Baño *et al.* 2015, Moya *et al.* 2015) razón fundamental por la que se estudian juntas.

La clasificación visual estructural asigna a cada pieza una calidad visual asociada a sus propiedades físicas y mecánicas según ciertos parámetros visuales. Los parámetros relacionados con la velocidad de crecimiento de los árboles, las nudosidades y alabeos, entre otros, influyen sobre estas propiedades y en particular sobre su rigidez (Moya *et al.* 2015), propiedad fundamental para el diseño estructural (Moore 2012).

La técnica estadística de Modelos Generalizados Aditivos (MGA) propuesta por Hastie y Tibishirani (James *et al.* 2013) permite predecir los valores de una propiedad, por ejemplo del módulo de elasticidad longitudinal (E_0), a partir de varias variables independientes continuas o categóricas, sin restricciones de normalidad u homocedasticidad de sus residuos, a diferencia de las técnicas comúnmente usadas en clasificación visual estructural, como las regresiones lineales simples o múltiples (James *et al.* 2013, Yee y Mitchell 1991). Estudios previos realizados por el autor (Cardoso *et al.* sin publicar) muestran que la técnica de MGA permite obtener un modelo adecuado para predecir E_0 de la madera de pino uruguayo.

A nivel mundial los países desarrolladores de la tecnología de construcción con madera han elaborado normas de clasificación estructural (visual y mecánica) para las especies más comúnmente empleadas en sus respectivos países. Sin embargo, las normas de clasificación visual no son extrapolables a las maderas cultivadas en cada país o región, ya que las condiciones climáticas, edafológicas y genéticas del árbol entre otras, influyen en la calidad de la madera. Baño *et al.* (2015), publicó un informe en el que muestra documentación técnica existente en el país para generar un cuerpo normativo nacional sobre madera estructural que incluya reglas de clasificación visual estructural específica para madera de *P. elliotii* y *P. taeda*, y además argumenta las ventajas que presentaría Uruguay al alinearse al cuerpo normativo europeo, como el ahorro de tiempo en generar normativa nueva y en las actualizaciones, así como la posibilidad para los profesionales de tener a disposición para aplicar el Eurocódigo 5 en nuestro país.

En Uruguay se han realizado varios estudios de caracterización de madera de pino proveniente de diferentes zonas del país (Pérez Favaro *et al.* 2000, Pérez del Castillo 2001, O'Neill *et al.* 2002, O'Neill *et al.* 2003, O'Neill y Tarigo 2003, Pérez del Castillo y Venturino 2003, O'Neill *et al.* 2004, O'Neill y Tarigo 2008), así como también se ha estudiado la influencia de los parámetros visuales sobre las propiedades físicas y mecánicas, buscando asignarle una calidad visual estructural a la madera de pino nacional (Baño *et al.* 2015, Moya *et al.* 2015, Moya *et al.* 2017). En línea con

estos estudios se plantea la necesidad de ampliar la base de datos de madera aserrada de pino para mejorar la representatividad de su caracterización. Estudios previos (Moya *et al.*2017) indicaron que una regla de clasificación visual para madera de pinos uruguayos debería incluir la medición de los anillos de crecimiento, parámetro que posiblemente mejoraría la predicción de la rigidez de la madera.

El objetivo general de este trabajo fue contribuir al diseño de una regla de clasificación visual estructural para madera aserrada de pino del noreste de Uruguay. Los objetivos específicos incluyeron: i) predecir el módulo de elasticidad longitudinal a partir de los parámetros visuales con mayor influencia en la madera de pino, incluyendo el número de anillos por centímetro; y ii) contribuir en la definición de calidades visuales para la madera de pino cuyas propiedades estructurales permitirían asignarlas a clases de resistencia del sistema europeo.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se utilizó madera proveniente de dos aserraderos ubicados en la zona noreste de Uruguay. Los muestreos se realizaron en el aserradero, en uno se seleccionó madera aserrada de una plantación de 14 años de *Pinus taeda* con manejo silvícola de podas (M1), y en otro, madera de árboles de 27 años de *Pinus elliottii* sin manejo silvícola (M2). La disparidad de edad, procedencia y manejo silvícola es representativa de la oferta de madera en el mercado nacional. Las vigas fueron secadas en horno hasta 12% de contenido de humedad (CH), cepilladas hasta dimensiones promedio finales de 50 mm x 150 mm x 2800 mm y trasladada al laboratorio del Departamento de Proyectos Forestales del LATU.

Sobre 111 piezas de M1 y 122 piezas de M2, se midió una serie de parámetros visuales que se denominaron en este trabajo como: diámetro de nudo mayor de cara (DCARA), diámetro de nudo mayor de canto (DCANTO), posición de nudo mayor de cara (PDCARA), posición de nudo mayor de canto (PDCANTO), número de anillos de crecimiento por centímetro (NAPCP), orientación de los anillos de crecimiento (TC), presencia y posición de médula (MEDULA), combado

(COMB), encorvadura (ENC) y torcedura (TOR). La elección de los parámetros estuvo pautada por la facilidad de su medición en aserradero, y el potencial nivel de asociación entre el parámetro visual y las propiedades de flexión, o la densidad, buscando discriminar por clases. Es importante destacar que en esta selección se incluyeron variables que dependen mayoritariamente de las propiedades físico mecánicas de la madera, y variables relacionadas con los procesos de secado, tales como los alabeos.

La forma de medición de los parámetros se basó preliminarmente en la norma de clasificación visual UNE EN 1310 (1997). Algunas variables como la posición de los nudos, la orientación de los anillos y el número de anillos de crecimiento fueron medidas como se indica a continuación: PDCARA y PDCANTO refieren a la posición del nudo en relación al largo de la pieza dividida en tercios, TC es la disposición predominante de los anillos respecto a la cara de la pieza y NAPCP es el número de anillos completos (leños temprano y tardío) medidos sobre el segmento de recta más largo que siendo perpendicular a los anillos pasa por la médula en caso de estar presente, o por el centro de la sección transversal. Los parámetros seleccionados y los valores que éstos pueden adquirir fueron considerados como variables de predicción para el análisis de datos y se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables y valores adoptados en el modelo de predicción.

Variables*	Valores
Muestreo (MUESTREO)	1= <i>Pinus taeda</i> -14 años, 2= <i>P. elliottii</i> -27 años
Diámetro de nudo mayor de cara respecto al ancho (DCARA)	1 a 100 (%)
Diámetro de nudo mayor de canto respecto al espesor (DCANTO)	1 a 100 (%)
Posición de nudo mayor de cara (PDCARA)	0 = ausencia, 1 = centro de pieza, 2= extremo
Posición de nudo mayor de canto (PDCANTO)	0 = ausencia, 1 = centro de pieza, 2= extremo
Número de anillos por centímetro (NAPCP)	--
Presencia y posición de médula (MEDULA)	0= ausencia, 1= centrada, 2= descentrada
Orientación de los anillos (TC)	T= tangencial, R= radial, S= mezcla
Torcedura (TOR)	mm por cada 25 mm de ancho en largo de 2 m
Encorvadura (ENC)	mm en largo de 2,0 m
Combado (COMB)	mm en largo de 2,0 m

* entre paréntesis se indica el código usado para cada variable en el modelo de predicción.

Luego de clasificadas, las 233 vigas fueron ensayadas a flexión estática en cuatro puntos de acuerdo a EN 408 (2011) en máquina universal Minebea con una celda de carga de 250 kN y con capacidad para aplicar cargas a velocidad constante. Para cada viga se determinó el módulo de elasticidad longitudinal (E_0) y la resistencia a flexión (f_m). Luego de finalizado el ensayo, de cada viga se extrajo una probeta para estimar la densidad aparente corriente (ρ) y el CH. Los valores E_0 , f_m y ρ fueron calculados según EN 384 (2010) para cada uno de los muestreos, realizando las correcciones por CH correspondientes para las variables E_0 y ρ .

3.4.1. Análisis de datos

Se analizaron los datos en el siguiente orden: primero se realizó un análisis descriptivo de las piezas sin clasificar; se analizó el modelo de predicción de E_0 , y

finalmente se formuló la propuesta de clasificación visual estructural para madera de pino del noreste de Uruguay.

3.4.1.1. *Análisis descriptivo de las piezas sin clasificar*

Se calcularon los valores característicos (media y quinto percentil) y el desvío estándar de E_0 y el quinto percentil de f_m y ρ . Se realizaron comparación de medias de E_0 de cada muestreo, mediante pruebas no paramétrica de Wilcoxon – Mann – Whitney.

3.4.1.2. *Modelos de predicción del módulo de elasticidad*

Se utilizaron Modelos Generalizados Aditivos (MGA) para predecir el módulo de elasticidad. Las variables incluidas en el modelo como regresoras fueron las que resultaron significativas en la predicción de E_0 (p-valor <0.05). Como indicadores de la capacidad de predicción del modelo se utilizó el porcentaje de variabilidad explicada (%VE) por el modelo y el porcentaje de error de predicción (%EP) por muestra de prueba respecto a E_0 medio. El %VE indica el porcentaje de variabilidad que puede ser explicada por el modelo a partir de los datos en estudio; por tanto se considerará mejor cuanto más cercano sea el valor a 100%. El %EP cuantifica el error de predicción al clasificar una nueva pieza. Para el cálculo del error se tomó al azar una submuestra compuesta por dos tercios del total de las piezas en estudio, denominada muestra de entrenamiento, a partir de la cual se ajustó el modelo de predicción. El tercio restante se usó para evaluar las diferencias entre los valores reales y los predichos a partir del modelo ajustado. Esta operación de submuestreo se repitió cincuenta veces sobre el total de las piezas y el error de predicción fue calculado en cada repetición. El promedio de estos errores es el error por muestra de prueba promedio, que se indicó como un porcentaje de la media de E_0 .

Para el análisis de datos se utilizó el paquete de análisis *mgcv* (Wood 2011) del software R (R Core Team 2014) El resultado del MGA devuelve gráficos de

curvas de nivel o de contorno, donde los valores de las variables visuales que resultaron significativas (p -valor $< 0,05$) están representadas de a pares sobre los ejes, y los valores de E_0 predichos sobre curvas de contorno. El valor de rigidez para la clase resistente inferior, C14 de EN 338 (2010) es de 7000 MPa. En base a las salidas gráficas de MGA y considerando el %EP del modelo, se obtuvieron los rangos de valores de las variables visuales significativas que predicen un valor de E_0 superior a 7000 MPa.

3.4.1.2. *Formulación de la propuesta de clasificación visual*

Utilizando estos rangos, se analizaron todas las posibles combinaciones de valores de las variables visuales teniendo en cuenta los requisitos de EN 384 (2010), y se seleccionó una combinación de variables visuales que presentó valores medios y característicos de E_0 , f_m y ρ que alcanzó las propiedades asociadas a una clase de resistencia de EN 338 (2010). Se calculó el porcentaje de rechazo de piezas que no alcanzaron esta clase de resistencia. A partir de la combinación de variables seleccionadas, se formuló la propuesta de clasificación visual estructural.

Vale señalar que en este trabajo no se utilizó la versión actual de EN 384:2016 porque el análisis de los datos fue realizado previo a la publicación de dicha norma.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. **Análisis descriptivo de las piezas sin clasificar**

Los valores del módulo de elasticidad medio ($E_{0,m}$) para M1 y M2 resultaron entre 4500-6500 MPa y 4700-8900 MPa, respectivamente (Tabla 2). Resultados similares fueron presentados por Moya *et al.* (2015) en estudios sobre madera de *P. elliottii/taeda* del litoral oeste y sur de Uruguay, donde el módulo de elasticidad medio fue de 5500-7400 MPa para madera de 25 años del litoral y 4600-5600 MPa en madera de 15 años del suroeste. En este trabajo se observó que el módulo de

elasticidad longitudinal fue la propiedad estructural limitante para definir una calidad visual asociada a la clase de resistencia de la norma europea EN 338 (2010).

Varios autores describen el efecto del manejo silvícola y la edad de corte de la madera sobre sus propiedades físicas y mecánicas. Crown y McConchie (1981) observaron que el efecto de las podas y raleos afecta entre un 1 y 3 % la densidad de la madera de *Pinus radiata* en Nueva Zelanda, siendo mayor la influencia de los años de rotación sobre la misma propiedad. Duchense (2006) indica que a mayores edades de rotación las propiedades mecánicas a flexión mejoran para madera de montes naturales de *Pinus banksiana* en Ontario (Canadá). En la Tabla 2, los resultados por muestreo indican en particular para *M1* valores significativamente menores de módulo de elasticidad medio respecto a *M2* (p-valor <0,0001), no evidenciándose diferencia significativa para los valores medios de resistencia (p-valor = 0,089).

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de las piezas.

	n ¹	$E_{0,m}^2$ [MPa]	$E_{0,k}^3$ [MPa]	$f_{m,k}^4$ [MPa]	ρ,k^5 [g/cm ³]
M1	122	5558 (1044)	3984	15	0,304
M2	111	6831 (2147)	3832	11	0,336
Totales	233	6165 (1777)	3918	13	0,300

¹Número de piezas estudiadas

²Valor medio de módulo de elasticidad. Entre paréntesis curvo el desvío estándar

^{3,4,5}Percentil 5% de módulo de elasticidad, resistencia y densidad aparente corriente respectivamente.

3.5.2. Modelos de predicción del módulo de elasticidad

De la aplicación de *MGA* para la predicción de E_0 partiendo de las variables visuales (Tabla 1), las variables que resultaron seleccionadas fueron: *NAPCP*, *TOR*, *ENC*, *DCANTO* y *DCARA*. A pesar que las variables *TOR* y *ENC* están más relacionadas con los procesos de secado de la madera que con las propiedades

mecánicas, en este modelo son seleccionadas como variables explicativas del módulo de elasticidad y se mantienen con el fin de describir la variabilidad y discriminar clases.

Este modelo presentó %VE de 54%, y de %EP respecto a E_0 medio fue de 21% (1295 MPa). Estos resultados son similares a los reportados por Hermoso *et al.* (2007) que encontró un coeficiente de determinación de 41,5% para explicar la variabilidad del módulo de elasticidad a flexión para madera de *Pinus radiata* del País vasco (España) a partir de la densidad y nudosidad.

Los gráficos de contorno resultantes del MGA se muestran en las Figuras 1 y 2.

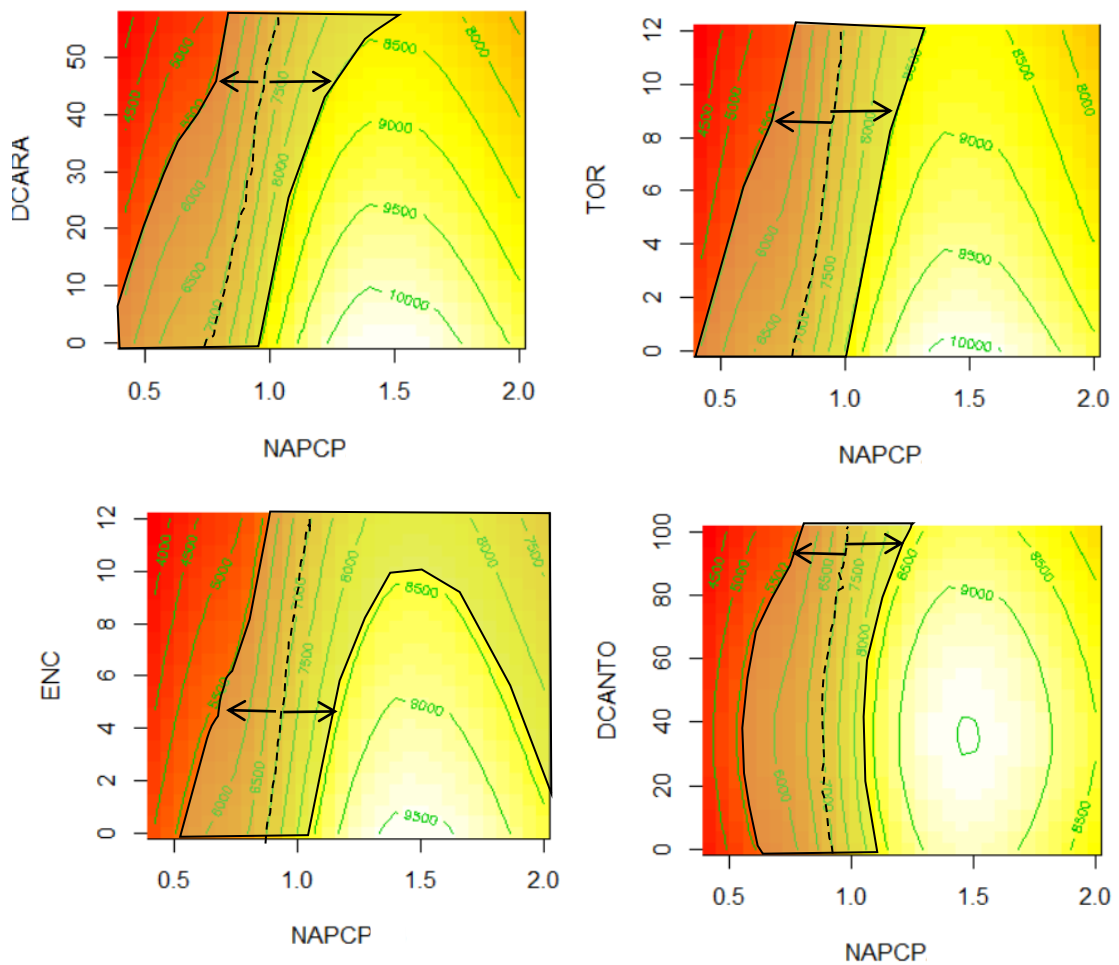


Figura 1. Representación gráfica del modelo de predicción del módulo de elasticidad longitudinal (E_0) a partir de variables visuales. DCARA = porcentaje de

diámetro de nudo mayor de cara respecto al ancho de la pieza; NAPCP = número de anillos por centímetro promedio; TOR = torcedura; ENC = encorvadura; DCANTO = porcentaje de diámetro de nudo mayor de canto respecto al espesor de la pieza. Las curvas de contorno verdes indican valores de E_0 . La curva punteada en negro indica $E_0 = 7000$ MPa. Las curvas de contorno negras encierran valores de $E_0 = 7000 \pm 1295$ MPa. Los colores más claros de los gráficos indican valores de E_0 altos y colores más oscuros valores más bajos.

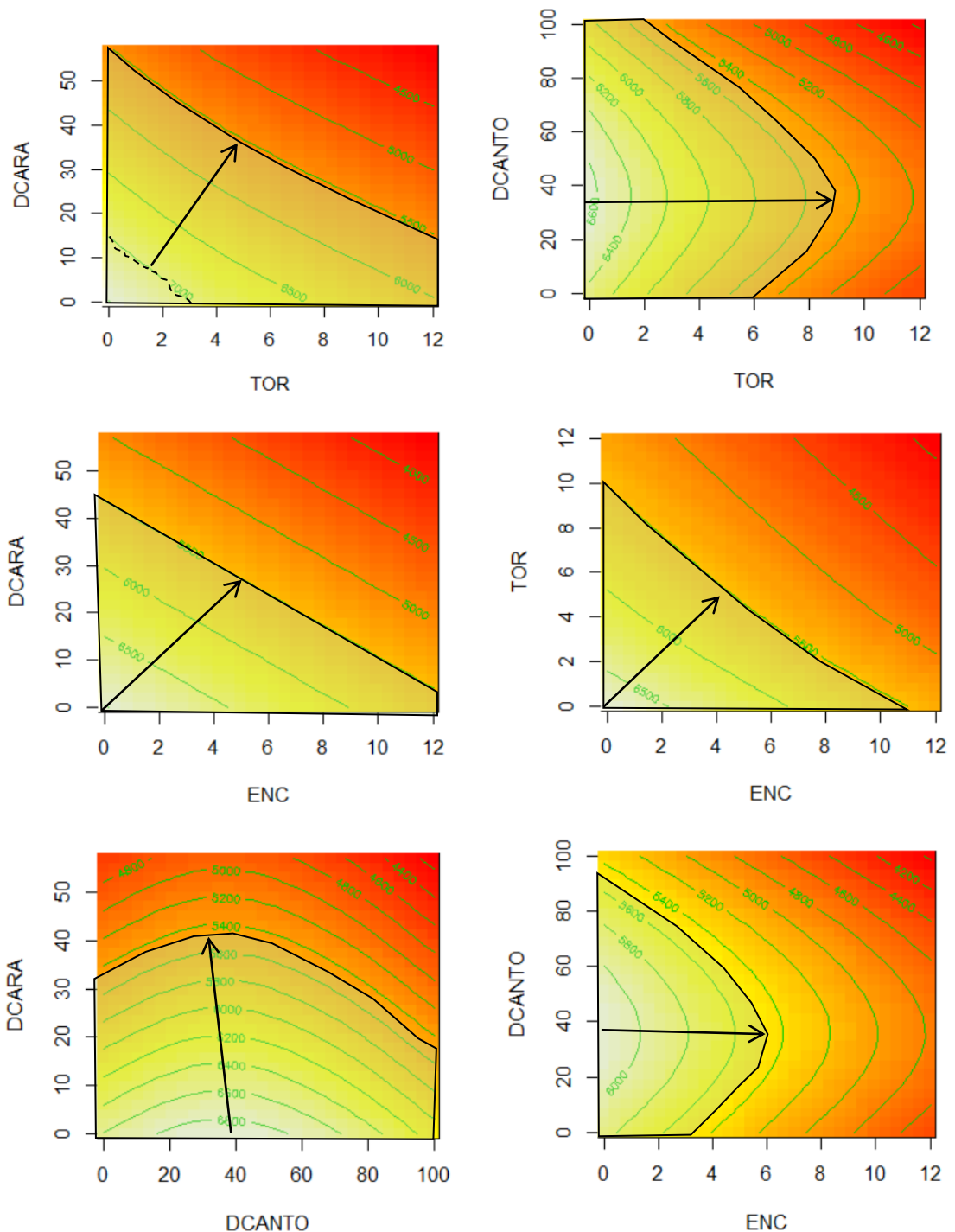


Figura 2. Representación gráfica del modelo de predicción del módulo de elasticidad longitudinal (E_0) a partir de variables visuales. DCARA = porcentaje de diámetro de nudo mayor de cara respecto al ancho de la pieza; TOR = torcedura; ENC = encorvadura; DCANTO = porcentaje de diámetro de nudo mayor de canto respecto al espesor de la pieza. Las curvas de contorno verdes indican valores de E_0 . La curva

punteada en negro indica $E_0 = 7000$ MPa. Las curvas de contorno negras encierran valores de $E_0 = 7000 \pm 1295$ MPa. Los colores más claros de los gráficos indican valores de E_0 altos y colores más oscuros valores más bajos.

Sobre cada gráfico, se tomaron los valores de las variables visuales que quedaron definidos por la curva de nivel de $E_0 = 7000$ MPa considerando un error de ± 1295 MPa. De esta forma se definieron los posibles rangos de valores de las variables visuales que predicen en conjunto un grupo de vigas con $E_{0,m} \geq 7000 \pm 1295$ MPa. Para la variable NAPCP se estima que será algún valor entre 0,5 y 1,0 anillos/cm, para la variable DCARA entre 20 y 40%, DCANTO entre 40 y 70%, ENC entre 3 y 11 mm en 2 m de largo y TOR entre 6 y 10 mm en 150 mm de ancho y 2 m de largo.

El rango para los anillos de crecimiento por centímetro es inferior a los valores indicados en la normativa española UNE 56544 (2011), que señala los límites dependiendo de la especie desde 1,0 a 2,2 anillos por centímetro. Valores similares a los propuestos por el modelo son los que adopta la normativa argentina IRAM 9662-3 (2005) de clasificación visual para *P. elliotii* y *P. taeda*, donde el límite se fijó entre 0,5 a 1,0 anillos por centímetro según la clase. En relación al rango de valores de DCARA y DCANTO los valores son similares a los propuestos por la norma española y argentina. En UNE 56544 (2011) se presenta 20 y 50% para nudo de cara, y 50 y 66% para nudo de canto, según la clase de la pieza. En la norma IRAM 9662-3 (2005), se presenta 33% y 66% como límites de las nudosidades según la clase. El rango de valores de torcedura y encorvadura obtenidos en este estudio, resultó más exigente que el indicado en la norma argentina, que fija 12 mm como límite para ambas clases y deformaciones. En cambio fueron similares a los indicados por la norma española, que señala 8 - 12 mm para la encorvadura y 6 - 12 mm para la torcedura, según la clase.

3.5.3. Formulación de la propuesta de clasificación visual

Se analizó una serie de combinaciones de variables visuales, utilizando los rangos obtenidos en la sección anterior y considerando los requerimientos indicados en EN 384 (2010). La combinación de variables visuales que resultó con mayores propiedades mecánicas quedó determinada por valores de vigas con NAPCP>0,7 anillos/cm, DCARA<30%, DCANTO<70%, TOR< 8 mm en 150 mm de ancho y 2 m de largo y ENC< 9 mm en 2 m de largo.

A partir de éste resultado se propone una calidad visual denominada EC7, cuyas propiedades indicadas en la Tabla 3, permiten asignarla a la clase de resistencia C14 de EN 338 (2010).

Tabla 3. Módulo de elasticidad medio y característico, resistencia y densidad característica de ambos muestreos asociadas a la calidad visual EC7.

	n ¹	$E_{0,m}$ ² [MPa]	$E_{0,k}$ ³ [MPa]	$f_{m,k}$ ⁴ [MPa]	ρ,k ⁵ [g/cm ³]
<i>M1</i>	46	6138 (1117)	4398	17	0,302
<i>M2</i>	51	8136 (1898)	5183	18	0,337
Población	97	7189 (1862)	4811	15	0,320

¹número de vigas clasificadas

²módulo de elasticidad medio. Entre paréntesis curvo se presenta el desvío estándar.

^{3,4,5}valores característicos de módulo de elasticidad, resistencia y densidad aparente corriente respectivamente.

⁴para los valores por muestreo, $f_{m,k}$ se corrigió por altura (kh=1). En los totales, $f_{m,k}$ se corrigió por número y tamaño de la muestra (ks=0,85) y por tipo de clasificación (kv=1).

Comparando las propiedades físicas y mecánicas de las piezas sin clasificar (Tabla 2) con las piezas de la base de datos clasificada (Tabla 3), los resultados totales se incrementaron con la clasificación entre un 17% y 23% para los valores del módulo de elasticidad medios y característicos respectivamente. Para los valores de

resistencia y la densidad la diferencia resultó en un 15% y un 7%, respectivamente. Aunque se evidencia una mejora en las características de la madera clasificada estructuralmente, se observa aún diferencia entre muestreos. Se compararon los resultados entre muestreos para las piezas clasificadas como EC7 y se observó que los valores de MI son significativamente menores que en $M2$ para los valores medios de E_0 (p-valor < 0,0001), f_m (p-valor=0,0005) y ρ (p-valor < 0,0001). Estas diferencias pueden deberse al mayor porcentaje de madera juvenil que presentó MI respecto a $M2$.

El porcentaje de piezas rechazadas de MI y $M2$ fue de 62% y 54%, respectivamente. Similares resultados se reportaron en Baño *et al.* (2015), donde el porcentaje de rechazo fue de 71% y 50% para dos muestreos de 15 y 25 años de *Pinus elliottii/taeda* del suroeste y litoral de Uruguay, respectivamente. Se evidencia que la madera de pino proveniente de árboles con edad de corte de 14-15 años presenta propiedades físicas y mecánicas inferiores que la madera de edades mayores (25-27 años). Se recomienda estudiar edades intermedias buscando conocer las rotaciones óptimas para obtener madera estructural.

Fank *et al.* (2016) aplicando normativa de clasificación visual de su país reportó un porcentaje de rechazo de 33% para dos muestreos de 27 y 30 años de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* respectivamente de Misiones (Argentina), 25% más bajo que el obtenido en nuestro estudio. Otro trabajo de *Pinus radiata* del norte de España que aplicó la norma UNE 56544:2005, obtuvo un 37% de rechazo para vigas clasificadas (Hermoso *et al.* 2007).

Un 58% de las piezas de la base de datos no alcanzan la calidad visual propuesta EC7, entonces se propone otra calidad visual que reduzca éste porcentaje de rechazo total, y permita un mejor aprovechamiento de la madera aserrada de pino disponible en el país para usos menos exigentes. Moya *et al.* (2015) definió una categoría “E5” que refiere al valor de elasticidad medio (5000 MPa) para un grupo de piezas de madera de *P. elliottii/taeda* de edades similares que no alcanzó la clase

de resistencia mínima de la norma europea EN 338 (2010) pero que pueden utilizarse por ejemplo como pie derecho en una estructura de bajas solicitaciones. A nivel nacional también, Baño *et al.* (2016) sugiere el uso de madera con propiedades físicas y mecánicas inferiores a EC7 como materia prima en la producción de madera contralaminada (*CLT*). Otros países como Nueva Zelanda, presenta en su normativa NZS 3603:1993 clases de resistencia en seco para estructuras con menores solicitaciones. El grado estructural “SG6” o “MSG6” que requiere una resistencia característica a flexión de 10 MPa y una rigidez media a flexión de 6000 MPa corresponde a madera que puede ser utilizada por ejemplo en muros de cargas bajas o correas de cerchas (Moore 2012). La normativa chilena NCh 1198 (2006) para las especies de pino cultivadas en ese país (excepto *Pinus radiata*), también presenta clases de resistencia para estructuras de menores solicitaciones. Por ejemplo “F4” y “F5” que admiten un módulo de elasticidad medio de 5000 MPa y 5500 MPa respectivamente.

Siguiendo la misma metodología usada para definir la calidad visual EC7, se analizaron nuevamente los resultados del *MGA*, buscando valores de las variables visuales que predigan $E_{0,m} = 5000$ MPa con un error de predicción de ± 1295 MPa. Se obtuvo una restricción para $NAPCP \geq 0,5$ anillos/cm, se mantuvieron los rangos de valores posibles para *DCARA* entre 20% - 40% y para *DCANTO* entre 40% - 70%. No encontrándose restricciones para *TOR* y *ENC*.

Utilizando estas nuevas restricciones para *NAPCP*, *DCARA* y *DCANTO*, se analiza una serie de combinaciones de valores de estas tres variables visuales buscando obtener el menor rechazo posible y se define una calidad visual EC5. La calidad visual EC5 quedo restringida a las piezas con $NAPCP \geq 0,5$ anillos/cm, $DCARA \leq 50\%$ y $DCANTO \leq 70\%$. En la Tabla 4 se presentan las propiedades físicas y mecánicas asociadas a EC5.

Tabla 4. Módulo de elasticidad medio y característico, resistencia y densidad característica de ambos muestreos asociadas a la calidad visual EC5.

	n^1	$E_{0,m}^2$ [MPa]	$E_{0,k}^3$ [MPa]	$f_{m,k}^4$ [MPa]	$\rho_{,k}^5$ [g/cm ³]
<i>M1</i>	59	5287 (844)	3765	16	0,305
<i>M2</i>	40	5709 (1647)	3263	11	0,336
Población	99	5458 (1243)	3563	12	0,317

¹número de vigas clasificadas

²módulo de elasticidad medio. Entre paréntesis curvo se presenta el desvío estándar.

^{3,4,5}valores característicos de módulo de elasticidad, resistencia y densidad aparente corriente respectivamente.

⁴para los valores por muestreo, $f_{m,k}$ se corrigió por altura ($kh=1$). En los totales, $f_{m,k}$ se corrigió por número y tamaño de la muestra ($ks=0,85$) y por tipo de clasificación ($kv=1$).

Fue posible reducir el porcentaje de rechazo total de 58% a 16%. El porcentaje de rechazo para *M1* y *M2* fue de 14% y 18%, respectivamente.

A partir de los resultados de este estudio se formuló la propuesta de clasificación visual estructural para *Pinus elliottii/taeda* del noreste de Uruguay (Tabla 5), que incluye los límites de las variables visuales obtenidas para las clases de resistencia EC7 y EC5. Además, en la propuesta se incluyen límites para las singularidades: grietas y rajaduras, bolsillos de resina, corteza, arista faltante y alteraciones biológicas tomados de la norma española UNE 56544.

Tabla 5. Propuesta de clasificación visual estructural para *Pinus elliottii/taeda* del noreste de Uruguay.

Variable visual	EC7	EC5
Diámetro de nudo mayor de cara (%)	< 1/3 h (30%)	<1/2 h (50%)
Diámetro de nudo mayor de canto (%)	< 2/3 h (70%)	
Número de anillos por centímetro	> 0,7 anillos/cm	> 0,5 anillos/cm
Médula	Se admite	
<u>Alabeos:</u>	Sin restricciones	
Combado	< 15 mm (*)	
Encorvadura	< 9 mm (*)	
Torcedura	< 8 mm (**)	
Grietas y rajaduras	< 1,0 m o <1/4 l (***)	
Bolsillo de resina	< 1,5 h (***)	
Corteza	< 1,5 h (***)	
Arista faltante	< 1/3 l (***)	
<u>Alteraciones biológicas:</u>		
Pudriciones	No se admite (***)	
Mancha azul	Se admite (***)	
Orificios de insectos	No se admite (***)	

EC7 es la calidad visual asociada a las propiedades físico-mecánicas $E_0= 7189$ MPa; $E_{0,k}= 4811$ MPa; $f_{m,k}= 15$ MPa; $\rho_k= 0,320$ g/cm³ ; EC5 es la calidad visual asociada a las propiedades $E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}= 3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k= 0,317$ g/cm³(*) en 2 m de largo (l); (**) en 150 mm de altura (h) en 2 m de largo; (***) Tomado de la norma española UNE 56544 (2011). Las piezas deben clasificarse en seco (contenido de humedad = 12%), de dimensiones h=150 mm y l=2,8 m.

3.6. CONCLUSIONES

En este estudio se definió una calidad visual EC7 asociada a la clase de resistencia C14 de EN 338 (2010). Adicionalmente, se estableció otra calidad visual EC5 con propiedades físicas y mecánicas inferiores ($E_{0,m}=5458$ MPa, $f_{m,k}=12$ MPa, $\rho_k=0,317$ g/cm³) que puede ser empleada como pie derecho en construcciones de bajo compromiso estructural o como materia prima para producir madera contralaminada.

El número de anillos de crecimiento por centímetro fue una variable visual importante que resultó estar muy relacionada con E_0 , pero no fue suficiente para definir una calidad visual estructural. Fue necesario considerar también el tamaño de los nudos y los alabeos, particularmente torcedura y encorvadura.

La madera proveniente de plantaciones de mayor edad (27 años) presentó mayores valores de propiedades físicas y mecánicas, y menores porcentajes de rechazo que la madera de menor edad (14 años). Por ello se recomienda continuar los estudios sobre madera de pino con destino estructural de ciclos de corte mayores a 25 años.

3.7. REFERENCIAS

AENOR (ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN).1997. Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades.UNE EN 1310. AENOR, Madrid, España.

AENOR (ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN). 2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. UNE 56544.AENOR, Madrid.

BAÑO, V.; GODOY, D.; VEGA, A. 2016. Experimental and numerical evaluation

of cross-laminated timber (CLT) panels produced with pine timber from thinnings in Uruguay. En: World Conference on Timber Engineering (2016, Vienna, Austria).

BAÑO, V.; MOYA, L.; O'NEILL, H.; CARDOSO, A.; CAGNO, M.; CETRANGOLO, G.; DOMENECH, L. 2015. Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera. Informe final. Facultad de Ingeniería, Montevideo. ISBN 978-9974-0-1344-5

BRUSSONI, A.; CABRIS, J. 2006. Regímenes silvícolas y retorno financiero para *Pinus taeda* en las zonas litoral oeste y noreste de Uruguay. Agrocienia Uruguay 10(2): 125-135.

CARDOSO, A.; MOYA, L.; BORGES, A. sin publicar. Prediction of bending stiffness of Uruguayan loblolly and slash pine timber applying different statistics techniques.

COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN. 2010a. Madera estructural. Clases resistentes. EN 338. CEN, Bruselas.

COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN. 2010b. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. EN 384. CEN, Bruselas.

COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN. 2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. EN 408. CEN, Bruselas.

COWN, D.J.; MCCONCHIE, D.L. 1981. Effects of thinning and fertilizer application on the wood properties of *Pinus radiata*. New Zeland Journal of Forestry Science 11: 79 – 91.

DIESTE A. 2012. Programa de promoción de exportaciones de productos de madera. [Disponible en línea].[http://gp.gub.uy/sites/default/files/documentos/programa_de_promocion_de_exportaciones_de_productos_de_madera - informe preliminar andres dieste - 2012.pdf](http://gp.gub.uy/sites/default/files/documentos/programa_de_promocion_de_exportaciones_de_productos_de_madera_-_informe_preliminar_andres_dieste_-_2012.pdf) [acceso Agosto 2014]

DUCHESNE, I. 2006. Effect of rotation age on lumber grade yield, bending strength and stiffness in Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) natural stands. Wood and fiber Science 38: 84 – 94.

FANK, P.Y.; STEFANI, P.M.; PITER, J.C. 2016. Análisis de la relación entre las propiedades mecánicas de flexión y tracción paralela a las fibras en la madera de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina. XV EBRAMEM. Curitiba, Brasil.

GREEN, D.W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. 1999. Mechanical properties of wood. Capítulo 4. Wood handbook. Wood as an engineering material. Forest Products Society, USA.

HERMOSO, E.; CARBALLO, J.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I. 2007. Caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del país vasco (España) acorde a las modificaciones normativas. Maderas. Ciencia y tecnología 9 (3): 223 – 232.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. 2005. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliotii (*Pinus taeda* y *Pinus elliotii*). IRAM 9662-3. IRAM, Argentina.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. 2006. Madera. Construcciones en madera. Cálculo. NCh 1198.INN, Chile.

JAMES, G.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. 2013. An introduction to statistical learning with application to R. Springer, New York.

MINISTERIO DE GANADERIA AGRICULTURA Y PESCA (MGAP). 2012. [Disponible en línea] <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-cartografia-forestal-2012,O,es,0>, [acceso setiembre 2016]

MINISTERIO DE GANADERIA AGRICULTURA Y PESCA (MGAP). 2016. [Disponible en línea] <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-extraccion-produccion-consumo,O,es,0>, [acceso setiembre 2016]

MOORE, J. 2012. Growing fit-for-purpose structural timber. What is the target and how do we get there? *New Zealand Journal of Forestry* 57 (3): 17-24.

MOYA, L.; CARDOSO, A.; CAGNO, M.; O'NEILL, H. 2015. Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17 (3): 597 – 612.

MOYA, L.; DOMENECH, L.; CARDOSO, A.; O'NEILL, H.; BAÑO, V. 2017. Proposal of visual strength grading rules for Uruguayn pine timber. *European Journal of wood and wood products* 75: 1017 – 1019.

O'NEILL H., TARIGO F., TRAMBAUER C. 2002. Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. dellitoral de Uruguay. Informe 1. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 41 pp.

O'NEILL H., TARIGO F., TRAMBAUER C. 2003. Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del litoral de Uruguay. Informe 2. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 47 pp.

O'NEILL, H.; TARIGO, F. 2003. Comportamiento en flexión de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliottii* de madera de tamaño real y de pequeñas probetas sin defectos. Nota técnica. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 6 pp.

O'NEILL, H.; TARIGO, F.; IRAOLA, P. 2004. Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del norte de Uruguay. Informe 3. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 48 pp.

O'NEILL, H.; TARIGO, F. 2008. Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del norte de Uruguay. Informe 7. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 42 pp.

PÉREZ DEL CASTILLO A. 2001. Módulo de elasticidad y módulo de rotura en tablas de tamaño real de *Pinus elliottii* del sur del Uruguay. Informe 7. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 29 pp.

PÉREZ DEL CASTILLO A.; VENTURINO A. 2003. Inspección visual de tablas de tamaño real de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliottii* de diferentes sitios del Uruguay. Informe 15. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 28 pp.

PÉREZ FAVARO A.; DE CASTRO R.; OTHA S. 2000. Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Informe 1. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 24 pp.

R CORE TEAM. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>

TUSET, R.; DURÁN, F. 2008. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Edición 2. Hemisferio Sur, Buenos Aires.

WOOD, S. 2011. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)* 73(1):3-36

YEE, T.W.; MITCHELL, N.D. 1991. Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science* 2: 587 – 602.

4. DISCUSIÓN GENERAL

En esta sección se discuten los resultados obtenidos en los artículos que se presentaron en los capítulos anteriores. Comenzando por el análisis descriptivo de la base de datos en estudio para ambas etapas, y las relaciones de las variables visuales con el módulo de elasticidad longitudinal. Luego se analiza y discute la selección del modelo de predicción del módulo de elasticidad longitudinal; y la obtención de los umbrales de las variables visuales relevantes para definir la propuesta de clasificación visual para la madera de pino del noreste de Uruguay.

4.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO Y RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES VISUALES Y EL MÓDULO DE ELASTICIDAD

A partir de los valores totales de ambos muestreos, se observó que el módulo de elasticidad medio ($E_{0,m}$) y el quinto percentil ($E_{0,k}$) resultaron inferiores a los de la clase C14 de EN 338 ($E_{0,m} = 7000$ MPa y $E_{0,k} = 4700$ MPa). Además, la comparación entre muestreos indicó para M1 valores significativamente menores de módulo de elasticidad medio respecto a M2 (p-valor $< 0,0001$), no evidenciándose diferencia significativa para los valores medios de resistencia (p-valor = 0,089). Resultados similares fueron presentados por Moya *et al.* (2015) sobre madera de pino del litoral oeste y sur de Uruguay, donde el módulo de elasticidad longitudinal fue la propiedad estructural limitante para definir una calidad visual asociada a la clase de resistencia de la norma europea EN 338 (CEN 2010a).

Los resultados de los coeficientes de correlación de Spearman para cada variable individual con el módulo de elasticidad permitieron detectar de forma primaria las variables que estaban más relacionadas con esta propiedad. Además se aplicó una prueba no paramétrica de Wilcoxon-Mann-Whitney para conocer las diferencias de la rigidez entre los grupos que constituyen las variables de clasificación. A continuación se discute como fueron estos resultados para las variables visuales más relevantes y para el módulo de elasticidad dinámico.

4.1.1. Nudos

En la etapa 1, no se encontró asociación entre E_0 y las variables relacionadas con las áreas nudosas: RANNA, RANNI, RANT y AB (p-valor > 0,05). Estos resultados contradicen los hallazgos de Dávalos y Limón (2009), que informaron un coeficiente de determinación (R^2) de 0,39 a partir de un modelo de regresión simple entre E_0 y el área de nudo proyectada. Además Gaunt (2005), en un estudio sobre pino Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) y pino radiata (*Pinus radiata*), obtuvo una asociación negativa entre la rigidez y el área del nudo proyectado, con un r de 0,38.

Por el contrario, las variables relacionadas con el diámetro del nudo presentaron una correlación significativa con E_0 . En la etapa 2, el coeficiente de correlación estimado (r) para DCARA y E_0 fue de -0,23 (p-valor <0,05), similar al obtenido en la etapa 1. El tamaño del nudo produce una desviación de la fibra de madera alrededor del mismo que disminuye las propiedades mecánicas (Fank *et al.* 2016, Guillaumet *et al.* 2008, Green *et al.* 1999, Kretschmann y Green 1999). En la madera de pino, la fibra alrededor del nudo forma frecuentemente un ángulo de casi 90 grados con respecto al eje longitudinal de la pieza, favoreciendo el fallo en el sentido del esfuerzo. De nuestro análisis, no se detectó correlación entre DCANTO y E_0 (p-valor = 0,15). Autores como Vega *et al.* (2011) en un estudio sobre *Castanea sativa* Mill. observaron coeficientes de correlación de -0,24 y -0,18 entre E_0 con DCARA y DCANTO, respectivamente.

4.1.2. Anillos de crecimiento

Se observó una correlación positiva entre E_0 y el número de anillos de crecimiento por centímetro (r = 0,56, p-valor <0,05). Es decir que a menor número de anillos, la rigidez de la madera es menor. Esto coincide con Green *et al.* (1999), que indica que las propiedades mecánicas disminuyen en los árboles de rápido crecimiento con altas proporciones de madera juvenil. Miller (1999) también concluye que en las coníferas donde cada anillo de crecimiento representa un año de vida del árbol, un mayor número de anillos anuales por centímetro reduce la proporción de madera juvenil respecto a la madera madura y, por lo tanto, mejora las propiedades mecánicas. En

línea con nuestros hallazgos, Haselein *et al.* (2000), en un estudio de *Pinus elliottii* de 30 años de edad, informó un coeficiente de determinación (R^2) de 0,78, utilizando un modelo de regresión lineal múltiple ajustado para estimar E_0 , considerando el porcentaje de madera madura y el número de anillos anuales por pulgada. Mascia y Cramer (2009) informaron una asociación entre E_0 y el número de anillos anuales por pulgada, basado en el coeficiente de determinación de un modelo de regresión cuadrática ($r = 0,69$). En cambio, Fernández-Golfín y Diez (1994) evaluaron la relación entre E_0 y el ancho del anillo anual en árboles de 25 años de tres especies de coníferas españolas y obtuvieron valores de r de 0,26 para *Pinus pinaster* y *P. silvestris* y r de 0,37 para *P. radiata*. En un estudio posterior sobre *P. radiata* y *P. pinaster*, Fernández-Golfín *et al.* (1997) indicaron un r de 0,59 entre E_0 y ancho de anillo anual, y ambos estudios concluyeron que no era posible predecir el módulo de elasticidad a partir del ancho de anillo.

4.1.3. Alabeos

En ambas etapas, la rigidez se correlacionó significativamente con la torcedura y la encorvadura, con coeficientes de correlación de -0,41 (p-valor <0,05) y -0,20 (p-valor <0,05), respectivamente. No se detectó correlación entre E_0 y el combado de la madera (p-valor = 0,10), probablemente debido a que los piezas no se ensayaron de cara a flexión estática. No fue posible encontrar resultados de otros autores, en los que únicamente se comparara la relación entre el módulo de elasticidad y las deformaciones debidas al secado.

4.1.4. Médula

Se observó una diferencia significativa entre los valores de E_0 para las piezas con y sin médula. Las piezas con médula presentaron un valor de E_0 , 21% menor que las piezas sin médula. Autores como Dahlen *et al.* (2014) y Fank *et al.* (2016) encontraron diferencias de 35% y 43% respectivamente para valores de E_0 de piezas con médula respecto a las sin médula. La diferencia obtenida en este trabajo resultó menor a la publicada por estos autores probablemente debido a que las piezas estaban sin clasificación estructural previa.

4.1.5. Módulo de elasticidad dinámico

En ambas etapas se observó un coeficiente de correlación alto de 0,92 (p -valor $<0,05$) entre E_0 y el módulo dinámico de elasticidad (E_d). Del mismo modo, Acuña *et al.* (2001) informaron un R^2 de 0,71 para un modelo de regresión lineal múltiple, para estimar E_0 considerando E_d y densidad de *Pinus sylvestris* español. Iñiguez (2007) presentó un r de 0,91 para una regresión lineal entre E_0 y E_d para el *Pinus nigra* también de procedencia española. Para la madera en estudio, debido al alto valor de coeficiente de correlación alcanzado, se puede indicar que es posible estimar E_0 a partir del módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de los ensayos no destructivos (Fakopp). Por lo que sería recomendable la utilización de este tipo de tecnología en el aserradero para conocer la rigidez de la madera que se está produciendo. Los equipos de estimación de la rigidez a partir de ensayos no destructivo (NDT) implican una inversión mayor para el aserradero respecto a la clasificación visual de la madera. Por esto, a partir de la aplicación de las técnicas estadísticas (AR, BA y MGA) se propuso realizar dos modelados: uno exclusivamente con variables visuales, simulando una clasificación visual, y un segundo modelado incluyendo además la variable E_d . Los modelos se compararon mediante porcentaje de variabilidad explicada (% VE) y porcentaje de error de predicción (% EP).

4.2. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD

4.2.1. Modelado 1

En los modelos en los que no se incluyó E_d , se encontró NAPCP y TOR como variables relevantes para la predicción de E_0 , para las tres técnicas estadísticas. Ambas variables están asociadas con la presencia de madera juvenil que reduce la rigidez de la madera. Un bajo número de anillos anuales por centímetro suele indicar tasas de crecimiento rápido en un árbol. Si el árbol es cosechado antes de su madurez, como es habitual en la mayoría de las plantaciones de pino uruguayo, se

pueden observar altas proporciones de madera juvenil con propiedades mecánicas bajas (Baño *et al.* 2015, Moya *et al.* 2015). Además de NAPCP y TOR, la técnica estadística de MGA encontró que ENC, DCANTO y DCARA también fueron variables relevantes para la predicción E_0 .

Como resultado de la comparación entre los modelos de predicción de rigidez que excluyen a E_d , el modelo obtenido a partir de MGA explicó la mayor variabilidad de E_0 (% VE = 54%) y presentó el menor error de predicción (% EP = 21%). Hermoso *et al.* (2007) reportaron R^2 de 41.5%, algo menor que el alcanzado en el presente trabajo, para explicar la variabilidad de la rigidez de flexión a partir de la densidad y los nudos sobre pino radiata Español. En comparación con el resultado de Hermoso *et al.* (2007), la variabilidad explicada alcanzada en éste trabajo fue buena, y por tanto el modelo obtenido a partir de MGA que incluye las variables visuales: NAPCP, TOR, ENC, DCANTO y DCARA, es el mejor modelo cuando no se incluye E_d como variable predictora de E_0 .

Si bien las variables TOR y ENC están más relacionadas con los procesos de secado de la madera que con las propiedades mecánicas, se mantienen en los modelos con el fin de describir la variabilidad y discriminar la madera en clases. En futuros estudios de modelado, sería interesante analizar los modelos sin que incluyan el efecto de los alabeos, para explicar la variabilidad con características propias de la madera.

4.2.2. Modelado 2

Del análisis de los modelos que incluyeron E_d , ésta fue la variable más relevante detectada por tres técnicas. El número de anillos de crecimiento por centímetro fue considerado relevante por AR y BA, no así por MGA. Según Yee y Mitchell (1991), MGA son sensibles a la co-linealidad de las variables de predicción, por lo que NAPCP no fue detectado como relevante por esta técnica porque resultó co-lineal con E_d ($r = 0,52$; p valor $<0,05$). La inclusión de E_d en los modelos mejoró 48%, 38% y 52% el error de predicción en las tres técnicas AR, BA y MGA, respectivamente. Por otra parte, los porcentajes de variabilidad explicada de los

modelos que incluyen Ed fueron más altos respecto a los modelos sin Ed: 83%, 81% y 88% para AR, BA y MGA, respectivamente. Diversos autores (Casado *et al.* 2011, Conde *et al.* 2007, Ceccotti y Togni 1996) concluyeron de manera similar sobre la mejora en la predicción de la rigidez mediante la combinación de las variables visuales con los NDT. El modelo obtenido a partir de MGA, fue el que alcanzó los mejores resultados de variabilidad explicada (88%) y error de predicción (10%), respecto a las demás técnicas. Siendo el valor de variabilidad explicada también superior a los indicados por diversos autores, que utilizaron otras técnicas estadísticas en sus estudios. Casado *et al.* (2011) presentó un R^2 de 0,68 para un modelo que combinó NDT y variables visuales de *Populus x euroamericana*. Conde *et al.* (2007) informaron para un modelo lineal de regresión múltiple un R^2 de 0,71 para el *P. laricio/P. Silvestris* español incluyendo NDT. Mier *et al.* (2005) aplicaron redes neuronales para predecir el módulo de elasticidad de *P. nigra* y *P. sylvestris* y obtuvieron un R^2 de 0.73, que mejoró en 15% el valor predicho obtenido por regresión múltiple. Finalmente, a partir de estas comparaciones y los resultados obtenidos, se pudo asumir que MGA es una técnica apropiada para la aplicación en problemas como los que presentó éste estudio.

4.3. UMBRALES

El análisis de las variables utilizando la técnica estadística MGA, permitió obtener una primera combinación de valores de las variables visuales, que cumple con requerimientos indicados en EN 384 (CEN, 2010b). Ésta combinación quedó definida por los siguientes límites de las variables: número de anillos de crecimiento por centímetro mayor a 0,7 anillos/cm., porcentaje de diámetro de nudo mayor de cara menor a 30% y de canto menor a 70% de la respectiva sección, torcedura menor a 8 mm y encorvadura menor a 9 mm, ambos en una longitud de 2 m de la pieza. Estas variables son coherentes con los resultados de otros autores y con la normativa internacional, aunque los límites de las variables que restringen la asignación a una calidad visual, difieren en algunos casos. El rango para los anillos de crecimiento por centímetro es inferior a los valores indicados en la normativa Española UNE 56544

(AENOR, 2011), que señala los límites dependiendo de la especie desde 1,0 a 2,2 anillos por centímetro. Valores similares a los definidos por el modelo propuesto son los que adopta la normativa Argentina IRAM 9662-3 de clasificación visual para *P. elliottii* y *P. taeda* (IRAM, 2005), donde el límite se fijó entre 0,5 a 1,0 anillos por centímetro según la pieza sea Clase 2 o Clase 1 respectivamente. En relación al rango de valores de DCARA y DCANTO los valores son similares a los usados en la norma Española y Argentina. En UNE 56544 (AENOR, 2011) se presenta 20 y 50% para nudo de cara, y 50 y 66% para nudo de canto, para las clases ME1 y ME2 respectivamente. En la norma IRAM 9662-3 (IRAM, 2005), se presenta 33% y 66% como límites de las nudosidades para la Clase 1 y 2 respectivamente. El rango de valores de torcedura y encorvadura obtenidos en este estudio, resultó más exigente que el indicado en la norma Argentina, que fija 12 mm como límite para ambas clases y deformaciones. En cambio fueron similares a los indicados por la norma Española, que señala 8 - 12 mm para la encorvadura y 6 - 12 mm para la torcedura, según sea ME1 o ME2 respectivamente.

Esta combinación de valores de las variables visuales permitió definir una calidad visual EC7, con propiedades estructurales similares a la clase de resistencia C14 (según EN 338) pero con un porcentaje de rechazo de 58%. Dado el alto porcentaje de rechazo de esta combinación, se determinó otra combinación de variables menos exigente respecto a los valores de las variables visuales, que redujo el porcentaje de rechazo a un 16%. Esta combinación quedó definida por los límites de las variables visuales: número de anillos de crecimiento por centímetro mayor a 0,5 anillos/cm., porcentaje de diámetro de nudo mayor de cara menor a 50%, manteniéndose el límite para el diámetro mayor de nudo canto menor a 70%. No se detectaron restricciones para los alabeos. Esta última combinación de variables definió la calidad visual que se llamó en este trabajo EC5, con propiedades físicas y mecánicas inferiores a las indicadas en la normativa Europea ($E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}= 3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k= 0,317$ g/cm³). La madera clasificada en esta calidad visual puede ser usada como materia prima para productos de ingeniería como madera contralaminada (Baño *et*

al., 2016) o vigas laminadas encoladas. Ambas calidades visuales formaron parte de la propuesta de clasificación visual.

Disponer de dos calidades visuales para la madera de pino nacional permite agregarle valor a la madera. Por un lado se diferencian las piezas que pueden venderse como madera estructural sujeta a mayores solicitaciones, como EC7, de la madera con propiedades inferiores (EC5) que puede ser usada en la industria de la construcción de viviendas formando parte de productos de ingeniería de la madera. Por otro lado, se descarta la madera que no es posible de ser usada como elemento estructural, piezas rechazadas por no cumplir alguna de los requisitos indicados en la propuesta.

A partir de los resultados obtenidos de la madera muestreada, se observó que las propiedades físicas y mecánicas de la madera de pino nacional, principalmente la elasticidad son bajas, debido al alto porcentaje de madera juvenil. Este resultado era el esperado, de acuerdo a otros resultados de estudios anteriores realizados sobre los pinos de plantaciones uruguayas de rápido crecimiento (Moya *et al.* 2015, O'Neill *et al.* 2008, O'Neill *et al.* 2004). De todas maneras, con la aplicación del modelo de clasificación visual estructural propuesto, fue posible mejorar un 17% y un 23% los valores medios y característicos de módulo de elasticidad respectivamente. También se mejoraron aunque en menor medida, un 15% y un 7% los valores característicos de resistencia y densidad respectivamente. Aunque se evidenció una mejora en las propiedades de la madera clasificada estructuralmente, se observan aún diferencias entre los muestreos. El muestreo de menor edad (M1) presentó valores medios de módulo de elasticidad significativamente menores que M2 ($p\text{-valor} < 0,05$), debido al mayor porcentaje de madera juvenil que caracteriza a las plantaciones de menos de 20 años (Tuset y Durán 2008, Green *et al.* 1999, Kretschmann y Bendtsen 1992). Aunque se requiere de una mayor profundización en este punto, se puede indicar como recomendación la utilización de madera procedente de plantaciones de más de 20 años para fines estructurales.

Una de las variables que no formó parte de esta propuesta de clasificación visual fue la presencia de médula. Varios autores señalan su influencia sobre las propiedades

mecánicas en plantaciones de coníferas de rápido crecimiento (Fank *et al.* 2016, Dahlen *et al.* 2014), en este trabajo se detectaron diferencias significativas de E_0 medio entre las piezas con y sin médula, pero no resultó significativa en el análisis conjunto de las variables para la predicción de E_0 . Esto puede justificarse dado la relación alta de piezas con medula respecto a sin médula que conformaban la base de datos, debido a la edad de corte de los muestreos y el manejo. En futuros trabajos se debería complementar esta base de datos con muestreos provenientes de plantaciones de mayor edad y con un manejo silvícola que permita obtener piezas sin madera cercana a la médula.

5. CONCLUSIONES FINALES

El trabajo de tesis logró verificar las hipótesis planteadas y presentó una propuesta de reglas de clasificación visual para madera aserrada de pino (*Pinus elliottii* y *P. taeda*) proveniente de plantaciones del noreste de Uruguay.

En relación al primer objetivo específico planteado, la variable visual que resultó más relevante en la predicción de las propiedades físicas y mecánicas, en particular para el módulo de elasticidad, para el pino nacional fue el número de anillos de crecimiento por centímetro. Sin embargo no fue suficiente para definir una calidad visual estructural; se debió considerar el tamaño de los nudos y los alabeos, particularmente la torcedura y la encorvadura, para definir un modelo de predicción con menor error y mayor poder de explicación.

La aplicación de las técnicas estadísticas Árboles de regresión, Bosques aleatorios y Modelos generalizados aditivos permitieron seleccionar y jerarquizar las variables visuales más relevantes en la predicción del módulo de elasticidad. El Modelo generalizado aditivo fue considerado como el mejor modelo para la predicción del módulo de elasticidad de la madera de *Pinus elliottii* y *P. taeda* del noreste del Uruguay.

Se logró definir una propuesta de clasificación visual estructural para la madera de pino nacional, en la cual se definieron dos calidades visuales. Se definió una calidad visual EC7 asociada a la clase de resistencia C14 de la norma europea EN 338 (CEN, 2010a) y otra calidad visual EC5 con propiedades físicas y mecánicas inferiores ($E_{0,m}=5458$ MPa, $f_{m,k}=12$ MPa, $\rho_k=0,317$ g/cm³) con madera que podría ser empleada como pie derecho en una estructura de cargas bajas o como materia prima para producir madera contralaminada. La calidad EC5 permitió recuperar 42% de la madera aserrada que no calificó como EC7.

Además de responder a los objetivos específicos planteados, se observó que:

- La madera proveniente de plantaciones de mayor edad (27 años) presentó mayores propiedades físicas y mecánicas y menores porcentajes de rechazo que la madera de menor edad (14 años). Por lo que se recomienda profundizar los estudios en edades de corte intermedias para obtener una edad de rotación óptima para la madera de pino con destino estructural.
- La clasificación visual estructural complementada con clasificación mecánica (no destructiva) reduce un 46% en promedio el error de predicción del módulo de elasticidad para piezas de madera aserrada de pino. Se recomienda profundizar los estudios en otras técnicas no destructivas de estimación del módulo de elasticidad que hagan factible la implementación en los aserraderos nacionales.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 1997. Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190. Rio de Janeiro:ABNT.107 p.
- Acuña L, Llorente A, Casado M, Herrera C. 2001. Clasificación de la madera de *Pinus sylvestris* L. mediante ensayos no destructivos. En: Congreso Forestal Español (3er., 2001, Granada, España). Actas.
- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). 2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. UNE 56544. Madrid, España. AENOR. 21 p.
- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). 1997. Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades. UNE EN 1310. Madrid, España. AENOR. 26 p.
- Austin M. 2007. Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some possible new approaches. *Ecological modeling*. 200(1): 1-19.
- Baño V, Godoy D, Vega A. 2016. Experimental and numerical evaluation of cross-laminated timber (CLT) panels produced with pine timber from thinnings in Uruguay. En: World Conference on Timber Engineering. (2016, Vienna, Austria). World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016). Viena.
- Baño V, Moya L, O'Neill H, Cardoso A, Cagno M, Cetrangolo G, Domenech L. 2015. Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera. Informe final. Montevideo. Facultad de Ingeniería.
- Berlanga V, Rubio M.J, Vilá R. 2013. Como aplicar árboles de decisión en SPSS. *Revista d'Innovació i Recrea en Educació*, 6(1): 65 – 79.
- Breiman L. 2001. Random Forest. *Machine Learning*, 45: 5 – 32.
- Brussoni A, Cabris J. 2006. Regímenes silvícolas y retorno financiero para *Pinus taeda* en las zonas litoral oeste y noreste de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 10(2): 125-135 pp.

- Cardoso A, Moya L, Borges A. 2018. Prediction of bending stiffness of Uruguayan loblolly and slash pine timber applying different statistics techniques. [Datos sin publicar]
- Casado M, Acuña L, Vecilla D, Basterra L, Relea E, López G. 2011. Ultrasonido y parámetros de clasificación visual para la caracterización de madera estructural de *Populus x euramericana* I-214. En: Congreso Ibero-americano de madera en la construcción (1, 2011, Coímbra, Portugal). CIMAD 11: 1o Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção. Coimbra. Facultad de Ciencias y Tecnología de Universidad de Coimbra.
- Ceccotti A, Togni M. 1996. NDT on large ancient timber beams: assessment of the strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods. En: International Symposium on Nondestructive Testing of wood (10, 1996, Lausanne, Suiza). Proceedings. Lausanne. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 429 pp.
- CEN (Comité Europeo de Normalización). 2012. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. EN 1912. Bruselas. CEN. 19 p.
- CEN (Comité Europeo de Normalización). 2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. EN 408. Bruselas. CEN. 37 p.
- CEN (Comité Europeo de Normalización). 2010a. Madera estructural. Clases resistentes. EN 338. Bruselas. CEN. 11 p.
- CEN (Comité Europeo de Normalización). 2010b. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. EN 384. Bruselas. CEN. 19 p.
- Conde M, Fernández-Golfín JI, Hermoso E. 2007. Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Materiales de construcción*. 57 (288): 49 – 59.

- Cown DJ, Mc Conchie DL. 1981. Effects of thinning and fertilizer application on the wood properties of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 11: 79 – 91.
- Cutler DR, Edwards Jr TC, Beard KH, Cutler A, Hess KT, Gibson J, Lawler JJ. 2007. Random forests for classification in ecology. *Ecology*. 88(11): 2783 – 2792.
- Dahlen J, Jones RD, Seale RD, Shmulsky R. 2014. Sorting lumber by pith and its effect on stiffness and strength in southern pine N° 2 2x4 lumber. *Wood and Fiber Science*. 46 (2): 186 – 194.
- Dávalos R, Limón R. 2009. Efecto de los nudos sobre la resistencia y rigidez en flexión de la madera de pino. *Ciencia Forestal en México*, 34(106): 205-212.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M, Robledo CW. InfoStat version 2013. Argentina. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba.
- Dieste A. 2012. Programa de promoción de exportaciones de productos de madera [en línea]. 3 agosto 2014. http://gp.gub.uy/sites/default/files/documentos/programa_de_promocion_de_exportaciones_de_productos_de_madera_informe_preliminar_andres_di_este_-_2012.pdf
- Duchesne I. 2006. Effect of rotation age on lumber grade yield, bending strength and stiffness in Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) natural stands. *Wood and Fiber Science*. 38: 84 – 94.
- Esteban LG, Fernández FG, de Palacios P. 2009. MOE prediction in *Abies pinsapo* Boiss. timber: Application of an artificial neural network using non-destructive testing. *Computers & Structures*. 87(21): 1360-1365.
- Fank PY, Stefani PM, Piter JC. 2017. Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el nordeste de Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 19(3): s/p (versión on-line)
- Fank PY, Stefani PM, Piter JC. 2016. Análisis de la relación entre las propiedades mecánicas de flexión y tracción paralela a las fibras en la madera de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina. En: *Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (XV, 2016, Curitiba)*. Actas. Curitiba.

- Fernández-Golfín JI, Diez MR. 1994. Influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de diversas especies. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*. 3 (2): 211 – 219.
- Fernández-Golfín JI, Diez MR, Gutiérrez A. 1997. Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los sistemas central e ibérico mediante probetas de tamaño estructural. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*. 6 (1 y 2): 183 – 214.
- Gaunt D. 2005. Upcoming changes to structural timber. *New Zealand Timber Design Journal*. 13(1): 19–25.
- Green DW, Winandy JE, Kretschmann DE. 1999. Mechanical properties of wood. En: Forest Products Society .Wood handbook. Wood as an engineering material. Madison. Forest Products Society.4-1 – 4-4.
- Guillaumet AA, Manavella RD, Filippetti MC, Diab J, Armas A. 2008. Relación entre la nudosidad y las características resistentes de la *Araucaria angustifolia* (pino Paraná). En: Jornadas Argentinas de Ingeniería estructural (20, 2008, Buenos Aires, Argentina). Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.22 p.
- Guillaumet AA, Manavella RD, Filippetti MC, Diab J, Armas A. 2007. Clasificación visual resistente de la *Araucaria angustifolia* procedente de El Dorado, Misiones Argentina. En: Congreso Iberoamericano de productos forestales y no forestales (3er, 2007, Buenos Aires, Argentina). Actas. 31 p.
- Guisan A, Edwards Jr TE, Hastie T. 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene.*Ecological Modelling*. 157(2): 89–100.
- Haselein CR, Cechin E, Santini E, Gatto D. 2000. Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* Engelm aos 30 anos de idade. *Ciencia Florestal*. 10(2): 135 – 144.
- Hermoso E, Carballo J, Fernández-Golfín JI. 2007. Caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del país vasco (España) acorde a las modificaciones normativas. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 9 (3): 223 – 232.

- Hoffmeyer P. 1995. Wood as a building material. En: Blass HJ, Aune P, Choo BS, Goralcher R, Griffiths DR, Hilson BO, Racher P, Steck G. Timber Engineering SPEP1. Basis of design, material properties, structural components and joints. The Netherlands: Centrum Hout. A4/1 – A4/21.
- INN (Instituto Nacional de Normalización). 2006. Madera. Construcciones en madera. Cálculo. NCh 1198. Santiago de Chile: INN. 231 p.
- INN (Instituto Nacional de Normalización). 2005. Pino radiata – Clasificación visual para uso estructural- Especificaciones de los grados de calidad. NCh 1207. Santiago de Chile: INN. 20 p.
- Iñiguez G. (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis Doctoral. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. 236 p.
- IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Certificación). 2005. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliottii (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). IRAM 9662-3. Buenos Aires: IRAM. 15 p.
- James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R. 2013. Tree-Based Methods. En: An introduction to statistical learning with application to R. New York: Springer. 441 p.
- Kessel MH, Plinke B, Augustin R, Huse M. 1998. Strength grading of construction timber with large cross sections. En: World Conference on Timber Engineering (1998, Montreux, Switzerland). Proceedings of the World Conference on Timber Engineering. Montreux: Presses polytechniques et universitaires romandes. pp. 557-562.
- Kretschmann D, Green D. 1999. Lumber Stress grades and design properties. En: Forest Products Society. Wood Handbook. Wood as an engineering material. Madison: Forest Products Society. pp. 6-1 - 6-14
- Kretschmann D, Bendtsen B. 1992. Ultimate tensile stress and modulus of elasticity of fast-grown plantation loblolly pine lumber. Wood and Fiber Science, 24(2): 189 – 203.

- Mascia NT, Cramer SM. 2009. On the effect of the number of annual growth rings, specific gravity and temperature on redwood elastic modulus. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 11(1): 47-60.
- Meynard CN, Quinn JF. 2007. Predicting species distributions: a critical comparison of the most common statistical models using artificial species. *Journal of Biogeography*, 34(8): 1455-1469.
- MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2016. Extracción-Producción-Consumo-Mano de obra-Comercio exterior. [En línea] 14 marzo 2017. <http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/dgfboletinestadistico2016web.pdf>,
- MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2012. Actualización de la cartografía forestal del Uruguay.[En línea]. 20 setiembre 2016.<http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-cartografia-forestal-2012,O,es,0>,
- Mier R, García de Seca JL, Díez MR, Fernández-Golfín JI, Hermoso E. 2005. Aplicación de Redes Neuronales a la clasificación de madera estructural. Comparación con otros métodos de clasificación. En: Congreso Forestal Español (4to, 2005, Zaragoza, España). 4to. Congreso forestal español. Respuestas para la sostenibilidad.
- Miller R. 1999. Structure of Wood. En: Forest Products Society. Wood Handbook. Wood as an engineering material. Madison: Forest Products Society. pp. 2-1 - 2-4
- Moore J. 2012. Growing fit-for-purpose structural timber. What is the target and how do we get there? *New Zealand Journal of Forestry*, 57 (3): 17-24.
- Moya L, Cardoso A, Cagno M, O'Neill H. 2015. Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17 (3): 597 – 612.
- Moya L, Domenech L, Cardoso A, O'Neill H, Baño V. 2017. Proposal of visual strength grading rules for Uruguayn pine timber. *European Journal of wood and wood products*, 75: 1017 – 1019.

- Moya L, Laguarda MF, Cagno M, Cardoso A, Gatto F, O'Neill H. 2013. Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Forest Products Journal*, 63 (3/4): 128 – 137.
- O'Neill H. 2006. Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos. Informe 4. Montevideo. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 9 pp.
- O'Neill H, Tarigo F. 2008. Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del norte de Uruguay. Informe 7. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Montevideo. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 42 pp.
- O'Neill H, Tarigo F. 2003. Comportamiento en flexión de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliottii* de madera de tamaño real y de pequeñas probetas sin defectos. Nota técnica. Montevideo. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 6 pp.
- O'Neill H, Tarigo F, Iraola P. 2004. Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del norte de Uruguay. Informe 3. Montevideo. Laboratorio Tecnológico del Uruguay.
- O'Neill H, Tarigo F, Iraola P. 2003. Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del norte de Uruguay. Informe 3. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Montevideo. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 48 pp.
- O'Neill H, Tarigo F, Trambauer C. 2002. Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del litoral de Uruguay. Informe 1. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Montevideo. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 41 pp.
- Pérez del Castillo A. 2001. Módulo de elasticidad y módulo de rotura en tablas de tamaño real de *Pinus elliottii* del sur del Uruguay. Informe 7. Montevideo. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 29 pp.
- Pérez del Castillo A, Venturino A. 2003. Inspección visual de tablas de tamaño real de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliottii* de diferentes sitios del Uruguay. Informe 15. Montevideo. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 28 pp.
- Pérez Favaro A, De Castro R, Otha S. 2000. Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Informe 1. Montevideo. Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 24 pp.

- Pou R. 2016. Forestación en Uruguay. Una apuesta al porvenir. 1ª. Ed. Montevideo: Plus-Ultra Ediciones.156 pp.
- R Team Core. 2014. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Saranpaa P. 2003. Wood density and growth. En: Barnett J, Jeronimidis G. Wood quality and its biological basis. Oxford: Blackwell Publishing Ltd. 87 – 117.
- Tuset R, Durán F. 2008. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. 2ª Ed. Vol. 2. Montevideo: Hemisferio Sur. 503 pp.
- Vega A. 2013. Caracterización mecánica de la madera estructural de *Castanea sativa* Mill. Clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos. Tesis doctoral. Lugo, España. Universidad de Santiago de Compostela. 284 pp.
- Vega A, Dieste A, Guaita M, Majada J, Baño V. 2012. Modelling of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. structural timber by combination of non-destructive variables and visual grading parameters. European Journal of Wood and wood products,70(6): 839 – 844.
- Vega A, Guaita M, Dieste A, Majada J, Fernández I, Baño V. 2011. Evaluation of the influence of visual parameters on wave transmission velocity in sawn chestnut timber. En: International Wood Non-destructive Testing Symposium (17, 2011, Sopron). Proceedings of the 17th International Wood Non-destructive Testing Symposium. Sopron, Hungary. University of west Hungary.
- Wagner M. 2010. Clasificación de la madera aserrada estructural de Pino radiata. [en línea]. 15 noviembre 2014.
http://web.ffm.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=34:clasificacion-de-la-madera-aserrada-estructural-de-pino-radiata&catid=6:tecnologia-de-la-madera&Itemid=13
- Wilkinson L. 2004. Classification and regression trees. En: Systat 11. Richmond, California. SYSTAT Software Inc. pp. 35-56.

- Wood S. 2011. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)*. 73(1):3-36
- Yee TW, Mitchell ND. 1991. Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science*, 2: 587 – 602.
- Zobel B, Sprague J. 2012. The importance of juvenile wood. En: *Juvenile wood in forest trees*. Berlin: Springer Science & Business Media. 304 pp.