

# MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE FRUTOS Y MADEROS.

**Experimental methods for the measurement of the mechanical properties of fruits and woods.**

## RESUMEN

El paso del tiempo tiene distintos efectos en productos frutales y maderas. Uno de los más conocidos es la pérdida de rigidez o ablandamiento interno. Sin embargo, esta característica no se puede verificar a simple vista, requiere una comprobación táctil, muchas veces más cualitativa que cuantitativa. En este trabajo se presenta una revisión de métodos experimentales no destructivos para la medición de propiedades físico mecánicas en maderas y frutos que permiten determinar su estado de madurez y estimar el momento adecuado para su explotación.

**PALABRAS CLAVES:** Ensayos no destructivos, estimación de propiedades mecánicas, madurez, frecuencia natural, velocidad de onda

## ABSTRACT

*The elapsed time has different effects in fruits and woods. One of the most common effects is the loss of rigidity or internal weakening. However, this feature cannot be verified to the naked eye, it requires the use of tactile testing, this test is mostly qualitative instead of quantitative. In this work, a review of non-destructive experimental methods to measure physical and mechanical properties in fruits and woods is presented. That allows to determine its maturity grade and to estimate the right time for the harvest.*

**KEYWORDS:** *Non-destructive tests, Estimation of mechanical properties, Maturity grade, natural frequency, wave speed*

## 1. INTRODUCCIÓN

En estos tiempos de expansión comercial, los medios de control de calidad se han vuelto aspectos fundamentales para el establecimiento de buenas relaciones mercantiles. En el caso de frutos y de la madera, la determinación de la madurez se basa en la estimación visual o en las características geométricas como tamaño, diámetro, color.

La obtención de criterios de medición de la calidad, cada vez más representativos, facilita la formulación de modelos matemáticos para seleccionar las condiciones y estimar la vida en el almacenamiento, para efectuar el seguimiento de los procesos térmicos y no térmicos, y para estimar y controlar la degradación de los residuos presentes en los frutos.

La determinación de la madurez en la madera depende de criterios técnicos, tecnológicos, económicos, biológicos y físicos. Razón por la cual el conocimiento de la especie, de las condiciones de sitio, la edad, propiedades físicas y mecánicas y características bioquímicas son esenciales para hacer una mejor aproximación a la madurez.

En este trabajo se presenta una revisión de los métodos experimentales para la determinación de las propiedades físico mecánicas, y de la madurez en frutos maderas. Las principales propuestas se basan en la utilización de la determinación de la frecuencia natural en ensayos de

## HÉCTOR FABIO QUINTERO R

Ingeniero Mecánico, M. Sc., Ph. D.  
Profesor Titular  
Universidad Tecnológica de Pereira  
hquinte@utp.edu.co

## EDISON HENAO CASTAÑEDA

Ingeniero Mecánico, M. Sc.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
edisonhenao@utp.edu.co

## MAURICIO MONROY

Ingeniero Electrónico, M. Sc.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
mauriciomonroy@utp.edu.co

## JUAN CARLOS CAMARGO G.

Agrólogo, M. Sc., Ph.D  
Profesor Titular  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jupipe@utp.edu.co

vibración libre, en la medición de la velocidad de la onda de esfuerzo y en la atenuación de la señal.

## 2. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES EN FRUTOS

Courdrier y otros [1] utilizan la respuesta espectral a la excitación impulsiva de una fruta para determinar la rigidez interna de la misma y; por lo tanto, obtener información sobre su estado de madurez. Para realizar dicha medición se utiliza un excitador electromecánico con el que se aplica un tren de pulsos a tres piezas frutales: una manzana *golden*, una manzana *starking* y un mango *manila*. Con dos acelerómetros, figura 1, (uno entre la fruta y el excitador y otro sobre la fruta) y un analizador de espectros de dos canales, se obtuvieron las magnitudes de respuesta espectral para cada fruta, durante tres semanas de maduración. Con los resultados obtenidos los autores demostraron la relación que existe entre el corrimiento de frecuencia de la principal resonancia de los espectros medidos con el factor de rigidez, y de este factor con el tiempo de madurez.

Valente y Ferrandis [2] utilizan un método acústico para medir las propiedades viscoelásticas de la pulpa de mango. Los autores utilizan una campana, compuesta de dos cilindros concéntricos en el que introducen la pulpa de mango, cambiando así la frecuencia de resonancia de

la campana y la amplitud de la atenuación de la probeta en la que está vibrando el aire el medio y la pulpa insertada. Los autores utilizaron pulpa de diferentes estados de madurez, con lo que concluyeron que se puede utilizar ensayos acústicos para la determinación de las propiedades del mango.

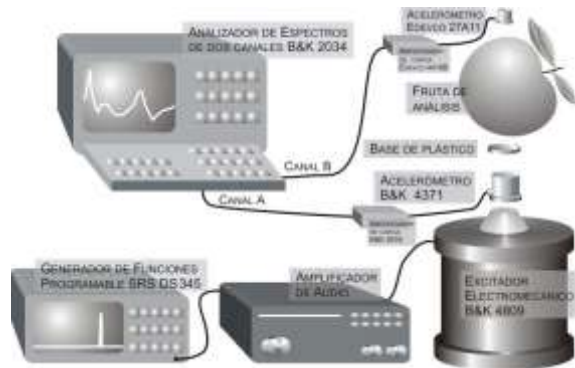


Figura 1. Determinación de la frecuencia natural en frutos [1]

Gómez y otros [3], utilizan ensayos destructivos y no destructivos para la medición de las propiedades de la pera. Los autores analizaron la relación entre la respuesta en frecuencia de la pera y la firmeza de la fruta. La firmeza de la fruta es dado por, [4]:

$$S = f^2 m^{2/3} \quad (1)$$

donde  $S$  es el coeficiente de rigidez equivalente ( $\text{kg}^{2/3}\text{s}^{-2}$ ), y  $f$  es la frecuencia dominante en la respuesta en frecuencia (Hz), y  $m$  la masa del fruto (kg). El módulo de Young del fruto,  $E$  (Pa), es estimado mediante [4]:

$$E = f^2 m^{2/3} \rho^{1/3} \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad. En la figura 2 se presenta el ensayo de los autores para medir las propiedades en la pera.

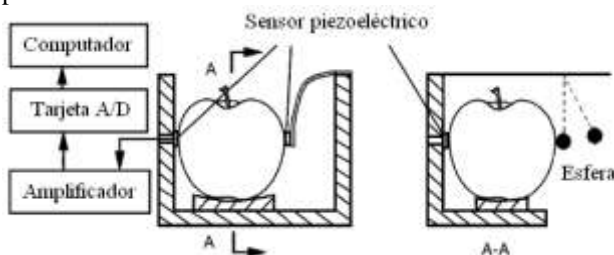


Figura 2. Ensayo acústico en una pera, [3]

Los autores establecieron una relación entre la frecuencia dominante, la firmeza y el tiempo de almacenamiento del fruto.

Saltveit [5] intentó relacionar el sonido que produce un tomate al ser golpeado con el dedo índice y el tiempo necesario para que alcance el estado de viraje. Para ello se golpearon las muestras y se grabó el sonido producido.

A pesar de que las señales acústicas mostraron ciertas tendencias que permitieron marcar diferencias entre lotes en lo que se refiere al estado de madurez, la dispersión de los datos fue tal que dio lugar a numerosos errores en la clasificación de individuos.

Diezma y otros [6] utilizan señales acústicas para evaluar la calidad interna en sandías, determinando así cavidades internas y agrietamiento de la pulpa. En este trabajo se utiliza la variación del espectro de frecuencia de la señal acústica como método de diagnóstico.

Chen y otros [7] relacionan la frecuencia de resonancia con la firmeza en los melones. Los autores realizaron el estudio de elementos finitos del fruto y concluyen que se puede detectar defectos en el melón observado la variación de las formas modales del fruto. Un trabajo similar para manzanas es presentado en [8].

En [9] se determina la madurez del mango utilizando propiedades mecánicas y físicas. Los autores observaron la variación en tamaño, gravedad específica, cantidad de sólidos solubles, acidez, color de la superficie, respuesta acústica (coeficiente de rigidez basado en la frecuencia de resonancia y el peso de la fruta), respuesta del impacto (pico de aceleración/tiempo) en el tiempo después de ser recogida. En este trabajo se reporta un 89% en la exactitud de clasificación de cuatro niveles de madurez basado en métodos no destructivos.

Musse y otros [10], presentan un método para cuantificar la microporosidad aparente en frutas utilizando imágenes de resonancia magnética (MRI). El método es basado en las diferencias de susceptibilidad entre el gas que ocupa los espacios intercelulares y su entorno interior de la pulpa de fruta. Se realizaron ensayos con dos campos magnéticos diferentes (1,5 y 0,2 T) sobre manzanas y tomates. Los autores validaron el método comparando los resultados de MRI con la estimación de la porosidad local de la pulpa utilizando un experimento microtomográfico de rayos X. Los autores concluyen que el método MRI es efectivo para determinar la distribución de la microporosidad aparente de la fruta.

Wanitchang y otros [11] realizan un estudio sobre la predicción de la madurez de la pitaya utilizando métodos no destructivos. Los autores combinaron mediciones del peso específico, esfericidad, color, el espectro del reflejo de la luz, utilizando métodos lineales combinados con la regresión de mínimos cuadrados. En este estudio se predijo la variación en el tiempo, de cantidad de sólidos solubles totales, acidez total, relación de sólidos solubles y peso, y la relación acidez total y peso. Estas mediciones fueron transformadas para obtener el análisis de la madurez del fruto.

### 3. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS EN MADERA

Tradicionalmente la calidad de la madera es asociado con la medición de propiedades físicas (longitud, altura, diámetro) y la observación visual de características superficiales (cantidad y distribución de los nodos, hongos y otros defectos), asignado diferentes grados, con rangos amplios para las propiedades físicas. Aunque esta

clasificación es suficiente para los casos en que la apariencia es la primera consideración, son cuestionables en las aplicaciones estructurales en las que la rigidez y la resistencia predominan, ya que no se tiene una medición real de estas propiedades.

En [12] se presenta un sistema para estimar la velocidad de una onda de esfuerzo inducido en un tronco o en árbol en pie, utilizado para maximizar el valor de los productos de madera. Se ubica un acelerómetro contra el tronco a la vez que se produce un golpe con un martillo neumático. Se determina la velocidad de la onda de esfuerzo monitoreando la señal del acelerómetro. Basado en la velocidad, se estima el módulo de elasticidad de la madera. Cuando se observa un valor del módulo de elasticidad alto, se realiza el corte del árbol. Trabajos similares en la determinación de las propiedades mecánicas en árboles mediante el análisis de señales mecánicas se presentan en [13-18]

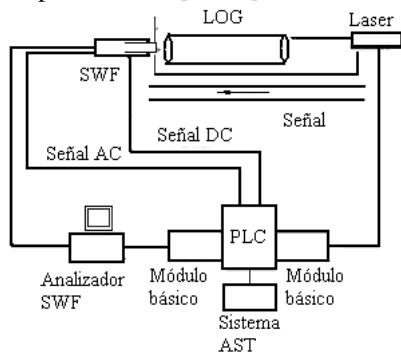


Figura 3. Impacto sobre un madero [12]

Yancey y Taylor [19] proponen un método para medir una o más propiedades de la madera sin contacto con ésta. Consiste en dirigir un chorro de agua o un cubo de hielo hacia el extremo de la madera, de esta forma inducir la generación de una onda. El tiempo de viaje de la onda posiblemente va a ser medido por un acelerómetro u otro transductor adecuado a lo largo de la madera. La otra opción para evitar todo tipo de contacto es utilizar un vibrómetro láser Doppler. La señal de retorno se convierte en el dominio de la frecuencia y la frecuencia de resonancia de la sección se determina.

Huang [20] desarrolló un dispositivo ligero y portátil para hacer mediciones de forma no destructiva y en campo. Su equipo consta de dos probetas conectadas electrónicamente a un circuito. Dichas probetas van incrustadas en el árbol, sobre la primera se produce un impacto, sobre el eje de esta probeta se desplaza la onda pasando así a la corteza y desplazándose a la otra probeta. Dichos elementos tienen sensores que registran la onda en primera y última instancia dando la información del tiempo que toma desplazarse la onda a un pequeño computador que entrega los resultados al instante.

Huang y Chen [21] implementan un método no destructivo utilizando una onda en la madera para calcular la velocidad del sonido y el módulo elástico dinámico basado en la frecuencia fundamental en la probeta de la madera. Una propuesta similar es

presentada en [22] en el que incluye la longitud y densidad de la madera a ensayar. Basado en esta información se determina si se puede realizar el corte del madero.

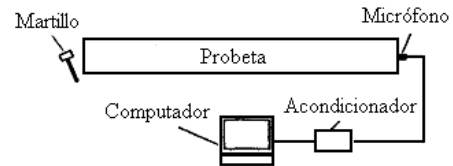


Figura 4 Prueba de impacto [24]

Ziegler y Yancey [23] realizan un ensayo acústico en el que miden la densidad del madero y la velocidad de propagación de la onda para predecir la rigidez a la flexión utilizando la siguiente ecuación

$$Y = k\rho v^2 / g \tag{3}$$

donde  $Y$  es la rigidez a la flexión,  $k$  es la constante de calibración,  $v$  es la velocidad del sonido a través del elemento, y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Wang y otros [24], realizaron ensayos en un tramo, figura 4, para la medición de la velocidad de onda en 180 árboles jóvenes de cicuta y sitka para determinar su rigidez y su resistencia. Los autores afirman que este ensayo en sitio permite obtener información confiable sobre las propiedades del árbol. Trabajos similares en los que se mide la velocidad de la onda se presentan en [25-27]

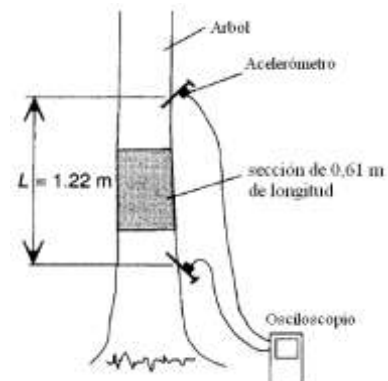


Figura 5. Medición de la velocidad de la onda [24]

Wang y otros [28] establecen una relación lineal entre el tiempo de transmisión de la onda sonora y la rigidez de las maderas, concluyendo que un menor tiempo en la transmisión de la onda indica una mayor rigidez del árbol. Otros trabajos utilizando señales acústicas se presentan en [29-34]

Harris y otros [35] proponen un método para determinar las características de la madera, figura 6, utilizando un parlante que genera una onda de sonido con una frecuencia de excitación variable que va dirigida al espécimen, un primer sensor (acelerómetro) cercano al transductor para sensar la variación en la frecuencia de excitación, un segundo sensor (vibrómetro óptico) que mide la respuesta de la onda acústica impartida en el

espécimen y un procesador de señales que tomando la información suministrada por los sensores determina las características del espécimen de madera.

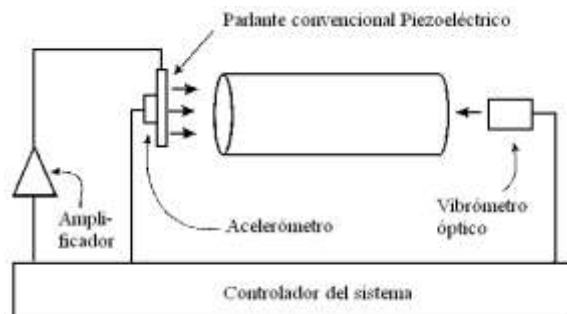


Figura 6. Ensayo para determinar propiedades de la madera [35]

En [36] se presenta un método y un dispositivo para la medición de las propiedades de la madera durante la etapa de corte del árbol, en particular para determinar el diámetro, el área de la superficie de corte y el volumen del árbol que puede ser obtenido durante este procedimiento. Este método es aplicable para la medición simultánea de las propiedades de 2 o más troncos de árboles. El dispositivo posee monitores, sistemas de cálculo, cuchillas de corte, cilindros hidráulicos y sensores que permiten el cálculo de estas propiedades.

Yin y otros [37] evalúan las propiedades mecánicas de *Cunninghamia Lanceolata*, utilizando señales acústicas. Los autores evalúan el módulo elástico a la flexión estática, el módulo de ruptura, la resistencia a la compresión en la plantación con muy buenos resultados. Los autores utilizan un sensor acústico, un micrófono y un acelerómetro como sensor en el ensayo.

Ross y otros [38] emplean un método no destructivo para evaluar la integridad de un elemento maderable, in situ, utilizando la reflexión de la onda acústica. La reflexión es causada por la discontinuidad de las propiedades acústicas entre la madera y el medio que lo soporta. La onda acústica es medida en tiempo y amplitud para proveer indicaciones de la velocidad del sonido y la relación de atenuación.

Beating [39] utiliza vibraciones transversales para la medición del módulo de elasticidad longitudinal en la madera obteniendo un error estimado del 0,4%. Para la estimación del módulo de elasticidad, el autor utilizó las siguientes relaciones:

$$E = 0,9465 \frac{m f_a^2 L^3}{b t^3} T_1 \quad (4)$$

$$E = 4,973 \frac{m f_b^2 L^3}{b t^3} \quad (5)$$

$$E = \frac{m v^2}{b t L} \quad (6)$$

donde:  $f_a$  y  $f_b$  son, respectivamente, la frecuencia fundamental (Hz) medida usando lámina piezoeléctrica, y celda de carga,  $m$  es la masa (kg),  $b$ ,  $t$ , y  $L$  son el ancho, la altura y la longitud en (m), respectivamente,  $T_1$  factor de corrección del ensayo.

He y otros [40] utilizan una señal acústica para detectar grietas en laminados, aglomerados, contrachapados de madera. En la figura 7 se presenta una representación esquemática del ensayo para medición por ultrasonido de un panel con una grieta longitudinal. El generador de la señal de ultrasonido 2, genera la señal transmitida por el transductor 1, la que es adquirida por el receptor 4.

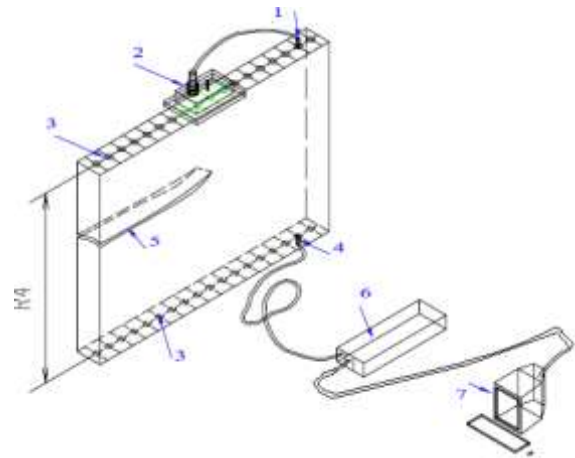


Figura 7. Ensayo acústico en laminados [40]

Huang y Chen [41] utilizan una prueba de impacto en una lámina de madera, utilizando galgas extensiométricas en sus extremos. Mediante un equipo analizador de frecuencias obtuvieron la transformada rápida de Fourier y por ende la frecuencia de resonancia. La medición de la velocidad de la onda se obtuvo de la diferencia de los tiempos de la galga. El módulo de elasticidad de la madera se obtuvo de la velocidad del sonido y la densidad de la madera.

Ross y otros [42] utilizan un ensayo de vibración, induciendo un golpe, para determinar la degradación de la madera en edificaciones históricas. El grado de degradación de la madera es asociado al tiempo requerido por la onda al viajar a través de él. En este trabajo, los autores demuestran una relación lineal entre la rigidez de la madera y su frecuencia natural. Wang y otros [43] utilizan transformada wavelets y redes neuronales en el procesamiento de la señal para identificar el tipo y el tamaño de la falla en la madera. Biernacki y otros [44] implementan un método para predecir la rigidez y la resistencia en maderas a la vez que diagnostica defectos en la madera. Trabajos en el diagnóstico de la calidad de la madera utilizando señales acústicas se presentan en [45-48].

Ross y Pellerin [49], y Brashaw y otros [50] utilizan la velocidad de la onda y el factor de atenuación para estimar propiedades mecánicas a la tensión, flexión y resistencia del pegamento en materiales compuestos basados de madera.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la bibliografía estudiada se observa que es viable la predicción algunas propiedades mecánicas y la determinación de la madurez de frutos y madera de arboles antes de su recolección o corte, utilizando métodos no destructivos.

Existen métodos para medir en el ensayo no destructivo, la frecuencia de resonancia, la velocidad de la onda, la atenuación de la onda. En estos ensayos se utilizaron acelerómetros, parlantes, galgas extensiométricas y sensores acústicos para la captura de la señal.

Adicionalmente se obtuvo buenos resultados en la predicción de grietas y defectos en los frutos y árboles mediante estas técnicas.

Algunas de las propiedades muestran una importante asociación de las mismas con la calidad, especialmente de la madera, la cual coincide con el grado de madurez. Para el caso de la especie de bambú, esta aplicación es muy relevante porque actualmente la definición de madurez se hace con base en criterios que pueden ser subjetivos y, por lo tanto, podrían cosecharle culmos que no cumplan con los requerimientos de calidad exigidos.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. A. Cordourier, J. Pérez, and A. Pérez, "Obtención de la respuesta espectral con excitación impulsiva en frutas como indicador cuantitativo de madurez", presentado en Simposio de Metrología, Querétaro, México, 2006
- [2] M Valente, and J. Y. Ferrandis, "Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method", *Postharvest Biol. and Techn.*, vol. 29(2), pp. 219-228, 2003.
- [3] A. H. Gómez, J Wang, and A. G. Pereira, "Impulse response of pear fruit and its relation to Magness-Taylor firmness during storage", *Postharvest Biol. and Techn.*, vol. 35(2), pp. 209-215, 2005.
- [4] J. R. Cooke, and R. H. Rand, "A mathematical study of resonance in intact fruit and vegetables using a three media elastic sphere model", *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 18, pp. 141-157, 1973.
- [5] M.E Saltveit, J.F. Upadhyaya, R Harpp, and O Brien, "Maturity determination of tomatoes using acoustic Methods", ASAE Paper No 85-3536, Amer. Soc. Agr. Eng., USA, 1985.
- [6] B. Diezma, M. Ruiz, and P. Jancsó, "Vibrational analysis of seedless watermelons: use in the detection of internal hollows", *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 3(1), pp. 52-60, 2005.
- [7] H. Chen, J Baerdemaker, and V Bellon, "Finite element study of the melos for nondestructive sensing of firmness", *Transactions of the ASABE*, vol. 39(3), pp. 1057-1065, 1996.
- [8] P.R: Armstrong, H.R. Zapp, and G.K. Brown, "Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination", *Transactions of the ASABE*, vol. 33(4), pp 1353-1359, 1990.
- [9] P. Wanitchang, A. Terdwongworakul, J. Wanitchang, and N Nakawajana, "Non-destructive maturity classification of mango based on physical, mechanical and optical properties", *J. of Food Engineering*, vol. 105(3), pp. 477-484, 2011.
- [10] M. Musse, F. De Guio, S. Quellec, M. Cambert, S. Challos, and A. Davenel, "Quantification of microporosity in fruit by MRI at various magnetic fields: comparison with X-ray microtomography", *Magnetic Resonance Imaging*, vol. 28(10), pp. 1525-1534, 2010
- [11] J. Wanitchang, A. Terdwongworakul, P. Wanitchang, and S. Noypitak, "Maturity sorting index of dragon fruit: *Hylocereus polyrhizus*", *Journal of Food Engineering*, vol. 100(3), pp. 409-416, 2010
- [12] W.D Snyder, E. Christensen, S. L Floyd, L H Jones, C. K. Kendall, B. B. Pearce, E Shaw, and M. J. Yancey, "Log cutting optimization system", US Patent No 6 026 689, Feb-22, 2000.
- [13] L. Bach, and A. W. Porter, "Transverse vibration apparatus for grading wood panels", US Patent No 4 722 223, Feb-2, 1988
- [14] D. Larsson, S. Ohlsson, and M. Perstorper, "Method and arrangement for non-destructive determination of the properties of an object", US Patent No 6 347 542 B1, Feb-19, 2002
- [15] A. D. Shaw, "Vibration technique for rot detection in Wood poles and trees", US Patent No 3 877 294, Apr-15, 1975.
- [16] U. B. Halabe, G. M. Bidigalu, H. V.S. GangaRao, and R. J. Ross, "Nondestructive evaluation of green wood using stress wave ant transverse vibration techniques", *Materials Evaluation*, vol. 55(9), pp. 1013-1018, 1997.
- [17] J. Ayafkwa, Y. Hirashima, and Y. Sasaki, "Predicting tensile properties of finger-jointed tropical African hardwoods using longitudinal vibration", *Ghana J. Forestry*, vol. 9, pp. 45-56, 2000.
- [18] J.L. Yiang, J. Ilic, and T. Wardlaw, "Relationship between static and dynamic modulus of elasticity for a mixture of clear and decayed eucalypt wood", *Australian Forestry*, vol. 66(3), pp. 193-196, 2003.
- [19] M. J. Yancey, and T.J. Taylor, "Method of determining physical properties of wood", US Patent No 6 739 194 B1, May-25, 2004.
- [20] C.L. Huang, "System and method for measuring stiffness in standing trees", US Patent No 6 871 545 B2, Mar-29, 2005.
- [21] Y.S. Huang, and S.S Chen, "Method for non-destructive stress wave testing of Wood", US Patent No 6 782 732 B2, Ago 31, 2004.
- [22] M.K. Andrews, and C.A. Gerard, "Method of estimating timber stiffness profiles", US Patent No 6 889 551 B2, May-10, 2005.

- [23] G. A. Ziegler, and M. J. Yancey, "Systems and methods for predicting the bending stiffness of wood products", US Patent No 7 066 007 B2, Jun 27, 2006
- [24] X. Wang, R.J. Ross, M.C. McClellan, R.J. Barbour, J.R. Erickson, J. W. Forsman, and G.D. McGinnis, "Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method", *Wood and Fiber Science*, vol. 33(4), pp. 522-533, 2001.
- [25] G. Ziegler, and M. Yancey, "Systems and methods for predicting the bending stiffness of wood products", US Patent No 2005/0086023 A1, Apr-21, 2005.
- [26] M.K. Andrews, and C.A. Gerard, "Method of estimating timber stiffness profiles" US Patent No 2003/0150277 A1, Aug-14, 2003
- [27] C. L. Huang, and S. Floyd, "Methods for determining velocity of a stress wave within a material and homogeneity of properties within the material", US Patent No 7 383 730 B2, Jun-10, 2008
- [28] X. Wang, R. J. Ross, D. W. Green, K. Englund, and M. Wolcott, "Nondestructive evaluation for sorting red maple logs", *Presentado en Hardwood Symposium Proceedings*, May 11-13, Davis, Memphis, USA, pp. 95-101, 2000.
- [29] F. Grundström, "Non-destructive testing of particleboard with ultra sound and eigen frequency methods", Master Thesis, Lulea Tekniska Universitet, 1998.
- [30] C.L. Huang, "System and method for measuring stiffness in standing trees", US Patent No 6 871 545 B2, Mar-29, 2005.
- [31] P. D. Harris, A. J. Stevenson, P. Gamble, R. Peterick, E. Deuss, E. Stytsenko, F. Lecarpentier, and M. Andrews, "Method and apparatus for assessing or predicting the characteristics of wood", US Patent No 2006/0185439, Aug-24, 2006.
- [32] W. Dzbenski, and T. Wiktorski, "Ultrasonic evaluation of mechanical properties of wood in standing trees", *presentado en COST E 53 Conference – Quality Control for Wood and Wood Products*, 2007
- [33] C. Mora, L. Schimleck, F. Isik, J. Mahon, A. Clarl, and R. Daniels, "Relationship between acoustic variables and different measures of stiffness in standing Pinus taeda trees", *Can. J. For. ESR*, vol. 39(8), pp. 1421-1429, 2009
- [34] S. Jean-Luc, and B. Yann, "Timber grading machine using multivariate parameters base on ultrasonic and density measurement", *presentado en COST E 53 Conference – Quality Control for Wood and Wood Products*, 2007
- [35] P. Harris, R. Petherick, and M. Andrews, "Acoustic resonance tools". In: *Proceedings, 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. August 19-21, 2002, University of California Berkeley, California. pp. 195-201, 2003.
- [36] J.P. Usenius, and H. Usenius, "Method and device for measurement of properties of Wood, Patent WO 2009/112627 A1, Mar-12, 2008
- [37] Y. Yi, H. Nagao, X. Liu, and T. Nakai, "Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation Wood with three acoustic-based nondestructive methods". *J Wood Sci*, vol. 56(1), pp. 33-40. 2009
- [38] R.J. Ross, R. C. De Groot, E.A. Geske, W.J. Nelson, and V. C. Malinauskas, D. O. Cuevas, "Method and apparatus for in situ evaluation of wooden members", US Patent No 5 396 799, Mar-14, 1995.
- [39] R.M. Baettig, "Determinación del modulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales", *Maderas, Ciencia y tecnología*, vol. 3(1-2), pp. 44-51, 2001.
- [40] Y. He, D. Manful, A. Bárdossy, G. Dill-Langer, T. Ringger, and S. Aicher, "Fuzzy logic based denoising of ultrasound signals from non-destructive testing". *Otto-Graf-Journal*, vol. 15, pp. 103-120, 2004.
- [41] Y.S. Huang, and S.S. Chen, "Non-destructive stress wave testing method for wood", US Patent No 2003/0094031 A1, may-22, 2003
- [42] R.J. Ross, M. O. Hunt, X. Wang, and L. A. Soltis, "Floor vibration: A possible assessment method for historic buildings", *APT Bulletin*, vol. 32(2-3), pp. 25-25, 2001.
- [43] L. Wang, L. Li, W. Qi, and H. Yang, "Pattern recognition and size determination of internal Wood defects base on wavelet neural networks", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 69(2), pp. 142-148, 2009
- [44] J. M. Biernacki, C. Flatman, R. Lahoda, and S. Woods, "Method of Wood strength and stiffness prediction", US Patent No 7 680 304 B2, Mar-16, 2010
- [45] X. Wang, R.J. Ross, and P. Carter, "Acoustic evaluation of Wood quality in standing trees. Part I. Acoustic wave behavior", *Wood and Fiber Science*, vol. 39(1), pp.28-38, 2007.
- [46] P. Carter, D. Briggs, R. J. Ross, and X. Wang, "Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer Wood quality needs", *En Productivity of Western Forest: A Forest Products Focus*, Reporte técnico, pp. 121-129, 2005
- [47] V. Bucur, "Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees", *Ultrasonics*, vol. 43(4), pp. 237-239, 2005.
- [48] R. M. Turpening, Z. Zhu, J. R. Matarese, and C. E. Lewis, "Acoustic tree and wooden member imaging apparatus", US Patent No 6 347 551 B1, Feb-19, 2002
- [49] R.J. Ross, and R.F. Pellerin, "NDE of Wood-based composites with longitudinal stress waves", *Forest Product Journal*, vol. 38(5), pp. 39-45, 1988.
- [50] B.K. Brashaw, X. Wang, R.J. Ross, and R. F. Pellerin, "Relationship between stress wave velocities of green and dry veneer", *Forest Products J.*, vol. 54(6), pp. 85-89, 2009.