

MÓDULO DE ELASTICIDAD DE *CEDRELINGA CATENIFORMIS* D. DE PLANTACIONES EMPLEANDO TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

MODULUS OF ELASTICITY OF *CEDRELINGA CATENIFORMIS* D. FROM PLANTATIONS USING NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES

HAYDEE MIRIAM RAMOS LEÓN¹ y JOSÉ ELOY CUELLAR BAUTISTA

(1) mramos@inia.gov.pe. Instituto Nacional de Innovación Agraria, Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario/Programa de Innovación de estudios e Investigación para el desarrollo Forestal y Cambio Climático/Av. La Molina 1981, La Molina Lima, Perú/Perú <http://www.inia.gov.pe>

(2) jcuellar@inia.gov.pe. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias Forestales, Av. La Molina S/N, La Molina/ Lima, Perú/Perú <http://www.lamolina.edu.pe>

Recibido Diciembre 2017. Aceptado Junio 2018

Resumen

El presente estudio se desarrolló con propósito de tratar de cerrar la brecha o vacío en la información que permita al sector forestal, una promoción adecuada de las plantaciones forestales, esto, referido al comportamiento de las propiedades tecnológicas de maderas en base a pruebas no destructivas que son rápidas y económicas, faltando comprobar en sí la correlación con métodos destructivos. La evaluación no destructiva puede usarse para detectar, localizar y medir defectos, así como determinar algunas propiedades, como el Módulo de Elasticidad (MOE) de la madera, que es una de las propiedades mecánicas más importantes para muchos usos finales de la madera en construcción, muros estructurales, vigas, pilares, escaleras, entre otros. En cuanto a la metodología empleada, la plantación seleccionada para el estudio está situada dentro del Área Piloto de la Estación Experimental Alexander Von Humboldt del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) ubicada en el distrito de Irazola, provincia de Padre Abad y región Ucayali a 225 msnm. Se trata de una plantación de la especie Tornillo *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Ducke) de 17 años de edad, de la cual se seleccionaron 2 árboles y se elaboraron probetas de flexión estática (elaboradas según lo establecido en las Normas Técnicas Peruanas) para su evaluación no destructiva y destructiva con el fin de comparar ambos métodos, también se determinó la densidad básica para evaluar con que método tiene mayor coeficiente de correlación. En cuanto a equipos para la evaluación no destructiva se usaron los equipos de Microsecond Timer y Ultrasonic Timer, que básicamente trabajan bajo el principio de propagación de una onda de ultrasonido que se transmite de un sensor a otro en un material siendo este caso la madera.

Los resultados, se compararon con los obtenidos por el método convencional o destructivo usando la Prensa mecánica Tinius Olsen. El MOE obtenido con Microsecond es de 100350,20 kg/cm², con el Ultrasonic es de 107488,37 kg/cm² y con el método destructivo es de 82417,60 kg/cm², este último valor es similar al de la bibliografía de 74360 kg/cm² para Tornillo de 15 años. En el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas entre los métodos empleados por lo que se realizó una prueba de Tukey que muestra diferencias entre

los métodos destructivos y no destructivos. En el análisis de correlación entre el MOE destructivo y los obtenidos con los equipos no destructivos se obtuvieron coeficientes aceptables, siendo mayor el que se obtiene con el Microsecond Timer ($R^2=0,75$), por lo que se recomienda el uso de este equipo. Con respecto al análisis de correlación entre el MOE obtenido por los distintos métodos y la densidad, se encontró que el mejor coeficiente de correlación se da con el MOE obtenido con el Microsecond Timer, concluyendo que este equipo es que presenta mejores correlaciones.

Palabras claves: Plantaciones forestales, técnicas no destructivas, propiedades mecánicas, módulo de elasticidad, *Cedrelinga cateniformis*

Abstract

The present study was developed with the purpose of trying to close the gap or gap in the information that allows the forest sector, an adequate promotion of forest plantations, this, referred to the behavior of the technological properties of wood based on non-destructive tests that They are fast and economical, missing the correlation with destructive methods. Nondestructive evaluation can be used to detect, locate and measure defects, as well as to determine some properties, such as the Modulus of elasticity (MOE) of wood, which is one of the most important mechanical properties for many end uses of wood in construction, structural walls, beams, pillars, and stairs, among others. Regarding the methodology used, the plantation selected for the study is located within the Pilot Area of Alexander Von Humboldt Experimental Station of the National Institute of Agrarian Innovation (INIA) located in the district of Irazola, province of Padre Abad and Ucayali region. 225 meters above sea level It is a plantation of the species Tornillo *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Ducke) of 17 years of age, from which 2 trees were selected and static bending specimens were prepared (elaborated according to the established in the Peruvian Technical Norms) for its evaluation not destructive and destructive in order to compare both methods, the basic density was also determined to evaluate which method has a higher correlation coefficient. Regarding equipment for the non-destructive evaluation, the equipment of Microsecond Timer and Ultrasonic Timer was used, which basically work under the principle of propagation of an ultrasound wave that is transmitted from one sensor to another in a material, being this case the wood.

Results were compared with those obtained by the conventional or destructive method using the Tinius Olsen mechanical press. The MOE obtained with Microsecond is 100350.20 kg/cm², with the Ultrasonic it is 107488.37 kg/cm² and with the destructive method it is 82417.60 kg/cm², this last value is similar to that of the bibliography of 74360 kg/cm² for Screw of 15 years. In the analysis of variance, significant differences were found between the methods used, so a Tukey test was performed, showing differences between destructive and non-destructive methods. In the correlation analysis between the destructive MOE and those obtained with the non-destructive equipment, acceptable coefficients were obtained, being higher the one obtained with the Microsecond Timer ($R^2 = 0,75$), so the use of this equipment is recommended. With respect to the correlation analysis between the MOE obtained by the different methods and the density, it was found that the best correlation coefficient is found with the MOE obtained with the Microsecond Timer, concluding that this equipment has the best correlations.

Keywords: mechanical properties, MOE, non destructive testing, *Cedrelinga cateniformis*

1. Introducción

Las plantaciones forestales para abastecer de madera al mercado de los productos forestales, han tenido que mejorar su tecnología para producir materia prima de alta calidad en el menor tiempo posible; con este afán, se tiende a dejar de lado la calidad para entregar cantidad. Adicionalmente, el manejo de altos volúmenes de maderas para evaluar su calidad exige hacer uso de nuevas técnicas de caracterización que deben realizarse en forma rápida, *in situ* y evitando pruebas destructivas que implican elevados gastos en transporte, elaboración de probetas especiales y tiempos de realización que elevan los costos de los ensayos destructivos.

En la actualidad se vienen empleando técnicas y evaluaciones de la madera no destructivas (NDT – Nondestructive testing; NDE – Nondestructive evaluation), que se basan en la medición de la velocidad de ondas que viajan dentro del material en estudio. Estas pruebas pueden ser utilizadas para determinar propiedades de los materiales, determinar su composición para conocer su adecuado comportamiento de uso y para detectar, localizar y medir defectos en la madera. Es una técnica que permite inferir la presencia de defectos (nudos, fendas, desviaciones de fibra y otros) que afectan los valores de resistencia y elasticidad del material (Acuña *et al.*, s.f.).

La especie forestal *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke, tornillo, es una especie maderable promisoría en Perú; es de excelente calidad y gran durabilidad, semidura y semipesada, con grano recto a entrecruzado. Es muy trabajable, con un amplio mercado en el Perú para la construcción, carpintería y ebanistería (Reynel, Pennington, Pennington y Daza, 2.003).

El módulo de elasticidad (MOE) es una de las propiedades mecánicas más importantes para la determinación del uso potencial de la madera. Conocer en forma anticipada este valor permite visualizar características mecánicas de la madera. En el presente estudio, se realizan pruebas con equipos que permiten medir la velocidad e intensidad de las ondas de ultrasonido que se transmiten de un sensor a otro en un material, en este caso la madera, que no requiere mayor preparación. Para estas pruebas no destructivas se utilizan equipos comerciales, tal como el Microsecond y el Ultrasonic Timer. Adicionalmente se realizan en paralelo ensayos tradicionales, de carácter destructivo, para validar los valores que proporcionan los equipos y la relación que se sabe existe con la densidad de la madera.

2. Revisión de literatura

El tornillo, *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke, es una especie maderable promisoría en Perú. La especie se distribuye en la región amazónica en altitudes de hasta 1.200 msnm (Reynel *et al.*, 2003). Se encuentra en zonas de terraza alta, en suelos fuertemente ácidos (Freitas, Linares y Baluarte, 2.000). La madera es de excelente calidad y gran durabilidad, semidura y semipesada, con grano recto a entrecruzado,

muy trabajable, con una densidad básica de $0,45 \text{ g/cm}^3$ (Acevedo y Kikata, 1.994) y Módulo de Elasticidad en flexión de 74.360 kg/cm^2 para madera de 15 de años (Condori, 2.007). Es la especie forestal con mayor producción de madera aserrada en el país (Cuellar, 2.013; SERFOR, 2.016), con un amplio mercado en el Perú para construcción, carpintería y ebanistería (Reynel *et al.*, 2.003).

Las propiedades mecánicas de la madera se definen como la expresión de su comportamiento bajo la aplicación de fuerzas o cargas, que va a depender del tipo de fuerza aplicada y de las diferencias básicas en la organización estructural de la madera (Arroyo, 1.983). Una de las propiedades más importantes en la madera, es la flexión estática, que es la resistencia que ofrece la madera a una carga que actúa sobre una viga y resume el Módulo de Elasticidad (MOE) como un índice de la facilidad o dificultad que tienen las maderas para su deformación, cuanto mayor es el valor del MOE es menor su deformación (Aróstegui, 1.982). Es una de las propiedades más importantes para definir muchos usos finales de la madera particularmente en construcción, muros estructurales, vigas, pilares, escaleras (Rocha, 2.012).

Los métodos de evaluación no destructiva son usadas para determinar las propiedades físicas y mecánicas de materiales sin alterar su capacidad de tener un uso final (Ross, citado por Sucksmith, 2009). Estas técnicas han sido utilizadas en la industria forestal aplicadas en el control, evaluación de calidad y propiedades de la madera. Existe diversidad de técnicas, dentro de las que se puede mencionar la transmisión de ondas (Toro y Velásquez, 2005). Wang et al, citado por Sucksmith (2009) explica que la propagación de ondas es un proceso dinámico relacionado con las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Diferentes tipos de ondas pueden propagarse, siendo las longitudinales las más veloces y son usadas comúnmente para la evaluación de las propiedades de la madera. Toro y Velásquez (2005) señalan que a pesar de que casi todas las investigaciones se han realizado a escala de laboratorio, los resultados preliminares indican que la evaluación empleando el método de propagación del ultrasonido, muestra un elevado potencial en la detección y discriminación de diversos tipos de defectos presentes en la madera.

Sucksmith (2009), realizó evaluaciones con métodos no destructivos de propagación longitudinal de ondas de 23 KHz (Microsecond Timer) y 45 KHz (Ultrasonic Timer) en la especie Tornillo *Cedrelinga cateniformis* con el objetivo de evaluar la eficacia de éstas técnicas, en el cual demostró que los métodos no destructivos son válidos y eficientes para estimar tanto los MOEs longitudinales como transversales, obteniendo coeficientes de correlación muy aceptables. Además encontró que el método de propagación Longitudinal de una onda de 23KHz (Microsecond Timer) permite obtener los valores más cercanos a los valores de Compresión Paralela y Flexión Estática.

Carnero (2007), en su estudio con especies forestales de diferentes densidades utilizando técnicas no destructivas para la determinación del MOE, obtuvo que éstos

métodos utilizados y comparados con el método de flexión estática (método destructivo) presentaron coeficientes de correlación altos y positivos, sin embargo no son estadística ni teóricamente iguales, siendo considerados métodos prácticos y confiables para predecir el comportamiento del MOE.

De la Mata (2011) en su evaluación con pino silvestre usando métodos para evaluar el nivel de precisión de las técnicas no destructivas como predictores del comportamiento de la madera, encontró que la relación lineal entre el MOE estático y MOE dinámico estimado a través del Microsecond Timer es fuerte, con un R^2 de 0,67, considerando estos métodos como una buena alternativa de medición. Con respecto a la influencia del contenido de humedad en las evaluaciones, el autor señala que la velocidad de propagación de la onda o velocidad de vibración es mayor a medida que el contenido de humedad de la madera disminuye.

Balmori, Acuña y Basterra (2016) en su estudio de la influencia de la dirección de fibras en la velocidad de propagación de ultrasonidos para las especies de *Pinus sylvestris* y *Pinus radiata* cuyo objetivo fue determinar la influencia del ángulo de las fibras en la velocidad de propagación del sonido, encontró que los ángulos que arrojan mediciones más precisas y fiables, son los comprendidos entre 45° y 75° , además no encontró diferencias significativas entre las especies, por lo que se pueden trabajar todos los datos en conjunto.

3. Materiales y métodos

Ubicación de la plantación

Está situada dentro del Área Piloto de la Estación Experimental Alexander Von Humboldt del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), distrito de Irazola, provincia de Padre Abad y región Ucayali a 225 msnm. Las coordenadas geográficas del primer punto de la plantación son 493979 N y 9023725 E.

Equipos y materiales utilizados

Microsecond Timer, Ultrasonic Timer, Prensa Universal de Ensayos, Balanza de precisión, Vernier digital, Detector de humedad y Wincha.

Fase campo

Incluye la evaluación in situ, selección, aprovechamiento y elaboración de probetas de los árboles muestra, de acuerdo a las Normas Técnicas Peruanas.

Fase gabinete

Se realiza la evaluación no destructiva y destructiva, análisis de datos y estadística

de los resultados.

Evaluación no destructiva

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio Multipropósito del Centro Experimental La Molina en Lima.

Evaluación con Microsecond Timer

Se marca en la sección transversal un aspa, en donde se colocan los sensores, (Figura 1) luego se conectan al temporizador y se enciende. Se golpea con un martillo (Figura 2) en el sensor de inicio y se registra el dato del tiempo en microsegundos, se realizan tres repeticiones por cada ubicación de los sensores.



Fig. 1. Equipo Microsecond Timer y Sensores del equipo

Evaluación con Ultrasonic Timer: Se diferencian las caras radiales y tangenciales en cada probeta, luego se colocan los sensores en ángulo de 45° a una distancia determinada. Los sensores se conectan al temporizador y automáticamente el equipo proporciona el tiempo en microsegundos.



Fig. 2. Evaluación con ULTRASONIC TIMER. A. ubicación de sensores. B. Toma de datos de tiempo

Evaluación destructiva: Se realizan los ensayos en flexión estática según lo estipulado en la Norma Técnica Peruana 251.017 en el laboratorio de Tecnología de la Madera de la Universidad Nacional Agraria La Molina, utilizando la prensa mecánica universal Tinius Olsen.

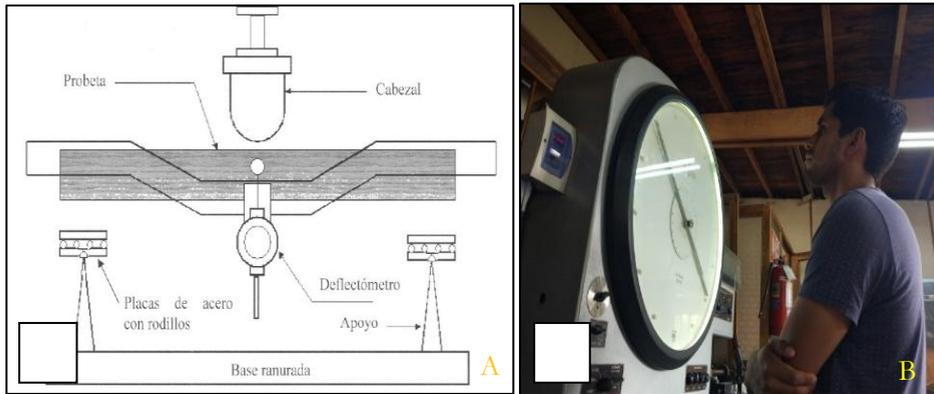


Fig. 3. Ensayo de flexión estática. A. Accesorios para la probeta y la prensa. B. Reloj de carga en libras

4. Resultados y discusión

4.1. Módulo de Elasticidad (MOE)

En el Cuadro 1 se puede observar que los mayores valores de MOE se obtienen con métodos no destructivos, esto puede deberse a que la prueba destructiva está sujeta a mayores fuentes de error, como son, las lecturas de las deformaciones y cargas estáticas, la determinación del punto de inflexión de la curva carga – deformación, etc.

Cuadro 1. Estadísticos básicos

Equipo	n	Medias	D.E.	E.E.	C.V.	Mín	Máx
Ultrasonic	30	100350,20	16283,87	2973,01	16,23	67878	129560
Microsecond	30	107488,37	12320,74	2249,45	11,46	85582	131759
Pruebas destructivas	30	82417,60	11039,02	2015,44	13,39	60723	105215

4.2. Con respecto a la comparación entre los distintos métodos

Los resultados obtenidos en el ANVA se observan en el Cuadro 2 con un nivel de confianza de 95% se demuestran diferencias significativas entre los métodos destructivos y los no destructivos.

Cuadro 2. Análisis de varianza

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	Sig.
Equipo	10010749074	2	5005374537	27,87	<0,0001	*
Error	15625928339	87	179608372			
Total	25636677413	89				

Se realizó la prueba de Tukey (Cuadro 3) y se encontró que los resultados obtenidos con métodos no destructivos son semejantes entre sí, esto puede deberse a trabajar bajo el mismo principio de propagación de ondas, diferenciándose por la frecuencia de estas mientras que las pruebas destructivas están sujetas a los errores del operador.

Cuadro 3. Prueba de Tukey

Equipo	Medias	E.E.	Tukey
Pruebas destructivas	82417,60	2446,82	A
Ultrasonic	100350,20	2446,82	
Microsecond	107488,37	2446,82	

4.3. Análisis de correlación

En el Cuadro 4 se pueden observar los coeficientes de correlación, encontrando el mayor valor entre el MOE obtenido con Microsecond y la prensa mecánica, seguido por el Ultrasonic y la prensa mecánica (Figuras 4). También se determinó la correlación entre la densidad y el MOE obtenido por equipo no destructivo y prensa mecánica, se encontró el mejor valor entre la densidad y el Microsecond.

Cuadro 4. Análisis de correlación

Variable 1	Variable 2	n	Pearson	p-valor
MOE Microsecond	MOE Destructivo	30	0,87	0,0000
Densidad	MOE Destructivo	30	0,57	0,0011
Densidad	MOE Microsecond	30	0,65	0,0001
MOE Ultrasonic	MOE Destructivo	30	0,72	0,0000
MOE Ultrasonic	MOE Microsecond	30	0,68	0,0000
MOE Ultrasonic	Densidad	30	0,35	0,0562

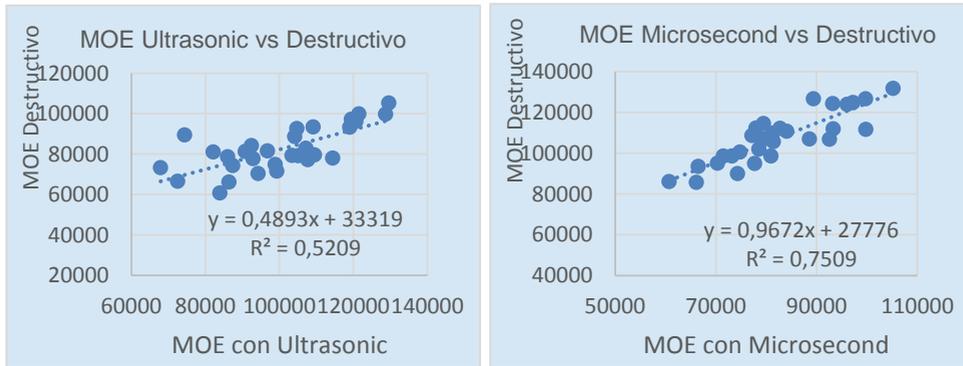


Fig. 4. Regresión Ultrasonic – Destructivo y Regresión Microsecond – Destructivo

4. Conclusiones

El mayor valor de MOE se obtuvo con el Microsecond y el menor fue el obtenido de manera convencional con la prensa mecánica.

Existen diferencias significativas entre los métodos no destructivos y destructivos para flexión estática.

En función a los resultados de la prueba de Tukey no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos con Microsecond y Ultrasonic Timer.

Los equipos de Microsecond Timer y Ultrasonic Timer se correlacionan linealmente con el MOE de Flexión Estática con coeficientes aceptables.

La densidad presenta mejor coeficiente de correlación con el valor de MOE obtenido con el Microsecond Timer.

5. Referencias bibliográficas

- ACEVEDO, M. y KIKATA, N. 1994. Atlas de maderas del Perú. Lima: Publifor.
- ACUÑA, L.; DÍEZ, R; CASADO, M.; LLORENTE, A.; LÁZARO, T.; MARTÍN, L.; BASTERA, A.; RELEA, E. y CUETO, G. (S.F). La Transmisión de Ultrasonidos aplicada a la madera Estructural. 11° Congreso Español de END. Gijón, España.
- ARÓSTEGUI, A. 1982. Recopilación y Análisis de Estudios tecnológicos de Maderas Peruanas. Lima.
- ARROYO, J. 1983. Propiedades físico mecánicas de la madera. Universidad de los Andes, FCF. Mérida.
- BALMORI, J.; ACUÑA, L. y BASTERRA, L. 2016. Estudio de la influencia de la dirección de la fibra en la velocidad de propagación de ultrasonidos (Fakopp) en madera estructural de “*Pinus sylvestris*” y “*Pinus radiata* D. Don”. Euro American Congress REHABEND. Burgos, España.

- CARNERO, P. 2007. Determinación preliminar del Módulo de elasticidad mediante el empleo de técnicas no destructivas para maderas tropicales peruanas (Trabajo de fin de grado no publicado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- COMISIÓN DE REGLAMENTOS TÉCNICOS Y COMERCIALES – INDECOPI. 2004. MADERA. Método de Ensayo de Flexión Estática. NTP 251.017. Lima, Perú.
- CONDORI, C. 2000). Propiedades mecánicas de *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Tornillo) proveniente de dos tipos de plantaciones y diferentes edades del Centro de Investigación Jenaro Herrera – Loreto (Trabajo de fin de grado no publicado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- CUELLAR, J. 2013. Demanda de maderas provenientes de bosques y plantaciones forestales de la amazonia peruana; evaluación a nivel del corredor centro. Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA: Lima.
- DE LA MATA, J. 2011. Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas (Proyecto de fin de carrera). Escuela Técnica de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- FREITAS, L.; OTAROLA, E.; LINARES, C. y BALUARTE, J. 2000. Crecimiento y productividad de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) en base a clases de sitio y clases de productividad en plantaciones Forestales de Jenaro Herrera, Loreto. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP): Perú.
- REYNEL, C.; PENNINGTON, R.; PENNINGTON, T.; FLORES, C. y DAZA, A. 2003. Árboles útiles de la Amazonía peruana. ICRAF: Lima.
- ROCHA, M. 2012. Variabilidad del módulo de elasticidad de la madera de Pino radiata determinado acústicamente y su relación con características de crecimiento y forma. (Trabajo de fin de grado no publicado). Universidad Austral de Chile. Valdivia.
- SERVICIO NACIONAL FORESTAL Y DE FAUNA SILVESTRE – SERFOR. 2016. Anuario Forestal 2015. Lima, Perú.
- SUCKSMITH, K. 2009. Evaluación del módulo de elasticidad por métodos no destructivos en la madera de *Cedrelinga cateniformis* Ducke proveniente de plantaciones del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt (Trabajo de fin de grado no publicado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- TORO, M. y VELÁSQUEZ, J. 2005. Aplicaciones del ultrasonido en la evaluación no destructiva de la madera. Revista arbitrada interdisciplinaria, 273 – 282 p.