

ELABORACIÓN DE UN ADITAMENTO, EN 3D PARA PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS A COMPRESIÓN ESTÁTICA PARALELA A LAS FIBRAS SOBRE NÚCLEOS DE MADERA (TARUGOS) EN EL EQUIPO VERNIER STRUCTURES & MATERIALS TESTER (VSTM)

Andrés Felipe Acero Quitiaquez ⁽¹⁾ Julio Cesar Bermúdez Escovar ⁽²⁾, Jhoanna Magaly García Andrade ⁽³⁾, Carol Liliana Fajardo García ⁽⁴⁾, Sandra Liliana Castellanos Franco ⁽⁵⁾

1. Ingeniero Forestal, Facultad de Ingeniería Forestal-Universidad del Tolima. Investigador. Grupo de Investigación Gestión Ambiental (GIGA-UT), Ibagué, Colombia. afaceroq@ut.edu.co
2. Ingeniero Forestal, Facultad de Ingeniería Forestal-Universidad del Tolima. Profesor de Carrera. Grupo de Investigación en Gestión Ambiental (GIGA-UT), Ibagué, Colombia. jbermudez@ut.edu.co
3. Ingeniera Forestal, Facultad de Ingeniería Forestal-Universidad del Tolima. Profesora de Carrera. Grupo de Investigación en Gestión Ambiental (GIGA-UT), Ibagué, Colombia. jmgarciaa@ut.edu.co
4. Administradora de Empresas, Facultad de Ingeniería Forestal-Universidad del Tolima. Profesional de apoyo en Laboratorio. Grupo de Investigación en Gestión Ambiental (GIGA-UT), Ibagué, Colombia. cfajardo@ut.edu.co
5. Ingeniera Electrónica, Tecnoparque Tolima, Experto Línea de Tecnologías Virtuales. Grupo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Centro Agropecuario La Granja (SENAGROTIC), Espinal, Colombia scastellanosf@sena.edu.co

RESUMEN

Ciertas condiciones de estrés suelen debilitar a los árboles en zonas urbanas. También se ven afectados por heridas que se producen debido al daño físico. La evaluación del riesgo de los árboles es una técnica que requiere de métodos efectivos para identificar, prevenir y mitigar a tiempo los peligros detectados. Se muestrearon diez árboles en pie, con la ayuda del barrenador (Pressler) para la extracción de núcleos de incremento. La compresión estática paralela a la fibra se calculó de forma no destructiva. Se desarrolló un método de evaluación utilizando un aditamento adaptable al VERNIER STRUCTURES & MATERIALS TESTER (VSMT), diseñado con el software AutoCAD 2022 y construido mediante fabricación aditiva (FA). Se obtuvieron resultados aceptables en núcleos de incremento de 11 mm de longitud y 5,15 mm de diámetro, lo que permitió medir la resistencia de las muestras.

Palabras Claves:

Núcleo de incremento, Métodos no destructivos, Compresión paralela a la fibra, Máxima resistencia, Diseño e Impresión 3D.

ABSTRACT

Certain stress conditions often weaken trees in urban areas. They are also affected by wounds that occur due to physical damage. Tree risk assessment is a technique that requires effective methods to identify, prevent, and mitigate the detected hazards on time. Ten standing trees were sampled, with the help of the borer (Pressler) for extraction of increment cores. The static compression parallel to the grain was calculated non-destructively. An evaluation method was developed using an attachment adaptable to the VERNIER STRUCTURES & MATERIALS TESTER (VSMT), designed with AutoCAD 2022 software and built implementing additive manufacturing techniques. Acceptable results were obtained in increment cores of 11 mm in length and 5.15 mm in diameter, which allowed the resistance of the samples to be measured.

Keywords:

Incremental core, Non-destructive methods, Compression parallel to the fibers, Maximum strength, 3D Design and Printing.

INTRODUCCIÓN

La evaluación del riesgo en árboles constituye una labor técnica que requiere el uso de métodos efectivos que ayuden a la identificación oportuna de peligros, tales como defectos estructurales y potencial de falla, esto con el fin de prevenir y mitigar los mismos (Matheny *et al.*, 1999). El requerimiento de inspecciones a detalle, ha implementado el uso de herramientas de diagnóstico especializadas para detectar problemas en las raíces o defectos internos en el árbol que no son perceptibles a simple vista (Pokony *et al.*, 2003).

Los métodos no destructivos permiten identificar la afectación que presenta el árbol sin necesidad de dañarlos (Wang *et al.*, 2004). La capacidad que tiene el barrenado de Pressler para obtener una muestra representativa de madera no compromete significativamente la estructura del árbol. Este método se determina como ensayo no destructivo (END) el cual es fundamental para recopilar información sobre las propiedades físicas y mecánicas en la madera (Beram 2023). Así mismo, la determinación convencional de las características de resistencia de la madera se realiza en máquinas de ensayos universal, lo que implica el corte del árbol y la fabricación de muestras de tamaño variable (Götz *et al.*, 2002). Mientras que, el equipo Fractometro II tiene como ventaja realizar mediciones en campo para la determinación de la resistencia a la compresión paralela a las fibras, relacionando las pruebas estáticas y las realizadas con el Fractometro II (Matsumoto *et al.* 2008). Por su parte el Vernier Structure & Material Tester (VSMT) es un dispositivo que permite evaluar la calidad del material y las propiedades mecánicas de la madera. Por lo que permite medir la resistencia a compresión y flexión entre otras propiedades mecánicas de estructuras en madera a prototipo (Vernier Science Educación, 2023). El objetivo de este estudio consistió en diseñar y desarrollar un aditamento 3D integrando rasgos del Fractometro II para adaptarlo al VSMT, lo que permitió realizar pruebas mecánicas estáticas no destructivas como la compresión paralela a las fibras en núcleos de incremento con diámetro de 5.15 mm, extraídos en dirección radial de la madera más cercana a la médula hasta la madera más cercana a la corteza, para determinar la variación de la resistencia a la compresión en dirección médula a corteza.

El aditamento fue diseñado a partir de modelado 3D en el software AutoCAD 2022 y su fabricación se llevó a cabo usando técnicas de Modelado por Deposición Fundida (FDM), más conocida como impresión 3D.

Lo anterior contribuirá a la evaluación estructural del arbolado urbano en la ciudad de Ibagué, en el marco del proyecto “Análisis del Riesgo de Árboles Urbanos y sus Servicios Ecosistémicos en la ciudad de Ibagué, Tolima”, del grupo de investigación GIGA-UT, con el respaldo del Laboratorio de Tecnología de la madera (LTM) de la Facultad de Ingeniería Forestal (FIF) de la Universidad del Tolima (UT), con el fin de establecer una base sólida para la interpretación, determinación y diagnóstico de la resistencia de la madera y los daños internos de árboles en pie. Muestreando 10 individuos pertenecientes a dos de las especies más abundantes y de mayor número de individuos categorizados en riesgo según el último inventario del arbolado urbano de la ciudad de Ibagué. Las especies objeto de estudio fueron *Anacardium excelsum* (Bertero & Balb.) Skeels y *Samanea saman* (Jacq.) Merr.

ESTADO DEL ARTE

En tiempos pasados, los árboles en áreas urbanas eran valorados por su atractivo estético y decorativo. En la actualidad, se ha reconocido que los árboles y espacios verdes urbanos tienen múltiples beneficios ambientales que van más allá de lo estético (Alvarado *et al.*, 2014). Incluyendo la mejora del ambiente urbano mediante la regulación del microclima, la retención de partículas contaminantes, la reducción de ruido y de la velocidad de los vientos (Dowhal, 2016).

En comparación con los árboles que se encuentran en los bosques, los árboles en la ciudad proporcionan servicios sociales y ambientales importantes (González de Canales, 2002). Es esencial que se preste atención al tamaño, distribución y estado del bosque urbano, ya que esto tiene impacto significativo en la calidad de las personas que habitan en las ciudades (Moreno & Hoyos, 2015). La valoración adecuada del riesgo para mantener y conservar el arbolado urbano, evita la pérdida de cobertura vegetal y aumento de los costos de mantenimiento (Díaz & Ruiz, 2019).

En las últimas tres décadas, se han implementado diversos ensayos no destructivos (END) por parte de los investigadores y la industria en productos forestales, en aplicaciones que abarcan desde la clasificación de la madera estructural hasta la evaluación in situ de las propiedades mecánicas de los árboles en pie (Ross, 1992). Denominándose ensayos no destructivos al tipo de técnica o prueba practicada a un material, y que permita proporcionar información precisa, sin alterar las capacidades de uso final. De tal forma que no se modifiquen sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales (Marín, 2013).

El barrenado de presler de 5 mm. de diámetro es el instrumento adecuado para obtener muestras en forma de cilindros (Imaña & Encinas, 2008). Dichos cilindros son denominados núcleos de incremento, este tejido o muestra nos permite determinar las edades, tasas de crecimiento y la evaluación de las propiedades de la madera de árboles en pie (Maeglin, 1979).

El Vernier Structure & Material Tester (VSTM) es una herramienta que permite enseñar conceptos básicos de ingeniería y procesos de diseño, evaluando la resistencia de materiales, puentes u otras estructuras midiendo la carga aplicada y la deflexión, graficando los datos en tiempo real (Scientific Pty, 2023). El VSTM está equipado con una celda de carga (que mide hasta los 1000 J) y un sensor de desplazamiento (resolución de 0,1 mm)

Figura 1.

En la actualidad, se han registrado estudios que emplean este equipo como una herramienta para determinar la resistencia de distintos materiales. Entre ellos, destaca la investigación reportada por Clarkson *et al.*, (2016). Quienes realizaron un experimento para determinar la fuerza de fractura promedio medida para una tiza, utilizando el VSMT en condiciones de una carga centrada en 3 puntos.

Figura 1. Vernier Structures & Material Tester.



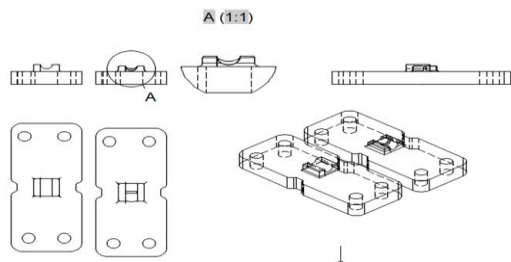
La Fabricación Aditiva (FA) es una herramienta de la Industria 4.0 que se define como el proceso de ensamble de materiales para crear objetos desde un modelo físico generado mediante un software de diseño asistido por computador en 3 dimensiones (3D CAD). (Díaz, 2018). De acuerdo con Zahera (2012) La FA es una de las técnicas más usadas en la actualidad para la fabricación de piezas con cierto tipo de complejidad geométrica o que requieren personalización en el proceso de diseño y desarrollo.

Dentro de las técnicas de FA, la Impresión 3D es la más popular en la actualidad, gracias a la versatilidad de aplicaciones, bajo costo de implementación y facilidad de uso. Existen diversos estudios que relacionan la Impresión 3D con la fabricación de elementos en diversos campos de aplicación. Banfield *et al.* (2016) emplearon diferentes técnicas de fabricación para evaluar la impresión 3D como una alternativa en la elaboración de alas para los vehículos aéreos no tripulados (VANT). Por su parte, en el campo de la medicina, se ha evolucionado hacia la bioimpresión con el objetivo de fabricar órganos o tejidos personalizados. (Cesar-Juarez, et.al., 2018). Desde otra perspectiva, Roselló (2022) presentó un completo estudio sobre las aplicaciones de la Impresión 3D en el ámbito de la construcción, anotando que entre los principales aportes se encuentran la automatización y optimización de procesos.

RESULTADOS

Se diseñó y elaboró un aditamento en impresora 3D para la realización de pruebas en núcleos de incremento con un diámetro de 5,15 mm. El dispositivo consta de dos placas: superior e inferior véase en *Figura 2*.

Figura 2. Diseño de aditamento para compresión paralela a las fibras



En el centro de cada placa se estableció la “muesca” punto de presión encargada de aplastar el núcleo de incremento. La idea base de diseño consistió en optimizar un aditamento adaptable al VSMT y evaluar el comportamiento de los núcleos, a través de ensayos de compresión paralela a las fibras.

Mediante el software de diseño digital AutoCAD 2022 y a partir del modelamiento en 3D se llevó a cabo la simulación del accesorio. Una vez terminado el diseño, se replicó en varios materiales con el fin de encontrar el de mejor estabilidad y de mejorar la respuesta del material a los esfuerzos sometidos por el VSMT, llegando a la selección de PLA para la impresión en 3D véase **Figura 3**, como insumo base para la creación del aditamento.

Figura 3. Aditamento para ensayos a compresión paralela de las fibras



Se ejecutaron pruebas preliminares en muestras de madera de las especies de *A. excelsum* y *S. saman*, con el fin de verificar la viabilidad del aditamento y hacer mejoras al mismo. Como resultado el diseño mejorado otorgó resultados que permitieron determinar la compresión paralela a las fibras, implementando ensayos mecánicos no destructivos.

Los resultados evidenciaron que la especie *A. excelsum* muestra un aumento en su resistencia a la compresión paralela de las fibras en la madera cercana a la médula hasta la sección intermedia, siendo esta sección la de mayor resistencia, y a

medida que se aproxima a la madera más cercana a la corteza su resistencia disminuye. Véase en **Tabla 1**.

Tabla 1. Máxima resistencia de la especie *A. excelsum*

PROPIEDAD	UNIDADES	n	MÁX R				CV%
			MÍNIMO	MEDIA	MÁXIMO	DE	
Corteza	kg cm ⁻²	9	147,25	188,57	219,59	22,08	11,71
Intermedio	kg cm ⁻²		154,66	212,96	302,00	38,86	18,25
Médula	kg cm ⁻²		164,69	209,59	308,00	40,12	19,14

MÁX R: máxima resistencia a la compresión, DE: desviación estándar, CV: coeficiente de variación.

En la **Tabla 1**, se revela el valor promedio de la máxima resistencia a la compresión en la sección intermedia que es de 212,96 kg cm⁻². Sin embargo, se observa una disminución en la resistencia a la compresión en la madera más cercana a la corteza.

Esta especie presentó la mayor variabilidad en los datos, alcanzando un valor de 19,14% de CV en la sección médula para la Máx R., llegando al límite admisible, y a medida que se acerca a la madera de la sección media y sección corteza su valor de variabilidad disminuye.

Para el caso del *S.saman*, la variación en la resistencia al aplastamiento varia su comportamiento con respecto a la madera más cercana a la médula siendo la sección con mayor resistencia al aplastamiento a medida que se distancia de la madera cerca a la médula esta especie disminuye su resistencia hasta llegar a la madera más cercana a la corteza. **Tabla 2**.

El promedio de las secciones transversales más cercanas a la médula presenta mayor resistencia, con un valor de 302,08 kg cm⁻². Para la sección intermedia, se observa una ligera disminución con un valor de 300,66 kg cm⁻², sugiriendo que no hay cambios notables en la resistencia de la madera a medida que se aleja de la médula. **Tabla 2**

Tabla 2. Máxima resistencia de la especie *S.saman*.

PROPIEDAD	UNIDADES	n	MÁX R				CV%
			MÍNIMO	MEDIA	MÁXIMO	DE	
Corteza	kg cm ⁻²	9	238,01	262,46	307,89	20,03	7,63
Intermedio	kg cm ⁻²		268,67	300,66	370,09	27,65	9,20
Médula	kg cm ⁻²		268,02	302,08	351,11	22,66	7,50

MÁX R: máxima resistencia a la compresión, DE: desviación estándar, CV: coeficiente de variación.

Sin embargo, al llegar a la sección de la corteza, la resistencia disminuye a $262,46 \text{ kg cm}^{-2}$, indicando que la especie reduce su capacidad de resistencia en la madera más cercana a la corteza, véase **Figura 4**.

Figura 4. Máxima resistencia a la compresión



Es importante destacar que el coeficiente de variación de los datos se mantuvo por debajo del 27% en el EFLP y del 19% en la Máx R, en todas las secciones.

CONCLUSIONES

Se diseñó un dispositivo que permitió su implementación en el VSMT. Los resultados obtenidos con este dispositivo fueron comparados a los del Fractometer II, el cual demuestra una mayor precisión en la medición al aplastamiento paralelo a las fibras en dirección de médula a corteza.

Las propiedades mecánicas de las especies *A. excelsum*, *S. saman* evidencian que la máxima resistencia a la compresión paralela disminuye a medida que se acerca a la corteza. Esta tendencia se atribuye a la composición predominante de madera con menor densidad hacia la corteza, confiriéndole características de blandura, por ende, una menor resistencia en comparación con otros tejidos del tronco.

El coeficiente de variación (CV%) para las dos especies estudiadas presentaron valores por debajo del máximo admisible en la Máx R., a excepción de la sección cercana a la médula de *A. excelsum*, que superó el valor admisible para la Máx R. Aun así, los resultados indican una distribución normal, sin presentar diferencias estadísticamente significativas.

REFERENCIAS

- Alvarado, A., & Guajardo, F., Devia, S. (2014). *Manual de plantación de árboles en áreas urbanas*. (M. Ltda., Ed.)https://www.conaf.cl/cms/editorweb/institucional/Manual_de_Plantacion_de_Arboles_en_Areas_Urbanas.pdf
- Banfield, C., Kidd, J., & Jacob, J. D. (2016). Design and development of a 3d printed unmanned aerial vehicle. In 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting (p. 2029).
- Beram, A., (2023). Evaluating the strength properties of standing trees through fractometry. *Eurasian Journal of Forest Science*, 11(3), 137-150. <https://doi.org/10.31195/ejefjs.1359426>
- Cesar, A., Olivos, A., Landa, C., Cardenas, H., Silva, P., Suarez, C., Olivos, B. e Ibarra, J., (2018) *Uso y aplicacion de la tecnologia de impresion y bioimpresion 3D en medicina*. *Novedades en Medicina*, 61(6), 43-51. Obtenido de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/facmed/v61n6/2448-4865-facmed-61-06-43.pdf>
- Clarkson S., Rieken B., Schar Dr. M., Sheppard Dr. S., (2016) Exploring Tensile Strength of Materials using Chalk as a Case Study.<https://www.vernier.com/vernier-ideas/testing-chalk-with-vsmt/>
- Díaz, L., & Ruiz, A. (2019). *La gestión del riesgo aparente en arbolado urbano*. Obtenido de https://www.aepjp.es/wp-content/uploads/2019/09/parjap94_Web.pdf
- Díaz, J., (2018). *Retos de la cadena de suministro con la inclusión de la tecnología de impresión 3d - fabricación aditiva AM*. Cuadernos Latinoamericanos de Administración, vol. XIV, núm. 27, 2018 Obtenido de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=409658132012>
- Dowhal, A. (2016). *Arboricultura urbana: gestión y manejo del arbolado público*. Obtenido de <https://elibro-net.bibliored.ut.edu.co/es/ereader/tolima/77341?page=49>
- González de Canales, C. (2002). *Beneficios del Arbolado Urbano*. Obtenido de [http://digital.csic.es/bitstream/10261/24578/1/Beneficios del arbolado urbano.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/24578/1/Beneficios_del_arbolado_urbano.pdf)
- Götz, K., Bethge, K., & Mattheck, C. (2002). The fractometer II - a mobile wood testing device.<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55864745>

11. Imaña, J., & Encinas, O. (2008). *Epidometría Forestal*. Obtenido de: <https://core.ac.uk/download/pdf/33540999.pdf>
12. Maeglin, R. R. (1979). *Increment Cores, How to Collect, Handle and Use Them*. Obtenido de <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/9801>
13. Marín, R. (2013). *Estudio Sobre Técnicas de Ensayo No Destructivas (Ndt) y Semi-Destructivas (Sdt) con el Objetivo de Determinar Algunas de las Propiedades Mecánicas de la Madera*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.1/19834>
14. Matheny, N., Clark, J., Attelwell, D., Hillery, K., Graham, W., & Posner, G. (1999). Assessment Of Fracture Moment and Fracture Angle in 25 Tree Species in The United States Using The Fractometer. *Arboriculture & Urban Forestry*.
15. Matsumoto, K.; Ishiguri, F.; Lizuka, K.; Yokota, S.; Yoshizawa, N. 2008. Evaluation of bending and compression strength of wood using Fractometer. *Wood Industry* 63(8): 358-363. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122558/records/64724a9053aa8c89630557db>
16. Moreno, F., & Hoyos, C. (2015). *Guía para el manejo del arbolado urbano en el Valle de Aburrá Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad Nacional de Colombia*.
17. Pokorny, J., O'Brien, J., Hauer, R., Johnson, G., Albers, J., Bedker, P., & Mielke, M. (2003). *Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation*. St. Paul, MN 55108: USDA Forest Service.
- Obtenido de <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/11070>
18. Ross, R. (1992). *Nondestructive Testing of Wood. Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials*. Obtenido de Nondestructive Testing of Wood. Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.001>
19. Roselló, D., (2022). *Estudio de las aplicaciones de la impresión 3D en el ambito de la construccion*. [Trabajo de Grado] Universidad Politecnica de Catalunya. Obtenido de: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/364632/MEMORIA_David_Rosell%c3%b3_Cruz.pdf?sequence=3&isAllowed=y
20. Scientrific Pty. (2023). *Vernier Go Direct Probador de estructuras y materiales*.
21. Vernier Science Education. (2023). *Vernier Structures & Materials Tester*. Obtenido de <https://www.vernier.com/product/vernier-structures-materials-tester/>
22. Wang, X., Divos, F., Pilon, C., Brashaw, B., Ross, R. J., & Pellerin, R. F. (2004). *Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: a guide for use and interpretation*. Obtenido de <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/7037#>