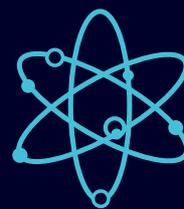


REVISTA

Ciencia



ISSN 1390-1117 • ISSN E: 2697-343X



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

VOLUMEN 22, No. 1
ENERO - MARZO, 2020



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

REVISTA
Ciencia 

ISSN 1390-1117

TCRN. Humberto Parra, Ph.D.
RECTOR

TCRN. Víctor Emilio Villavicencio Álvarez, Ph.D.
VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

Tcrn. IGEO. Patricio Xavier Molina Simbaña, Ph.D
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

Editora

Ing. Jéssica Duchicela, PhD
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Comité Editorial

Dr. Roberto Aguiar
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador

Dra. Sonia Fontanela
Centro Regional Universitario Bariloche,
Universidad Nacional del Comahue. Río Negro, Argentina.

Dr. Alexander Rincón Ruiz
Universidad Nacional de Colombia, Bogota, Colombia.

Dra. Gabriela Alonso Yanez
Universidad de Calgary, Alberta, Canada.

Ing. José Luis Hernández
Gestor Editorial

CONTACTO

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
ciencia@espe.edu.ec
<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/ciencia/index>
Tel: (593) 2 3989400 Ext. 2521
Av. General Rumiñahui S/N y Paseo Escénico
Santa Clara. Sangolquí - Ecuador

“Los artículos publicados expresan el criterio personal de sus autores y no representan la opinión de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, pueden ser reproducidos citando la fuente”.

© Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sangolquí, Ecuador.
CIENCIA - QUITO, Volumen 22, No. 1, Enero 2020
ISSN: 1390-1117, ISSN ELECTRÓNICO: 2697-343X
Revista Trimestral- 50 ejemplares

Diagramación IMPREVEL Artes Gráficas
Impresión Imprenta Universitaria ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE
Distribución gratuita

Comité Científico



Ing. Juan Carlos Camargo, PhD
Director del Grupo de Investigación de Manejo de Agroecosistemas Tropicales, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira.



Ing. Pablo Jácome Estrella, MSc.
Coordinador Regional para América Latina y El Caribe
Organización Internacional del Bambú y el Ratán – INBAR
Coordinador Eje Temático Desarrollo



Ing. Mateo Gutiérrez, PhD
Secretario General de Sociedad Internacional del Bambú y la Guadua SIBGUADUA
Coordinador Eje Temático Hábitat



Tcrn. Oswaldo Mauricio González, PhD
Director de Investigación y Desarrollo Tecnológico de las Fuerzas Armadas
Coordinador Eje Temático Innovación

Lucía Ana Díaz, Master
Pontificia Universidad Javeriana

Eduardo Ruiz Sánchez, PhD
Universidad de Guadalajara

Patricia Luna Tamayo, Master
Universidad Nacional de Colombia

Caori Takeuchi, PhD
Universidad Nacional de Colombia

Sofía Andrade, Master
Pontificia Universidad Javeriana

Daniela Cadena, Master
Universidad Central del Ecuador

Andrea Jaramillo, PhD
Universidad Tecnológica Equinoccial, UTE

Myrian Larco Benítez, PhD
Universidad Regional Amazónica – Ikiam

Luis Miguel Carrión Matamoros, Máster
Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

María Teresa Pedrosa Silva Clerici, PhD
Universidad Estatal de Campinas

Martha Lissette Sánchez, PhD
Universidad Militar Nueva Granada

Olga Vanegas, Master
Universidad Católica de Colombia

Marcos Andrés García Peñaloza
Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

Pablo Izquierdo, Master
Organización Internacional del Bambú y el Ratán - INBAR

Edwin Zea, PhD
University of Zürich – INBAR

Ing. Pablo Caiza, PhD
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Ing. Ana Haro, PhD
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Ing. Lenin Abata
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Ing. Gabriel Larrea, MSc.
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE



TABLA DE CONTENIDOS

VOL 22, No. 1

Carta del Editor

- Simposio Internacional del Bambú y la Guadua,
"Consolidando regiones desde la Mitad del Mundo".
Pablo Jácome Estrella 7

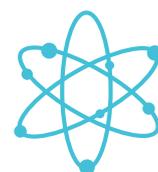
Artículos

- Comportamiento a flexión de vigas de madera reutilizada unida con bambú
(*Guadua angustifolia* Kunth) para uso estructural 11
Andrés F. Guerra R., Jorge E. Lozano P.
- Comparación de las propiedades físico-mecánicas del bambú *Guadua angustifolia* Kunth
de diferentes municipios de Colombia 34
Arq. Laura C. Sánchez E., Ing. Civil Andrés F. Guerra R., Arq. Jorge E. Lozano P.
- Sistema constructivo con *Guadua aculeata* para la producción social de la vivienda. 57
Alvaro Hernández S., Diego Torres H.
- Galletas integrales tipo cookie con fibra de brotes de bambú: propiedades tecnológicas 72
**Amanda Ríos F., Elisa C. Andrade N., Thaísa de Menezes Alves M.,
María Ferrari F., María T. Pedrosa Silva C.**
- Ciclo de floración de *Chusquea mollis* L.G. Clark (Poaceae, Bambusoideae, Bambusae,
Chusqueinae) en los Andes Venezolanos 79
Francisca Ely, José V. González
- Uso sostenible del bambú divulgado a través de actividades de extensión universitaria:
proyecto y construcción de pérgola para bicicletario 91
Andrea Jarramillo, Sumara Lisbôa, Tamara Goularte, Lisiane Librelotto
- Caracterización físico-mecánica de biotableros estructurales compuestos
tipo sándwich – Alternativa de pared portante en construcciones no-convencionales 103
Nathaly Andino, Andrés García, Oswaldo Mauricio González
- Sistema modular en bambú guadua con conexiones metálicas de fácil armado
para vivienda rural 122
Kevin A. Casallas B., Juan C. Sánchez G., Caori Patricia Takeuchi

- Normas de Publicación** 136

REVISTA

Ciencia



CARTA AL EDITOR

Simposio Internacional del Bambú y la Guadua, “Consolidando regiones desde la Mitad del Mundo”.

Pablo Jácome Estrella (1)

(1) International Bamboo and Rattan Organisation (INBAR)
Coordinador Regional para América Latina y el Caribe
pjacome@inbar.int

Recibido: 8 de Noviembre del 2019
Aceptado: 10 de Diciembre del 2020

“THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED.”

La Revista Ciencia, es un medio para la comunicación científica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, que acerca y conecta distintos intereses investigativos, desde enfoques multidisciplinares, permitiendo el debate y la divulgación de artículos de vanguardia científica, con gran incidencia en la resolución de problemas en las sociedades actuales, como el cambio climático, la pobreza, la deforestación, entre otros.

A semejanza del propósito académico de esta revista y con el fin de incentivar el intercambio de conocimientos a partir de la investigación del bambú, se realiza esta edición especial como parte del Sexto Simposio Internacional del Bambú y la Guadua, “Consolidando regiones desde la mitad del mundo”- 6SIGUADUA, del 22 al 24 de octubre del 2019, organizado por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, la Universidad Central del Ecuador- UCE, la Organización Internacional del Bambú y Ratán - INBAR, el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador - MAG, la Universidad Nacional de Colombia - UNAL, la Pontificia Universidad Javeriana de Colombia - PUJ, la Universidad Regional Amazónica- IKIAM, la Mesa Sectorial del Bambú de Ecuador y la Sociedad Internacional del Bambú y la Guadua – SIBGUADUA.

El simposio tuvo más de 250 participantes, 23 conferencistas magistrales, 34 ponentes académicos, 22 posters de exhibición, 8 artículos científicos indexados y una exhibición sobre los 10.000 años del bambú en América Latina; con asistentes de países como Colombia, Estados Unidos, Brasil, Ecuador, Francia, México, Perú, Siria, Italia, Reino Unido, Holanda, Marruecos, Costa Rica, Chile entre otros.

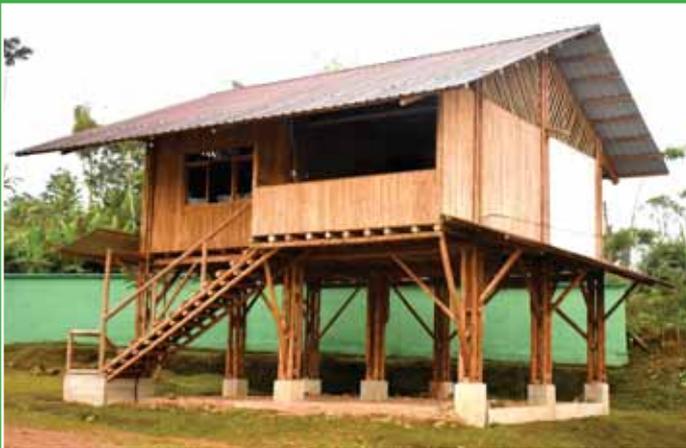
Durante los tres días de conferencias se abordó sobre la contribución del bambú en la política pública, contemplando el uso sostenible del bambú hacia un mejor modelo de desarrollo sostenible de economía verde y circular; también se trataron aspectos ambientales a partir de investigaciones recientes relacionadas con países de América Latina

y el Caribe, desde el aporte del bambú en los servicios ecosistémicos, como fuente local de energía económica y renovable, en la captura y fijación de carbono, restauración rápida de suelos degradados, conservación de la biodiversidad y protección de cuencas hídricas; además se expuso la relación del bambú con el hábitat sostenible, la vivienda social, la nueva agenda urbana, las ciudades verdes; finalmente, se presentaron nuevos productos, procesos innovadores de bambú, sus usos y su relación con los mercados, desde la interconexión entre la academia y la empresa privada.

El bambú es un recurso que a nivel mundial tiene más de 33 millones de hectáreas principalmente ubicadas en los países tropicales y subtropicales, con un comercio de 60 mil millones de dólares al año y generando trabajo a más de 16 millones de personas, se presenta como una gran alternativa para el desarrollo de los países en América Latina. Esta región que tiene 10.000 años de historia en el uso del bambú, muestra actualmente su crecimiento en el área de investigación al abrir esta edición especial de artículos científicos sobre bambú. La calidad y amplitud temática, permitieron abordar desde su aplicación sostenible en la construcción de pérgolas, biotableros estructurales, pasando por temáticas sobre desarrollo tecnológico de biocompuestos con fibras de bambú, certificación forestal de bambú, hasta su uso en la alimentación con galletas integrales con brotes de bambú, entre otros.

Esta abundancia de perspectivas para estudiar al bambú, se debe a su gran potencial como un recurso natural económico y fácilmente disponible, que está alineado a los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS para el año 2030; pues es una solución para combatir la pobreza (especialmente rural), proporciona servicios de energía modernos y asequibles, facilita el acceso a la vivienda sostenible, fomenta el uso eficiente de recursos naturales y protege y restaura los ecosistemas terrestres.

Finalmente, vale recalcar que la potencialidad del bambú es basta, por ello es preciso fomentar más estudios sobre este noble recurso; más investigadores deben sumarse en espacios como este, de debate y divulgación científica multidisciplinar, donde se fomenta el compromiso académico, ambiental y social.



Comportamiento a flexión de vigas de madera reutilizada unida con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) para uso estructural

Bending performance of beams made with reused wood joined with bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) for structural use

Andrés F. Guerra R. (1)
Jorge E. Lozano P. (1)

(1) Universidad Nacional de Colombia
afguerrari@unal.edu.co
jelozanop@unal.edu.co

Recibido: 7 de Julio, 2019
Aceptado: 11 de Diciembre, 2019

Doi: <http://dx.doi.org/10.24133/ciencia.v22i1.1288>

"THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED."

RESUMEN

En esta investigación se estudió el comportamiento mecánico de vigas compuestas por piezas de madera reutilizada obtenida en procesos de deconstrucción unidas con láminas de *Guadua angustifolia* Kunth en la parte superior e inferior mediante el sistema de encolado prensado estructural, confinando la madera y asumiendo los mayores esfuerzos de tracción y compresión producidos por la flexión y el cortante. Para este propósito se realizaron ensayos según las normas ASTM D198 y NTC 5279 que permitieron hallar parámetros mecánicos como el esfuerzo máximo de las fibras de *Guadua angustifolia* Kunth en el límite proporcional, el módulo de rotura, el módulo de elasticidad y la ductilidad al desplazamiento. Como resultado se pudo determinar que el comportamiento mecánico del sistema no está en función de la densidad de las piezas de madera, el contenido de humedad y tamaño, sino de la resistencia mecánica de las fibras de *Guadua angustifolia* Kunth y la calidad de la línea de adhesivo. Así mismo se pudo determinar que las vigas tienen un comportamiento dúctil antes de llegar a la falla.

Palabras claves:

Madera reutilizada, bambú, *Guadua angustifolia* Kunth, vigas, construcción, sostenibilidad, deconstrucción.

ABSTRACT

This research studies the mechanical performance of beams composed of pieces of reused wood obtained in deconstruction processes, joined with *Guadua angustifolia* Kunth sheets in the upper and lower part with structural pressing glue system and confining the wood, assuming biggest stresses of traction and compression, produced by bending and shear efforts. For this purpose, tests were according to ASTM D198 and NTC5279 standards to find mechanical parameters such as the maximum stress of the *Guadua angustifolia* Kunth fibers in the proportional limit, the modulus of rupture, the

modulus of elasticity and the ductility to displacement. The result was: the mechanical performance of the system is not a function of the density of the wood pieces, the moisture content and size, but of the mechanical strength of the *Guadua angustifolia* Kunth fibers and the quality of the line of adhesive. Likewise, it was possible to determine that the beams have a ductile performance before the fault.

Keywords.

Reused wood, bamboo, *Guadua angustifolia* Kunth, beams, construction, sustainability, deconstruction.

1. INTRODUCCIÓN

Para reducir los impactos ambientales que genera la industria de la construcción se proponen diferentes alternativas que controlen la extracción de materias primas no renovables y reduzcan la cantidad de desechos durante la construcción y la demolición de edificaciones. Una opción son los procesos de deconstrucción, en los cuales, los elementos que componen la edificación pueden ser desensamblados y reutilizados prolongando de la vida útil de los materiales recuperados, utilizándolos nuevamente sin que se requiera un proceso de transformación. Sin embargo, esta práctica se dificulta en construcciones que no fueron diseñadas para desensamblar sus elementos de manera fácil.

Los sistemas estructurales de madera permiten desensamblar sus componentes de manera sencilla, ya que sus uniones se basan en elementos metálicos como clavos, tornillos, pasadores y pletinas. Sin embargo, en una misma construcción se pueden recuperar piezas de madera de diferente especie, tamaño y calidad estructural.

En vista de la necesidad de buscar alternativas innovadoras para el aprovechamiento de la madera obtenida en procesos de construcción y demoliciones reduciendo la explotación incontrolada de este recurso y contribuir a la reforestación de los bosques, el Centro de Investigación de Bambú y Madera (CIBAM) y el Grupo de Investigación Madera y Guadua (GIMG) de la Universidad Nacional de Colombia, estudian el comportamiento mecánico de elementos estructurales contruidos a partir de madera reciclada y reutilizada.

En esta investigación se determina el comportamiento mecánico a flexión de vigas construidas con piezas de madera reutilizada obtenida en procesos de deconstrucción, unidas y reforzadas con esterilla de bambú *Guadua angustifolia* Kunth mediante el sistema de laminado estructural prensado encolado.

El estudio experimental consistió en realizar ensayos de flexión a vigas de 3 m de longitud siguiendo los parámetros establecidos en la norma ASTM D198 - NTC5279. Encontrando el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional, el módulo de rotura, el módulo de elasticidad y la ductilidad al desplazamiento de las vigas estudiadas.

Por otro lado, se examina el comportamiento de la línea de adhesivo en las probetas al corte longitudinal inducido por esfuerzos de flexión. Además, se analiza la resistencia y el módulo de elasticidad de las vigas en función del número de piezas, el contenido de humedad promedio, la densidad y la distribución de la madera reutilizada.

2. VIGAS DE MADERA REUTILIZADA UNIDAS CON BAMBÚ MEDIANTE EL SISTEMA DE LAMINADO ESTRUCTURAL PENSADO ENCOLADO.

En esta investigación se recolectan piezas de madera producto de desmontes de estructuras y se lleva a unas dimensiones establecidas retirando los elementos metálicos, las imperfecciones y los residuos de otros materiales como adhesivos y morteros. Las piezas de madera son colocadas una junto a otra y se unen mediante una lámina superior e inferior de esterilla de *Guadua angustifolia* Kunth en el sistema de laminado encolado,

confinando los elementos de madera reutilizada y asumiendo los esfuerzos máximos de compresión y tensión producto de la flexión (figura 1), este procedimiento se lleva a cabo para obtener elementos estructurales con características mecánicas de acuerdo a los parámetros del título G del código de construcción sismo resistente colombiano NSR10.



Figura 1. Vigas compuestas estudiadas

2.1. DECONSTRUCCIÓN.

Es una técnica en la cual se recuperan materiales y elementos de construcción durante el desmonte o demolición de una edificación, reduciendo costos de disposición y tratamiento de residuos y mitigando impactos ambientales generados en las etapas de extracción de materias primas, procesamiento y disposición final. (EPA, 2008)

En los procesos de deconstrucción, los materiales que componen a las edificaciones y que han llegado al final de su vida útil pueden ser reutilizados y reciclados utilizándolos como materia prima para la fabricación de nuevos elementos, haciendo que su ciclo de vida sea cerrado pasando de un análisis de ciclo de vida “creadle to grave” a uno “creadle to creadle” en el cual los materiales pueden ser recolectados, reutilizados o reciclados manteniendo una calidad aceptable. (McDonoufh & Braungart, 2002)

El diseño para la deconstrucción (DfD) es un concepto en el cual, desde el diseño se proyectan las construcciones para que sus elementos se puedan desensamblar, reutilizar, manufacturar y reciclar en industrias. El principal objetivo de esta iniciativa es reducir los impactos en contaminación, aumentando la eficiencia económica y de los recursos naturales en remodelaciones y demoliciones de edificaciones recuperando sus componentes para extender su vida útil. (Guy, 2002)

2.2. MADERA REUTILIZADA PARA USO ESTRUCTURAL.

Los sistemas estructurales para la construcción en madera hacen que sus elementos sean fáciles de desmontar y reutilizar, sus conexiones se basan principalmente en elementos metálicos como clavos, tornillos pernos y pletinas. En deconstrucción los tamaños de la madera y la forma en que se unen y se cortan los elementos determinan su reutilización, las piezas más grandes tienen más opciones a la hora de evaluar sus posibles nuevos usos, mientras que en general los elementos pequeños contienen mayor cantidad de conectores como clavos y tornillos que se deben retirar manualmente consumiendo energía y tiempo. (Zabusova, 2014)

Para llevar a cabo procesos de reutilización de madera es importante analizar las condiciones a las que estuvo expuesto el material en la edificación. (Flak et al., 1999)

La reutilización de elementos de madera a los que se les ha aplicado adhesivo, presentan una severa reducción en la resistencia cuando se vuelven a utilizar en productos encolados, en los elementos de madera reutilizada que tienen residuos de urea formaldehído se ve significativamente afectado el comportamiento del curado y la calidad de la adhesión del nuevo sistema, el mayor deterioro de la unión entre elementos se obtiene con mayor contenido y tamaño de residuos en la superficie de madera. (Zhong et al., 2017)

2.3. MADERA LAMINADA ENCOLADA.

La madera laminada se define como la unión de prismas de madera unidos mediante diferentes métodos, conformando un elemento monolítico que es continuo en escuadría y en largo. Dependiendo del tipo de unión los elementos laminares pueden ser pernados, calvados o encolados, por lo general las láminas se disponen a lo largo del eje longitudinal del elemento, sin embargo también se fabrican elementos laminados cruzados en donde las láminas adyacentes se ubican ortogonalmente, cabe aclarar que si las láminas son paralelas al plano neutro de flexión del elemento se considera un laminado horizontal, si son normales al plano neutro de flexión se trata de una laminación vertical. (Pérez, 1992)

En la fabricación de elementos estructurales de madera laminada se han utilizado dos clases de adhesivos, en un principio se usaron colas naturales producidas a base de materiales orgánicos y más adelante se implementaron los adhesivos sintéticos. Los adhesivos Orgánicos se crean a base de proteínas, estos adhesivos son muy susceptibles a la humedad generando restricciones en el uso estructural. Entre los adhesivos sintéticos se encuentran los Formaldehidos, usualmente son a base de fenol formaldehido (PF), resinol formaldehido (RF), fenol-resinol formaldehido (PRF), úrea formaldehído (UF) y melamina formaldehido. Estos polímeros se deben mezclar con catalizadores, cargas y disolventes para su aplicación, el fraguado de estos materiales se produce por la policondensación de la resina cuando reacciona con el catalizador, el tiempo de fraguado depende en gran parte de la temperatura ambiente, por lo general se realiza entre 15°C y 20°C, para aumentar la velocidad del fraguado en procesos industriales se usan temperaturas entre los 70°C y 140°C. (Quevedo, 2000)

2.4. BAMBÚ *Guadua angustifolia* Kunth EN EL SISTEMA LAMINADO ESTRUCTURAL.

La guadua se clasifica como un bambú leñoso del cual existen aproximadamente 1000 especies, 500 de estas especies presentes en América. El bambú *Guadua angustifolia* Kunth se encuentra principalmente en países como Colombia, Venezuela y Ecuador, aunque también existe en grandes cantidades en países centroamericanos como Panamá, que junto con Colombia se han caracterizado por el uso de esta especie en diferentes campos. (Olarte, 2012). Las fibras se encuentran orientadas axialmente dando a la guadua una alta resistencia a la tensión paralela a la fibra, siendo más resistente en la pared externa debido a su dureza y mayor cantidad de fibras, así mismo, la resistencia a la tensión se reduce en los nudos por la orientación de algunos haces vasculares. (Carvajal et al., 1981)

Para la *Guadua angustifolia* Kunth en el sistema laminado estructural la calidad y la durabilidad del elemento depende del adhesivo y su resistencia a las condiciones de humedad (Lozano, 2010). En cuanto a la determinación del mejor adhesivo para la fabricación de vigas laminadas de bambú Gonzalez et al., 2009 estudiaron diferentes tipos de pegantes entre ellos la melamina formaldehido, fenol resorcinol formaldehido y poliuretano, encontrando que para todos la falla se presentó en la *Guadua angustifolia* Kunth en la zona de interacción con el adhesivo, además la resistencia es menor en la cara interior de las tablillas, concluyendo que la falla no se produce en la línea de cola sino en el material blando de la guadua. Como conclusión de la investigación el adhesivo melamina formaldehido fue el mejor en cuanto a sostenibilidad y comportamiento mecánico. (González et al., 2009)

3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

3.1. TRANSFORMACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.

3.1.1. OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE MADERA PARA SER REUTILIZADA.

La madera utilizada en esta investigación fue recuperada de la estructura de cubierta de los edificios 238 y 239 ubicados dentro del campus de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Durante este proceso los elementos de madera fueron desmontados tratando de mantener su integridad, sin embargo, algunos debieron ser cortados y otros sufrieron lesiones mecánicas. Cada pieza se estudió siguiendo los requisitos generales de calidad, según la clasificación visual por defectos establecida en título G – Estructuras de madera y estructuras de guadua del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Los elementos metálicos de fijación como clavos, pernos, platinas son retirados (figura 2), durante este proceso se pueden generar lesiones mecánicas como fisuras, grietas, abolladuras etc. que podrían hacer que el elemento sea descartado al no cumplir los requisitos de clasificación visual. Cada elemento de madera es cortado con una sierra eléctrica, perpendicularmente a su eje longitudinal, eliminando en lo posible defectos como nudos, perforaciones, pudrición, rajaduras y manchas. Mediante este proceso se obtuvieron piezas con escuadría mínima de 18 cm de altura, 4 cm de espesor. Para el largo de las piezas se definieron diferentes medidas, 260 cm, 130 cm, 86 cm y 65 cm.



Figura 2. Retiro de elementos metálicos.

Las piezas se dejan planas por una de las caras de 18cm y se deja ortogonal una de las caras de 4cm. Este proceso se lleva a cabo utilizando una planeadora para madera. Luego se procede a cepillar cada elemento con un cepillo eléctrico para madera (figura 3), con el cual se logra garantizar un espesor uniforme para todas las piezas.



Figura 3. Proceso de cepillado y corte.

Para identificar las diferentes especies de madera se realiza una caracterización teniendo en cuenta las características macroscópicas de la madera y las propiedades organolépticas, como el olor y la apariencia, teniendo

en cuenta detalles sobre su estructura realizando observaciones mediante una lupa o un estéreo microscopio, determinando un conjunto de características xilemáticas en los elementos de la estructura celular y propiedades físico químicas.

3.1.2. OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DEL BAMBÚ *Guadua angustifolia* Kunth

La *Guadua angustifolia* Kunth que se utilizó en la construcción de las vigas se obtuvo en la región de El Socorro, Santander – Colombia, municipio ubicado sobre la cordillera oriental del sistema montañoso de los Andes, esta región tiene una temperatura media de 23°C, y se encuentra a una altitud media de 1.300 m. sobre el nivel del mar, el relieve varía entre fuertemente escarpado con pendientes entre el 25% y 50%, al muy escarpado con pendientes mayores al 75%. Fueron seleccionadas Guaduas que no cumplen algunos requisitos mínimos de clasificación visual por defectos descrito en el título – G, G.12.3.2 del NSR10, pero que a su vez no afecta el diseño de los elementos estructurales estudiados en esta investigación ya que no se utilizara en su forma cilíndrica, esta selección contribuye a optimizar el aprovechamiento de los guaduales y además reduce costos de fabricación.

Para elaborar las láminas de esterilla que se colocan en la parte superior e inferior de las vigas, se realizan incisiones en el nudo de forma paralela al eje longitudinal de la Guadua, la separación entre cada corte se realiza cada 3cm aproximadamente, este procedimiento se lleva a cabo generando fisuras en los entrenudos. Posteriormente se abre la Guadua longitudinalmente y se retira la parte interna de los nudos. Además, se debe retirar el tejido parenquimático que cubre las fibras de la parte interior del culmo para garantizar la adhesión entre la madera y las fibras de guadua con el adhesivo, este procedimiento se realiza con una lijadora de banda, desbastando la parte interior de la esterilla hasta que las fibras queden expuestas, así mismo es necesario retirar las ramas en la parte externa ya que en el prensado produce rotaciones de la viga (figura 4).



Figura 4. Retiro de tejido parenquimático y nudos.

3.2. CONSTRUCCIÓN DE VIGAS.

Se lleva a cabo en dos procesos, ensamble del alma de las vigas y el encolado y prensado del alma con las láminas de *Guadua angustifolia* Kunth.

3.2.1. ENSAMBLE DE PIEZAS DE MADERA PARA EL ALMA DE LAS VIGAS.

Las piezas de madera tienen una altura de 16cm, esta altura corresponde a la máxima dimensión que se pudo recuperar teniendo en cuenta que todas las piezas deben tener la misma altura para garantizar la presión de prensado constante a lo largo del elemento. En el sentido longitudinal, se usan diferentes dimensiones debido a que en algunos elementos es necesario realizar cortes en el proceso de deconstrucción y para eliminar defectos. Para mantener uniforme la distribución de las piezas en esta investigación se logra recuperar longitudes de 260 cm, 130 cm, 86 cm y 65 cm.

Se construyen 12 vigas con 6 configuraciones diferentes, en función de la longitud de las piezas. Para mantener los elementos de madera unidos durante el proceso de encolado y para garantizar la continuidad de las fibras de guadua que quedan fuera del alma, se utilizan uniones de madera de 16cm de altura, 5cm de ancho y 1.9cm de espesor, unidos a la madera reutilizada mediante grapas. No se utiliza adhesivo para unir las piezas de madera.

3.2.2. ENCOLADO Y PRENSADO DEL ALMA CON LAS LÁMINAS DE *Guadua angustifolia* Kunth.

El adhesivo utilizado para adherir la esterilla de *Guadua angustifolia* Kunth es úrea melamina formaldehído (MUF1442), este polímero termoestable debe mezclarse con un catalizador (Hardener 2542) para originar la policondensación de la resina y producir el fraguado, el tiempo de fraguado está determinado por la temperatura en el momento de la aplicación de la mezcla. Se debe garantizar una presión uniforme en los elementos a adherir durante un tiempo determinado por la dosificación de la mezcla (figura 5), luego curan los elementos pegados durante un tiempo definido por la temperatura ambiente.

Teniendo en cuenta que la madera pierde rigidez y resistencia al aumentar el contenido de humedad, se mide el contenido de humedad de cada madera antes de realizar el ensayo de flexión.



Figura 5. Proceso de prensado.

3.3. ENSAYOS DE FLEXIÓN PARA MADERA EN TAMAÑOS ESTRUCTURALES ASTM D198 - NTC5279.

En este método la viga se somete a un momento flector mientras se sostiene cerca de sus extremos en apoyos llamados reacciones y se le aplican dos cargas transversales impuestas simétricamente entre las reacciones (figura 6). La viga se deforma a una velocidad constante. El ensayo se realiza hasta la ruptura, se toman mediciones de la deflexión de la viga en el centro de la luz con un comparador de caratula hasta alcanzar la deformación máxima permitida en las deflexiones admisibles contempladas en el título G del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR10.



Figura 6. Ensayo de flexión.

Para cada viga se registraron los valores de fuerza (kgf) y desplazamiento (mm) (figura 7)

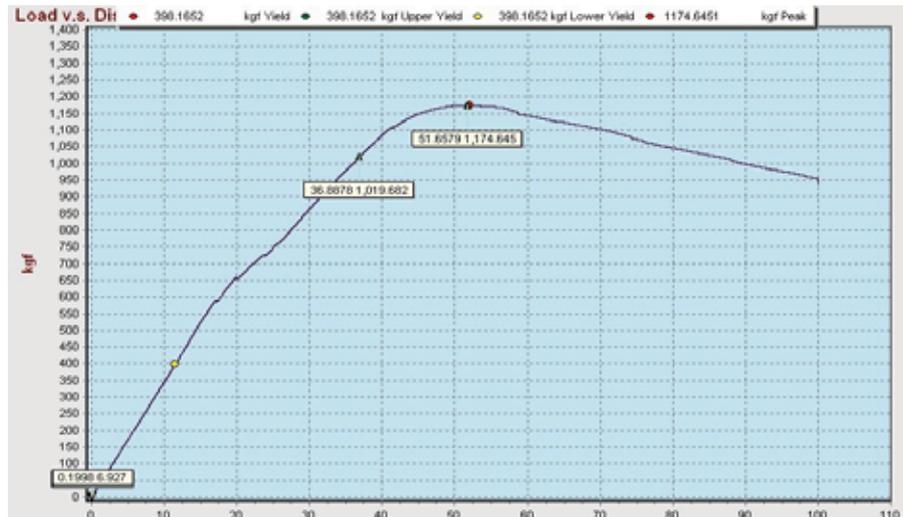


Figura 7. Curvas carga (kgf) desplazamiento (mm).

Con los datos obtenidos en el ensayo de flexión siguiendo los parámetros descritos en las normas ASTM D198 - NTC5279 se realiza el cálculo del esfuerzo cortante y momento flector máximo para cada probeta.

3.3.1. CORTANTE MOMENTO FLECTOR Y DEFLEXIÓN PARA LA CARGA MÁXIMA Y LÍMITE PROPORCIONAL.

Tabla 1.

Esfuerzo cortante, momento y deflexion para la carga maxima y para carga en el limite proporcional

Probeta	Carga máxima $P(N)$	Cortante máximo $V(N)$	Momento máximo $M(N*mm)$	Deflexión $\Delta(mm)$	Probeta	Carga en el límite proporcional $P_{lp}(N)$	Cortante $V_{lp}(N)$	Momento $M_{lp}(N*mm)$	Deflexión $\Delta(mm)$
G1A	11519.33	5759.67	5414086.22	48.56	G1A	10787.32	5393.66	5070038.05	37.72
G1B	14482.00	7241.00	6806539.91	41.53	G1B	13729.31	6864.66	6452775.70	39.19
G2A	5067.00	2533.50	2381489.05	30.53	G2A	4314.93	2157.46	2028015.22	14.70
G2B	3985.47	1992.74	1873171.65	18.13	G2B	1916.22	958.11	900623.12	6.74
G3A	2353.30	1176.65	1106051.85	7.264	G3A	2353.30	1176.65	1106051.85	7.26
G3B	3530.67	1765.33	1659414.24	24.34	G3B	2458.33	1229.17	1155415.58	15.02
G4A	4861.00	2430.50	2284669.76	26.17	G4A	4860.96	2430.48	2284651.33	26.24
G4B	6367.33	3183.67	2992645.27	47.23	G4B	4917.64	2458.82	2311292.07	25.00
G5A	5560.00	2780.00	2613199.01	25.11	G5A	4400.93	2200.47	2068437.25	17.42
G5B	7966.33	3983.17	3744177.01	35.63	G5B	3115.96	1557.98	1464503.54	10.30
G6A	2850.26	1425.13	1339623.89	10.12	G6A	2850.26	1425.13	1339623.89	10.12
G6B	6259.33	3129.66	2941884.97	35.38	G6B	3143.82	1571.91	1477593.45	10.48

3.3.2. CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE ELASTICIDAD EN EL ALMA CE POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

A partir de los valores de fuerza y desplazamiento obtenidos en el ensayo de flexión dentro del rango elástico de la viga, se determina la constante de elasticidad en el alma compuesta por distintas especies de madera reutilizada con diferentes dimensiones, propiedades mecánicas y contenidos de humedad, estos elementos no están unidos con adhesivo provocando desplazamientos relativos perpendiculares al eje neutro de la sección al vencerse la fuerza de fricción entre ellos y al deformarse la esterilla de guadua que compone los patines de la viga. Es necesario conocer la tasa de deformación que determina el comportamiento del alma dentro del rango elástico, para calcular un factor n que relaciona el módulo de elasticidad de la guadua y la tasa de deformación en el alma permitiendo calcular la ubicación del eje neutro y el momento de inercia de una sección transformada.

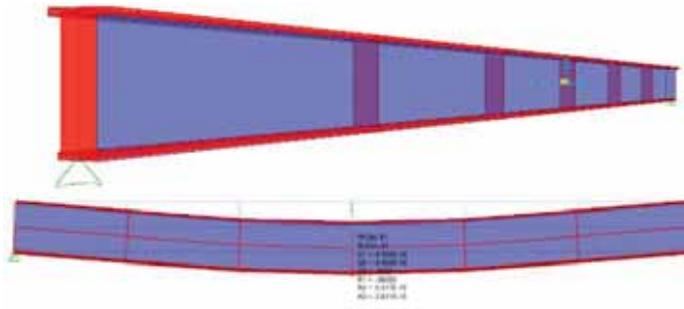


Figura 8. Modelo de elementos finitos.

Para conocer la constante de elasticidad del alma se realiza un modelo de elementos finitos de cada viga en las condiciones del ensayo de flexión para la carga registrada en los 8 mm de deformación (figura 8), el módulo de elasticidad del alma será ajustado mediante iteraciones hasta alcanzar la deformación de los 8 mm. (Tabla 2).

Tabla 2. Constante de elasticidad del alma de las vigas.

PROBETA	Carga (kgf)	Carga por bloque de carga (kgf)	Deflexión Δ (mm)	Constante de elasticidad del alma CE (kgf/m ²)	Constante de elasticidad del alma CE (MPa)
G1A	386.4	193.2	8	125000000.00	1225.83
G1B	382.9	191.45	8	125000000.00	1225.83
G2A	272.8	136.4	8	330000000.00	323.62
G2B	197.8	98.9	7	160000000.00	156.91
G3A	234.37	117.185	7.5	230000000.00	225.55
G3B	177.93	88.965	8	83000000.00	81.39
G4A	279.2	139.6	8	350000000.00	343.23
G4B	273.6	136.8	8	320000000.00	313.81
G5A	287.53	143.765	8	410000000.00	402.07
G5B	271.87	135.935	8	320000000.00	313.81
G6A	240.13	120.065	8	200000000.00	196.13
G6B	280.08	140.04	8	360000000.00	353.04

3.3.3. CÁLCULO DE LA UBICACIÓN DEL EJE NEUTRO Y MOMENTO DE INERCIA I DE LA SECCIÓN.

Para calcular la ubicación del eje neutro y el momento de inercia de cada elemento es necesario analizar cada tipo de viga como un material heterogéneo de sección compuesta. Por lo tanto, es necesario realizar cálculos sobre una sección transformada asumiendo que toda la viga tiene el MOE de la *Guadua angustifolia* Kunth. (Tabla 3)

Tabla 3. Momento de inercia sección transformada

	PATIN SUPERIOR						ALMA SECCION TRANSFORMADA						PATIN SUPERIOR						Iv (mm ⁴)
	Ye (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)	Y (mm)	bt (mm)	h (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)	Y (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)	Y (mm)			
G1A	99.87	60	10	600	5000	175	4.52	160	723.20	200000	90	40	10	400	3333.3	5	8607091.56		
G1B	99.87	60	10	600	5000	175	4.52	160	723.20	200000	90	40	10	400	3333.3	5	8607091.56		
G2A	104.28	60	10	600	5000	175	1.19	160	190.40	406964	90	40	10	400	3333.3	5	7397595.62		
G2B	105.56	60	10	600	5000	175	0.58	160	92.80	197316	90	40	10	400	3333.3	5	7166116.11		
G3A	105	60	10	600	5000	175	0.83	160	132.80	283641	90	40	10	400	3333.3	5	7261889.88		
G3B	106.22	60	10	600	5000	175	0.3	160	48.00	102358	90	40	10	400	3333.3	5	7059922.24		
G4A	104.14	60	10	600	5000	175	1.26	160	201.60	431628	90	40	10	400	3333.3	5	7424593.88		
G4B	104.35	60	10	600	5000	175	1.16	160	185.60	394631	90	40	10	400	3333.3	5	7384079.42		
G5A	103.74	60	10	600	5000	175	1.48	160	236.80	505621	90	40	10	400	3333.3	5	7505326.89		
G5B	104.35	60	10	600	5000	175	1.16	160	185.60	394631	90	40	10	400	3333.3	5	734079.42		
G6A	105.24	60	10	600	5000	175	0.72	160	115.20	246645	90	40	10	400	3333.3	5	7220927.9		
G6B	104.07	60	10	600	5000	175	1.3	160	208.00	443960	90	40	10	400	3333.3	5	7438076.25		

3.3.4. CÁLCULO DEL ESFUERZO MÁXIMO EN LA FIBRA EN EL LÍMITE PROPORCIONAL SF.

El esfuerzo máximo de tensión de las fibras en el límite proporcional se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S_{ft} = \frac{M_{lp} * C_t}{I_v} \quad (1)$$

S_{ft} = Esfuerzo de tensión de la fibra en el límite proporcional.

M_{lp} = Momento para la carga registrada en el límite proporcional.

C_t = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a tensión.

I_v = Momento de inercia de la viga.

Tabla 4.
Esfuerzo maximo de tension de la fibra en el limite proporcional

PROBETA	Momento M _{lp} (N*mm)	C _t (mm)	I _v (mm ⁴)	S _{ft} (MPa)
G1A	5070038.05	99.87	8607091.56	58.83
G1B	6452775.70	99.87	8607091.56	74.87
G2A	2028015.22	104.28	7397595.62	28.59
G2B	900623.12	105.56	7166116.11	13.27
G3A	1106051.85	105	7261889.88	15.99
G3B	1155415.58	106.22	7059922.24	17.38
G4A	2284651.33	104.14	7424593.88	32.05
G4B	2311292.07	104.35	7384079.42	32.66
G5A	2068437.25	103.74	7505326.89	28.59
G5B	1464503.54	104.35	7384079.42	20.7
G6A	1339623.89	105.24	7220927.9	19.52
G6B	1477593.45	104.07	7438076.25	20.67

Por otro lado el esfuerzo máximo de compresión de las fibras en el límite proporcional se calcula así:

$$S_{fc} = \frac{M_{lp} * C_c}{I_v} \quad (2)$$

S_{fc} = Esfuerzo de compresión de la fibra en el límite proporcional.

M_{lp} = Momento para la carga registrada en el límite proporcional.

C_c = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a compresión.

I_v = Momento de inercia de la viga.

Tabla 5.

Esfuerzo maximo de compresión de la fibra en el limite proporcional

Probeta	Momento $M I_p$ (N*mm)	C_c (mm)	I_v (mm ⁴)	S_{fc} (MPa)
G1A	5070038.05	80.13	8607091.56	47.2
G1B	6452775.7	80.13	8607091.56	60.07
G2A	2028015.22	75.72	7397595.62	20.76
G2B	900623.1227	74.44	7166116.11	9.36
G3A	1106051.846	75.00	7261889.88	11.42
G3B	1155415.58	73.78	7059922.24	12.07
G4A	2284651.328	75.86	7424593.88	23.34
G4B	2311292.073	75.65	7384079.42	23.68
G5A	2068437.251	76.26	7505326.89	21.02
G5B	1464503.536	75.65	7384079.42	15.00
G6A	1339623.89	74.76	7220927.90	13.87
G6B	1477593.453	75.93	7438076.25	15.08

3.3.5. CÁLCULO DEL MÓDULO DE RUPTURA S_{Rt} .

El módulo de ruptura para las fibras en tensión se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_{Rt} = \frac{M * C_t}{I_v} \quad (3)$$

S_{Rt} = Esfuerzo de tensión de la fibra en el límite proporcional.

M = Momento para la carga máxima.

C_t = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a tensión.

I_v = Momento de inercia de la viga.

Tabla 6.

Módulo de rotura fibras a compresión.

Probeta	Momento M (N*mm)	C_t (mm)	I_v (mm ⁴)	S_{Rt} (MPa)
G1A	5414086.22	99.87	8607091.56	62.82
G1B	6806539.91	99.87	8607091.56	78.98
G2A	2381489.05	104.28	7397595.62	33.57
G2B	1873171.65	105.56	7166116.11	27.59
G3A	1106051.85	105.00	7261889.88	15.99
G3B	1659414.24	106.22	7059922.24	24.97
G4A	2284669.76	104.14	7424593.88	32.05
G4B	2992645.27	104.35	7384079.42	42.29
G5A	2613199.01	103.74	7505326.89	36.12
G5B	3744177.01	104.35	7384079.42	52.91
G6A	1339623.89	105.24	7220927.90	19.52
G6B	2941884.97	104.07	7438076.25	41.16

Por otro lado el módulo de ruptura para las fibras en compresión calcula así:

$$S_{Rc} = \frac{M * C_c}{I_v} \quad (4)$$

S_{Rc} = Esfuerzo de compresión de la fibra en el límite proporcional.

M = Momento para la carga registrada en el límite proporcional.

C_c = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a compresión.

I_v = Momento de inercia de la viga.

Tabla 7.

Módulo de rotura fibras a tension.

Probeta	Momento M (N*mm)	C_c (mm)	I_v (mm ⁴)	S_{Rc} (MPa)
G1A	5414086.22	80.13	8607091.56	50.40
G1B	6806539.91	80.13	8607091.56	63.37
G2A	2381489.05	75.72	7397595.62	24.38
G2B	1873171.65	74.44	7166116.11	19.46
G3A	1106051.85	75.00	7261889.88	11.42
G3B	1659414.24	73.78	7059922.24	17.34
G4A	2284669.76	75.86	7424593.88	23.34
G4B	2992645.27	75.65	7384079.42	30.66
G5A	2613199.01	76.26	7505326.89	26.55
G5B	3744177.01	75.65	7384079.42	38.36
G6A	1339623.89	74.76	7220927.90	13.87
G6B	2941884.97	75.93	7438076.25	30.03

3.3.6. CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD E

Para hallar el módulo de elasticidad de cada viga se despeja E, de la ecuación de deflexión que para una viga simplemente apoyada con dos cargas puntuales ubicadas simétricamente la deflexión en el centro de la luz es:

$$E = \frac{P * a}{24 \Delta I} * (3L^2 - 4a^2) \quad (5)$$

E= Módulo de elasticidad MOE.

Δ = Deflexión.

P= Fuerza.

a= Distancia entre la reacción y el punto de carga más cercano.

I = Momento de inercia de la viga.

L= Luz, distancia entre las reacciones.

Tabla 8.

Módulo de elasticidad.

Probeta	Carga límite proporcional (N)	Δ límite proporcional (mm)	a (mm)	L(mm)	I_v (mm ⁴)	E (MPa)
G1A	10787.32	37.72	940.00	2820.00	8607091.56	26447.55
G1B	13729.31	39.19	940.00	2820.00	8607091.56	32397.92
G2A	4314.93	14.70	940.00	2820.00	7397595.62	31583.89
G2B	1916.22	6.74	940.00	2820.00	7166116.11	31579.24
G3A	2353.30	7.26	940.00	2820.00	7261889.88	35510.13
G3B	2458.33	15.02	940.00	2820.00	7059922.24	18453.16
G4A	4860.96	26.24	940.00	2820.00	7424593.88	19862.04
G4B	4917.64	25.00	940.00	2820.00	7384079.42	21204.14
G5A	4400.93	17.42	940.00	2820.00	7505326.89	26793.34
G5B	3115.96	10.3	940.00	2820.00	7384079.42	32610.63
G6A	2850.26	10.12	940.00	2820.00	7220927.9	31046.43
G6B	3143.82	10.48	940.00	2820.00	7438076.25	32102.24

3.3.7. CÁLCULO DE LA DUCTILIDAD AL DESPLAZAMIENTO $\mu\Delta$.

Este parámetro mide la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento en el límite proporcional a partir del cual se genera el punto de primera cadencia del material y cambia la pendiente de la recta tangente de la gráfica esfuerzo vs. Deformación dando inicio al rango plástico del material en el cual ya existen deformaciones permanentes. (Tabla 9)

El cálculo de la ductilidad al desplazamiento se realiza con la siguiente ecuación.

$$\mu\Delta = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (6)$$

$\mu\Delta$ = Ductilidad al desplazamiento.

Δu = Desplazamiento máximo.

Δy = Desplazamiento máximo en el límite proporcional.

Nótese que en un comportamiento frágil el valor de ductilidad al desplazamiento tiende a 1.

Tabla 9.
Índice de ductilidad.

Probeta	Δ máximo (mm)	Δ límite proporcional (mm)	$\mu\Delta$
G1A	100	37.72	2.65
G1B	46.84	39.19	1.20
G2A	33.28	14.7	2.26
G2B	19.49	6.74	2.89
G3A	47.64	7.26	6.56
G3B	31.69	15.02	2.11
G4A	67.69	26.24	2.58
G4B	50.35	25.00	2.01
G5A	36.66	17.42	2.10
G5B	51.34	10.30	4.98
G6A	13.99	10.12	1.38
G6B	40.304	10.48	3.85

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de cortante, momento flector y deflexión para la carga en el límite proporcional y la carga máxima presentan una alta dispersión en los resultados, esto se ve reflejado en la gran reducción de la resistencia en el valor característico del Módulo de ruptura y el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional del sistema propuesto.

Por otro lado, la dispersión en los valores de esfuerzo en la fibra en el límite proporcional fue la mayor de todos los datos recolectados, este comportamiento se debe a que fue difícil garantizar la calidad en toda la línea de encolado por las irregularidades que presenta la esterilla. En el momento en que el patín superior, sometido a esfuerzos de compresión, empieza deformarse y a despegarse de la madera termina el rango elástico del material, entonces la carga máxima al límite proporcional está directamente relacionada con la calidad del adhesivo sobretodo en el patín superior.

Los valores del módulo de elasticidad tuvieron un coeficiente de variación del 20%, teniendo la menor dispersión de todos los resultados. A continuación, se presenta el resumen de los valores promedio, el valor para el quinto percentil y el valor característico. (Tabla 10)

Tabla 10.
Índice de ductilidad.

	PROMEDIO	QUINTO PERCENTIL	VALOR CARACTERÍSTICO
Sft(MPa)	30.26	14.77	7.72
SFc(MPa)	22.74	10.49	4.94
SRt (MPa)	39.00	17.94	11.36
SRc (MPa)	29.1	12.77	7.56
E(MPa)	28299.23	19228.04	16219.06

4.1. RELACIÓN ENTRE EL CH DE LAS PIEZAS DE MADERA REUTILIZADA Y EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS VIGAS.

Se realizan gráficos relacionando la resistencia y el módulo de elasticidad con el contenido de humedad CH de la madera reutilizada en donde se presenta la falla y la desviación estándar de los contenidos de humedad de las piezas, como parámetro para determinar la influencia de la variación entre los contenidos de humedad de la madera que compone la viga. (figura 9)

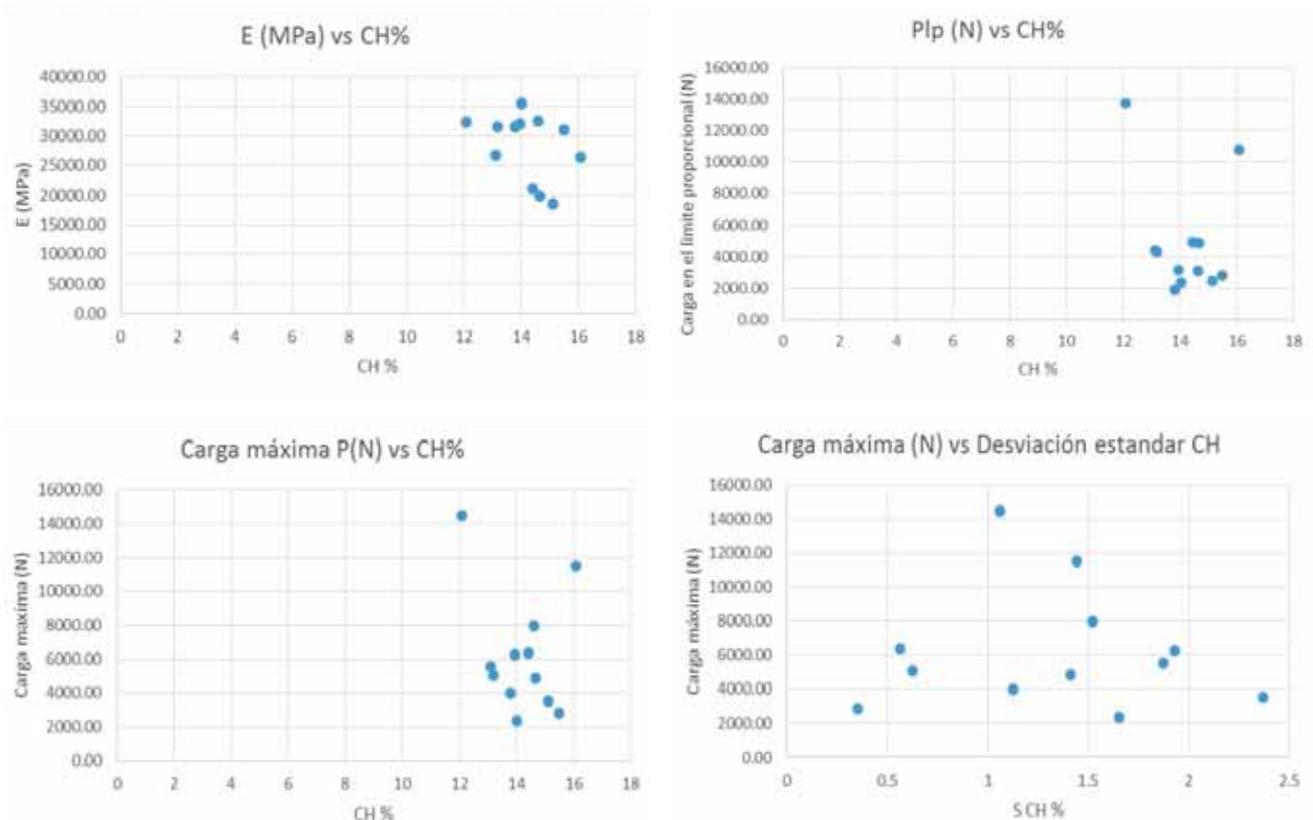


Figura 9. Módulo de elasticidad, carga en el límite proporcional, carga máxima vs CH de la pieza de madera en el lugar de la falla.

No se encuentra una tendencia clara entre la relación del contenido de humedad de la madera reutilizada y el módulo de elasticidad de las vigas, lo mismo ocurre entre el contenido de humedad y la carga máxima registrada en el ensayo de flexión. Al analizar la variación de los contenidos de humedad (desviación estándar del CH) de las piezas que componen las vigas con relación a la carga máxima tampoco se encuentra una tendencia definida. El comportamiento de las vigas no está determinado por el contenido de humedad de las piezas que componen el alma de las probetas ensayadas. Siempre y cuando se garantice la calidad de la línea de cola.

4.2. RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO DE LAS PIEZAS DE MADERA REUTILIZADA Y EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS VIGAS

A pesar de que las vigas con piezas de 0.65 x 0.16 m. tienen una carga máxima mayor que las de 0.87 x 0.16 cm. Se puede ver una tendencia en el aumento de la resistencia con relación al tamaño máximo de las piezas que componen la viga. Las vigas con piezas de 1.30 x 0.16 m. fueron las que soportaron la mayor carga y las piezas de 0.87 x 0.16 cm la menor. (figura 10)

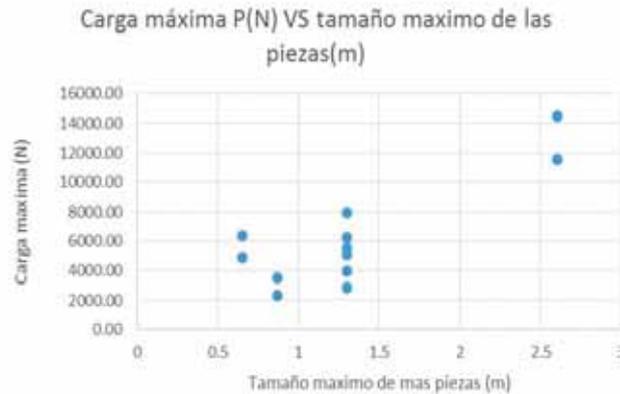


Figura 10. Carga máxima vs tamaño de las piezas de madera reutilizada.

Durante los ensayos de flexión se observó que existe un desplazamiento entre las piezas de madera que componen el alma de la viga, es por esto que se analiza la relación entre el módulo de elasticidad y la cantidad de juntas que se presentan en cada viga, además de la relación entre el comportamiento de la carga máxima resistida respecto al número de uniones. (figura 11)

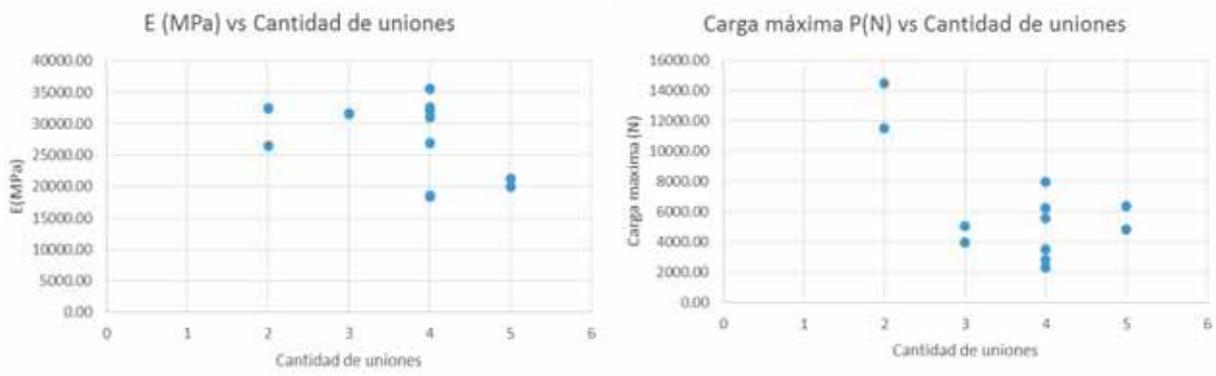


Figura 11. Módulo de elasticidad y Carga maxima vs Cantidad de uniones

En vigas con tres uniones se presenta la menor dispersión de resultados, la carga máxima se registró en vigas con dos uniones, sin embargo, el módulo de elasticidad máximo se presentó en vigas de cuatro uniones. El mejor comportamiento se obtiene en vigas con dos uniones, siendo estas vigas las que tienen la menor cantidad de juntas de todas las vigas analizadas.

4.3. RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD DE PIEZAS DE MADERA REUTILIZADA Y EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS VIGAS

Se halló el porcentaje de madera de alta densidad de cada probeta y se realizaron gráficos de porcentaje de piezas de alta densidad versus la carga máxima y el módulo de elasticidad. La carga máxima se logró en para 87% de maderas de alta densidad en el alma, sin embargo, hay gran variabilidad entre los valores de carga máxima para este porcentaje, no se encuentra una tendencia entre la resistencia de las vigas y la densidad de las maderas que componen el alma de la viga. (figura 12)



Figura 12. Carga máxima vs porcentaje de madera de alta densidad.

En cuanto al módulo de elasticidad, el valor máximo y el mínimo se reportó para 65% de maderas de alta densidad, la menor dispersión en los resultados se logró con 87% de maderas de alta densidad. No se establece una tendencia clara entre el módulo de elasticidad de la viga y la densidad de las piezas de madera reutilizada que compone el alma de la viga. (figura 13)

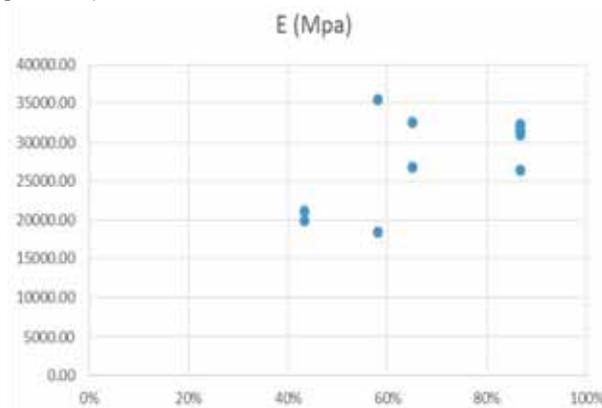


Figura 13. Módulo de elasticidad vs porcentaje de madera de alta densidad.

4.4. TIPOS DE FALLA

4.4.1. TIPO DE FALLA 1: COMPORTAMIENTO FRÁGIL. FALLA EN LA LÍNEA DE COLA

En este tipo de falla la viga llega a un nivel de esfuerzos en el cual la esterilla de guadua del patín inferior se separa del adhesivo (falla en la línea de cola), este tipo de falla se debe a defectos de en la fabricación en el proceso de encolado y prensado, también ocurre cuando no se retira completamente el tejido parenquimático de la guadua. (figura 14)



Figura 14. Separación de la guadua del patin inferior en un extremo de la viga.

4.4.2. COMPORTAMIENTO DÚCTIL: FALLA POR TENSIÓN EN LAS FIBRAS DEL PATÍN INFERIOR

Este tipo de falla fue común en la mayoría de las probetas ensayadas, al empezar a aumentar la carga las vigas tienen un comportamiento elástico y empiezan a deformarse las fibras del patín superior que no están adheridas a la madera reutilizada. (figura 15)



Figura 15. Deformación fibras del patin superior.

En esta etapa hay un desplazamiento relativo entre las piezas de madera reutilizada, esta deformación solamente es controlada por la esterilla de guadua. La guadua realiza el mayor aporte a la rigidez de la viga. (figura 16)



Figura 16. Desplazamiento relativo piezas de madera reutilizada.

Al aumentar la carga y la deflexión, la esterilla de la parte superior empieza a despegarse de las piezas de madera, en este punto se registra el final del comportamiento elástico de la viga, el inicio del comportamiento plástico se caracteriza por que las fibras de guadua del patín inferior empiezan a ser más solicitadas. Ya hay deformaciones permanentes. (figura 17)



Figura 17. Separación de la guadua del patin superior.

Las deformaciones continúan y existen saltos en la gráfica carga deformación a medida que se despegan las fibras del patín superior, sin embargo, en todos los casos la viga continúa asumiendo carga hasta que supera la carga obtenida en el límite proporcional. (figura 18)



Figura 18. Esfuerzos asumidos por el patin inferior.

Las deformaciones empiezan a ser mayores para pequeños incrementos de carga sin fallar (ductilidad), la falla se produce cuando se pierde la adherencia entre el patín inferior y el adhesivo o cuando las fibras de guadua superan su resistencia a la tensión. Las piezas de madera reutilizada no sufrieron daños en ninguna viga y se pueden reutilizar nuevamente. (figura 19)



Figura 19. Falla por tension de las fibras del patin inferior.

4.5. ANÁLISIS DE LA DUCTILIDAD

En general las vigas tienen un comportamiento dúctil, al finalizar su comportamiento elástico, las vigas continúan deformándose plásticamente sin colapsar. En todas las vigas se produce la carga máxima en el rango plástico. (figura 20)



Figura 20. Tipo de viga vs carga máxima y carga en el limite proporcional.

Este comportamiento es producido por la ductilidad de la *Guadua angustifolia* Kunth, esta ductilidad se debe a que a ciertos niveles de esfuerzo empiezan a romperse gradualmente algunas fibras, sin embargo, existe una redistribución de esfuerzos en las fibras que no han fallado. (Estrada, 2016)

La ductilidad máxima al desplazamiento ocurrió en la viga G3A, para esta viga se obtuvo un valor de 6.56, La viga puede deformarse 6.5 veces más que la deformación alcanzada en el límite proporcional, el menor valor registrado fue de 1.20 en la viga G1B, esta viga presento el mayor valor de carga máxima.

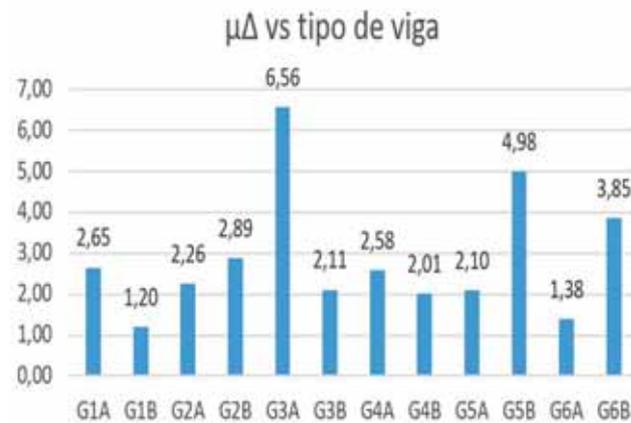


Figura 21. Ductilidad al desplazamiento vs tipo de viga.

El valor promedio del parámetro de ductilidad al desplazamiento es de 2.88, con una desviación estándar de 1.55, el coeficiente de variación es 54%. (figura 21)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta el impacto ambiental que produce la industria de la construcción, es necesario desarrollar prácticas sostenibles, la innovación en materiales de construcción se desarrolla en un contexto de reducción de extracción de materias primas no renovables y mitigación de impactos ambientales ocasionados por desechos de construcción. En países que no han desarrollado tecnologías basadas en la reutilización, los materiales se deben someter a procesos de transformación para ser reutilizados. Esta investigación propuso la construcción de elementos estructurales a partir de madera reutilizada unida mediante *Guadua angustifolia* Kunth que produjo las siguientes conclusiones:

ETAPA DE FABRICACIÓN:

- Procesamiento de la madera reutilizada:

Las piezas de madera reutilizada se deben someter a una exhaustiva inspección visual, es importante analizar patológicamente cada pieza de madera recuperada para identificar lesiones físicas, mecánicas o químicas que puedan afectar el comportamiento mecánico de las vigas. Durante el proceso de desmonte, las piezas de madera sufren perforaciones, agrietamiento, aristas faltantes y contaminación por agentes químicos. Estos defectos deben ser retirados manteniendo el mayor tamaño posible de cada pieza. Se deben ajustar las dimensiones de cada elemento garantizando uniformidad en la altura, el ancho y el espesor de las piezas de madera, garantizando el contacto total entre elementos adyacentes, teniendo en cuenta que diferentes medidas en la altura de las piezas ocasiona que la presión de prensado no sea uniforme a lo largo de la viga reduciendo la resistencia de la línea de cola.

- Procesamiento de la *Guadua angustifolia* Kunth:

Las fibras de esterilla de guadua deben ser continuas a lo largo de toda la viga, es difícil controlar el ancho de la esterilla, por este motivo se debe garantizar que la menor medida del ancho corresponda a la medida de diseño. El tejido parenquimático debe ser retirado hasta que las fibras de la guadua queden expuestas, las protuberancias de los nudos deben ser pulidas hasta que toda la esterilla tenga el mismo espesor, de no ser así la presión de prensado se concentrará en estos puntos generando deficiencias en la presión de prensado en los entrenudos. En los casos en que en la superficie exterior de la esterilla se encuentren ramas, se deben retirar dejando la superficie lo más uniforme posible, de no ser retiradas se presentan problemas en el prensado ya que se genera una rotación del elemento y es imposible realizar este procedimiento.

- Proceso de encolado, prensado y curado:

Se deben seguir las recomendaciones del fabricante en cuanto la dosificación de adhesivo y catalizador adecuada, además de la presión de prensado y el tiempo de curado correcto. Antes de iniciar en encolado se debe verificar que las superficies de las piezas de madera y de guadua estén limpias y sean uniformes, el adhesivo se debe aplicar de manera uniforme evitando excesos.

- Resultados obtenidos:

La mayor carga máxima registrada en los ensayos de flexión fue de 14482.00 N, para la viga G1B compuesta por dos piezas de madera de baja densidad en los extremos (0.2m x 0.16m) y un elemento central de madera de alta densidad (2.60m x 0.16), esta configuración presenta el menor número de uniones y la pieza de madera de mayor longitud.

La menor carga máxima registrada fue de 2353.30 N, para la viga G3A compuesta por dos elementos de alta densidad en los extremos (0.87m x 0.16m), y tres elementos centrales de baja densidad: un elemento central de (0.87m x 0.16m) y dos elementos a cada lado de (0.2m x 0.16m).

El esfuerzo de la fibra más alejada del eje neutro en el límite proporcional y el módulo de rotura se calcularon para las fibras sometidas a tensión y a compresión, los máximos esfuerzos se producen en las fibras inferiores sometidas a tensión. Al tratarse de un elemento compuesto por varios materiales fue necesario calcular la relación entre el módulo de elasticidad de la guadua y una constante de elasticidad en el alma. Teniendo en cuenta que las maderas reutilizadas solo están unidas en la parte superior e inferior por guadua, la fricción que se desarrolla entre las piezas adyacentes no es suficiente para asumir el esfuerzo de corte y se presenta un desplazamiento relativo entre piezas de madera.

Para encontrar la relación entre el módulo de elasticidad de la guadua y el alma de la viga y poder calcular la geometría de la sección transformada se analizó la deformación de la viga mediante el método de los elementos finitos, realizando iteraciones hasta conseguir la deflexión registrada en el ensayo de flexión en una condición de carga determinada dentro del rango elástico.

La dispersión de los resultados fue bastante alta, para el esfuerzo de la fibra más alejada del eje neutro en el límite proporcional se tiene un coeficiente de variación de 61.24% en tensión y 67.85% a compresión. En cuanto al módulo de ruptura el coeficiente de variación es de 47.01% a tensión y 52.37% a compresión. Los valores del módulo de elasticidad tuvieron un coeficiente de variación del 20%, teniendo la menor dispersión de todos los resultados.

La dispersión alta hace que los valores promedio de esfuerzo de la fibra más alejada del eje neutro en el límite proporcional y módulo de ruptura se reduzcan en más de un 50% para el quinto percentil y en más del 70% para el valor característico. En el caso del módulo de elasticidad se reduce en un 32% para el quinto percentil y 43% para

el valor característico. La dispersión en los resultados se produce por la variación en la calidad en el proceso de encolado teniendo en cuenta que las irregularidades en el espesor de la esterilla provocan deficiencias de presión en algunas zonas, así mismo es difícil mantenerla en su sitio justo antes de aplicarles presión.

La variación de los contenidos de humedad (desviación estándar del CH) de las piezas que componen las vigas con relación a la carga máxima no muestra una tendencia definida. El comportamiento de las vigas no está determinado por el contenido de humedad de las piezas que componen el alma de las probetas ensayadas.

No se encontró una relación entre el contenido de humedad de las piezas de madera reutilizada en donde ocurre la falla y la resistencia de las vigas, lo mismo ocurre con el tamaño máximo de las piezas utilizadas y con el número de uniones. El comportamiento depende entonces de la resistencia los elementos de *Guadua angustifolia* Kunth y la calidad de la línea de adhesivo.

En vigas con tres uniones se presenta la menor dispersión de resultados, la carga máxima se registró en vigas con dos uniones, sin embargo, el módulo de elasticidad máximo se presentó en vigas de cuatro uniones. El mejor comportamiento se obtiene en vigas con dos uniones, siendo estas vigas las que tienen la menor cantidad de juntas de todas las vigas analizadas.

En cuanto a la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad de la madera reutilizada, el valor máximo y mínimo del módulo de elasticidad se reportó para las vigas construidas con el 65% de maderas de alta densidad, la menor dispersión en los resultados se logró con 87% de maderas de alta densidad. No se establece una tendencia clara entre el módulo de elasticidad de la viga y la densidad de las piezas de madera reutilizada que compone el alma de la viga.

Las vigas tienen un comportamiento dúctil, al finalizar su comportamiento elástico, las vigas continúan deformándose plásticamente sin fallar. En todas las vigas se produce la carga máxima en el rango plástico. La ductilidad máxima al desplazamiento ocurrió en la viga G3A, para esta viga se obtuvo un valor de 6.56, lo cual quiere decir que puede deformarse 6.5 veces más que la deformación alcanzada en el límite proporcional, el menor valor registrado fue de 1.20 en la viga G1B, esta viga presento el mayor valor de carga máxima.

• Tipos de falla:

Se registran dos tipos de falla principales:

Falla frágil cuando se falla la línea de adhesivo del patín inferior en los extremos de las vigas debido a defectos en la fabricación específicamente en el proceso de encolado y prensado.

Falla dúctil en la cual se presenta un comportamiento elástico en el cual las fibras superiores sometidas a compresión empiezan a deformarse en las zonas que no están adheridas al alma y se producen desplazamientos relativos entre las piezas, luego el patín superior empieza a despegarse del alma empezando el comportamiento elástico de la viga, este proceso es gradual y produce saltos en la curva carga vs deformación, la deformación empieza a aumentar para pequeñas variaciones de carga porque todo el esfuerzo lo asume el patín inferior, la falla se produce cuando la guadua de la parte inferior falla por tensión o cuando se despega del alma en los extremos. Ninguna pieza de madera reutilizada sufrió daños, la ruptura se registra en la esterilla de guadua o en la línea de cola.

• **RECOMENDACIONES**

Es importante buscar una menor dispersión en el comportamiento mecánico de las vigas de madera reutilizada unidas con *Guadua angustifolia* Kunth para aumentar los valores característicos. Teniendo en cuenta que hay vigas que tuvieron un buen comportamiento hay que mejorar el proceso de fabricación de las piezas de esterilla de

Guadua angustifolia Kunth aumentando la calidad de la línea de adhesivo, garantizando una presión de prensado uniforme en toda la viga.

La selección de la esterilla se realizó bajo la premisa de trabajar con el material que generara el menor consumo energético y el menor costo económico. Sin embargo, para evitar problemas en el proceso de prensado, se deben incorporar procesos y equipos que permitan trabajar con productos de guadua más uniformes. Las latillas de guadua solucionan problemas en el prensado ya que las superficies son uniformes, sin embargo, se pierde el aporte de la pared externa que es la más resistente debido a su dureza y mayor cantidad de fibras.

A pesar de ser un elemento construido con madera presenta ductilidad gracias a la guadua, se recomienda utilizar un método de diseño estructural más adecuado ya que en el método de los esfuerzos admisibles, por el cual se diseñan las estructuras de madera según el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR10, no se tendría en cuenta la ductilidad las vigas estudiadas.

6. DISCUSIÓN

Es necesario incentivar la práctica del reciclaje y la reutilización de materiales que han sido desechados en actividades de construcción, en esta investigación se proponen elementos estructurales innovadores, teniendo en cuenta que reutilizan madera uniéndola con *Guadua angustifolia* Kunth, un material con grandes ventajas ambientales y mecánicas.

Sin embargo, para reducir al máximo el consumo de energía en el proceso de fabricación se decidió utilizar esterilla de guadua, lo cual ocasionó inconvenientes en la fase de encolado y prensado de las vigas, que se vio reflejado en una alta dispersión de los resultados, esta dispersión conlleva a que los valores característicos de los parámetros que determinan el comportamiento mecánico de las vigas sean mucho menores a los valores promedio encontrados.

Para disminuir la dispersión de los resultados se propone mejorar el proceso de fabricación de los elementos de *Guadua angustifolia* Kunth, aunque se consumirá más energía en el proceso se podrían obtener valores característicos más altos que permitan optimizar el uso de estos elementos en estructuras.

Hay que destacar que el sistema propuesto tiene un comportamiento dúctil con un rango inelástico bastante amplio, por lo tanto, es un elemento estructural que acumula una gran cantidad de energía inelástica de deformación, un estudio detallado del módulo de tenacidad determinará la energía necesaria para llegar al punto de ruptura, este parámetro es sumamente importante para el diseño de construcciones sismo resistentes. Sin embargo, para aprovechar la ductilidad del material el diseño estructural no debe realizarse por el método de los esfuerzos admisibles.

El sistema propuesto aporta significativamente a la cadena de valor de la *Guadua angustifolia* Kunth, que a pesar de ser un recurso abundante ha sido subvalorado, el desarrollo científico y la innovación en productos a base de este material que promuevan alternativas sostenibles dinamizarán la economía rural contribuyendo al desarrollo social de las comunidades.

REFERENCIAS

- Environmental Protection Agency United States, (2008). "Lifecycle Construction Resource Guide".
- McDonoufh, W. & Braungart, M. (2002). "Cradle to cradle: Remaking the way we make things.
- Guy, A. (2002). "Design for Deconstruction and Materials Reuse."
- Zabusova, D. (2014). "Design for Deconstruction"
- Flak, R., Green, D. & Lantz, S. (1999). "Evaluation of lumber recycled from an industrial military building" vol. 49, no. 8816, pp. 49– 55.
- Zhong, R., Gu, J., Gao, Z., Tu, D. & Hu, C. (2017). "International Journal of Adhesion and Adhesives Impacts of urea-formaldehyde resin residue on recycling and reconstitution of wood-based panels," vol. 78, no. May, pp. 60–66.
- Pérez, V. (1992). "Manual de madera laminada" Instituto forestal de Chile. Santiago.
- Quevedo, V. (2000). "Adherencia y adhesivos para madera"
- Olarte, A. (2012). "Diseño de conexiones en elementos estructurales de bambú - Guadua laminada pegada prensada para un proyecto de vivienda".
- Carvajal, W., Ortegón, W. & Romero, C. (1981). "Elementos estructurales en bambú".
- Lozano, J. (2010). "Diversas aplicaciones del bambú en la arquitectura".
- Gonzalez, H., Hellwing, S. & Montoya, J. (2009) "Determinación del adhesivo óptimo en la fabricación de vigas de bambú (*Guadua angustifolia*) procedure to determine the optimum adhesive for manufacturing timber of bamboo (*Guadua angustifolia*)".
- Estrada, M. (2016). "Modelo numérico micromecánico del proceso de fractura de estructuras fabricadas con bambú *Guadua angustifolia*".

REVISTA
Ciencia 

ISSN 1390-1117



© Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sangolquí, Ecuador.
CIENCIA - QUITO, Volumen 22, No. 1, Enero 2020
ISSN: 1390-1117, ISSN E: 2697-343X.
Revista Trimestral- 50 ejemplares

Comparación de las propiedades físico-mecánicas del bambú *Guadua angustifolia* Kunth de diferentes municipios de Colombia

Comparison of physical and mechanical properties of bamboo *Guadua angustifolia* Kunth from different municipalities of Colombia

MSc. Arq. Laura C. Sánchez E.⁽¹⁾
MSc. Ing. Civil Andrés F. Guerra R.⁽¹⁾
MSc. Arq. Jorge E. Lozano P.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Nacional de Colombia
lcsancheze@unal.edu.co
afguerrari@unal.edu.co
jelozanop@unal.edu.co

Recibido: 7 de Julio, 2019
Aceptado: 11 de Diciembre, 2019

Doi: <http://dx.doi.org/10.24133/ciencia.v22i1.1289>

"THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED."

RESUMEN

Esta investigación se realiza mediante ensayos físico-mecánicos para la caracterización del bambú *Guadua angustifolia* Kunth proveniente de los municipios de Socorro- Santander, Guaduas- Cundinamarca, Oiba -Santander y guadua proveniente del departamento del Tolima, Colombia. Este proceso que se realiza con 12 culmos de guadua de 9.00m, cortados a 1.5 m para la parte inferior, 4.5 m para la parte media y 3.00 m para la parte superior, de estas secciones se seleccionan las probetas para la realización de los ensayos de contenido de humedad, densidad, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, corte con nudo y sin nudo, tensión paralela a la fibra y flexión siguiendo los procedimientos indicados en la Norma Técnica Colombiana y el Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR 2010. Los resultados de los ensayos fueron sometidos a revisión y análisis para documentar los datos correspondientes a los esfuerzos admisibles y determinación del módulo de elasticidad requerido para la construcción de estructuras con *Guadua angustifolia* Kunth en todo el territorio nacional.

Palabras claves:

Guadua angustifolia Kunth, ensayos físico-mecánicos, contenido de humedad, esfuerzo admisible, módulo de elasticidad, densidad.

ABSTRACT

The objective of the current research is to determine the physical and mechanical properties of the bamboo variety *Guadua angustifolia* Kunth from the municipalities of Socorro- Santander, Guaduas-Cundinamarca, Oiba -Santander and from the department of Tolima, Colombia. To realize the tests, there were required 12 culms from each of the municipalities, these tests were conducted under moisture content, density, bending stress, shear stress parallel to the fiber, tension stress and parallel and perpendicular compression stress to the fibers, following the procedure described in the Technical Standard

of Colombia 5525 and the Seismic resistant Construction Regulations in Colombia NSR 10. The results obtained by the test were analyzed to collect the data corresponding to the allowable stress and elastic modulus required for constructions of *Guadua angustifolia* Kunth structures in Colombia.

Keywords: *Guadua angustifolia* Kunth, physical and mechanical tests, moisture content, admissible stress, elastic modulus, density.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente explotación de recursos naturales no renovables es necesario revisar nuevas alternativas para revertir o mitigar el impacto sobre el planeta y sus ecosistemas. La explotación de *Guadua angustifolia* Kunth se revierte a los 3 años, (Rodríguez, 2007) lo que permite una explotación responsable del recurso, que se puede recuperar rápidamente y de paso colaborar con la reforestación de zonas afectadas por la tala de bosques, desecamiento de los ríos y monocultivos.

Los cultivos de guadua se utilizan como plan de reforestación de los ríos afectados por la minería y la ganadería, es tanto el aumento de la siembra de guadua que se ha dinamizado la construcción de vivienda y espacios ecoturísticos con este material. (Moreno, Osorio, & Trujillo, 2006; Takeuchi & González, 2007). Por este motivo es necesario saber las características del material con el fin de garantizar su buen comportamiento en la construcción.

Durante el desarrollo de la vivienda rural colombiana, se observa el uso de guadua sobre todo en estructuras de cubierta y usos ornamentales, las técnicas artesanales de construcción continúan vigentes y con la creciente demanda del material para uso estructural, se han venido refinando para su uso en construcciones más complejas. Desde la década de 1970 se inició la investigación de las propiedades físico-mecánicas del material, desarrollando las primeras metodologías para su estudio y regularización de su uso, de este proceso se destaca que la guadua era utilizada mayormente en la construcción de muros de bahareque.

Para poder dinamizar la construcción con *Guadua angustifolia* Kunth, se debe realizar un análisis profundo de sus características físico-mecánicas referenciando la ubicación de la guadua en una zona determinada. En Colombia la *Guadua angustifolia* Kunth se encuentra en su mayoría en los departamentos de Antioquia, Cauca, Caldas, Cundinamarca, Huila, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca. Debido a varios programas de reforestación la guadua ha venido creciendo en los departamentos de Boyacá, Santander y Norte de Santander.

Como consecuencia del aumento en la siembra de *Guadua angustifolia* Kunth, en estas zonas del país se han comenzado a construir estructuras con este material, haciendo necesario realizar estudios en diferentes regiones, teniendo en cuenta la trazabilidad de su producción, explotación, tratamientos como inmunización, tipos de cortes, uniones, almacenamiento, transporte, rentabilidad, estudio de mercado, entre otros, con el fin de incentivar su uso.

Desde el aspecto técnico se han realizado estudios donde se caracterizan las diferentes variedades (kunth, amplexifolia, macana, castilla, nigra, cebolla), esta investigación se inició seleccionando la especie *Guadua angustifolia* Kunth, continuando con la línea de investigación del Grupo de Investigación Madera y guadua de la Universidad Nacional de Colombia, acerca de las caracterizaciones de sus propiedades físico-mecánicas en diferentes lugares del país (Ardila Pinilla, 2013; Garzón Aponte, 2016; Narváez Estefan, 2017), siguiendo la metodología descrita en la NTC 5525 y los procedimientos mencionados en la NSR 10. Cabe aclarar que la *Guadua angustifolia* Kunth es la variedad que se encuentra normalizada en la NSR-10.

Se realizaron ensayos mecánicos de Flexión, Corte, compresión paralela y perpendicular a la fibra y tensión paralela con el fin de determinar los valores de esfuerzos admisibles de la *Guadua angustifolia* Kunth de Socorro, Santander. El procedimiento de los ensayos de corte perpendicular a la fibra se menciona en el libro "Validación de

la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles” desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia. (AIS, 2010; Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, 2007)

2. PRELIMINARES

2.1. SELECCIÓN DEL MATERIAL:

La selección de los culmos se realizó con personal capacitado para la explotación correcta de la *Guadua angustifolia* Kunth siguiendo las indicaciones de la NTC 5525 y de la NSR 10, se tuvieron en cuenta parámetros como la edad del culmo, la cual debe ser entre 3 y 6 años; los culmos deben tener una circunferencia de entre 32 a 36 cm a una altura de 1.20 m. no deben tener grietas, agujeros ni presencia de hongo rojo en toda su longitud. En la figura 1 se observa el guadual durante el procedimiento de selección del material.



Figura 1. Lugar de suministro de la *Guadua angustifolia* Kunth.

Una vez seleccionados los 12 culmos se procedió al corte, este se realiza contando a 3 entrenudos desde la base con el fin de permitir que la planta vuelva a brotar. Como se observa en la figura 2.



Figura 2. Corte del culmo.

Luego de realizar la tala de la guadua, cada culmo se dividió en tres secciones; inferior de 1.5m, media de 4.5m. y superior de 3.5m; el material cortado se transportó al laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia en la ciudad de Bogotá. Las guaduas llegaron al laboratorio 4 días después del corte, es primordial que la guadua para

los ensayos sea transportada lo más pronto posible para evitar deterioro en sus condiciones físicas y además de esta manera se reduce el riesgo de ataque de insectos.

3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y PREPARACIÓN DE PROBETAS

3.1. IDENTIFICACIÓN DE CULMOS Y CORTE DE PROBETAS

Para la identificación de los culmos se siguieron los siguientes parámetros:

- El material se almacena aislado de la intemperie y evitando su contacto con el suelo
- Se organizan los 12 culmos identificando las diferentes secciones (inferior, media, superior) según la marcación realizada al momento de su corte.
- Se cortan e identificar la cantidad de nudos y entrenudos que tiene cada culmo como se observa en la figura 3.



Figura 3. Acopio, marcación de entrenudos.

- Se miden los diámetros de los extremos de cada sección identificando el sentido de crecimiento de la guadua.
- Se realiza la medición de cuatro espesores en los extremos de cada sección.
- Es importante identificar los defectos presentes tales como rajaduras, curvaturas pronunciadas, huecos, etc. Esta información es importante para elegir las probetas.

Esta información obtenida se recolectó en un formato digital. Ver figura 4.

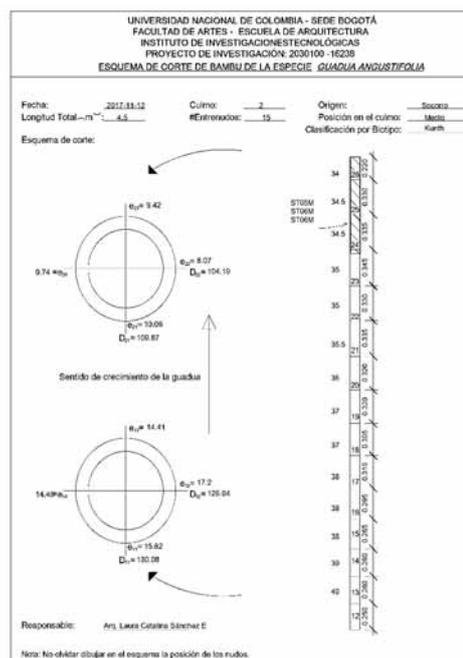


Figura 4. Formato de caracterización.

Para la enumeración de las probetas se utilizó el sistema mostrado en la figura 5.

LUGAR				
SOCORRO= S	GUADUAS= G	OIBA=O	TOLIMA = T	
ENSAYO				
COMPRESIÓN PARALELA=C	COMPRESIÓN PERPENDICULAR=CP	CORTE CON NUDO=V CORTE SIN NUDO= V	TENSIÓN PARALELA= T	FLEXIÓN = F
SECCIÓN				
INFERIOR= I		MEDIA= M	SUPERIOR= S	

Figura 5. Nomenclatura de las probetas.

Luego de definir las probetas y su ubicación se procede a marcar cada probeta en el culmo correspondiente, identificando exactamente la ubicación y el nombre dado a cada probeta siguiendo la nomenclatura indicada anteriormente como se observa en la figura 6.



Figura 6. Marcación de las probetas con la nomenclatura.

3.2. CORTE Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Luego de realizar la marcación de las probetas se realiza el corte, para este procedimiento se requiere una sierra de disco. Para las probetas de ensayos a tensión paralela se necesita una sierra sinfín debido a su forma curva.

Para los ensayos de compresión y corte paralelo es necesario realizar un proceso de afinado con lija para garantizar un ángulo recto en los extremos respecto a la parte longitudinal.

Luego de todo el proceso de corte y lijado, las probetas se sumergen en agua por un período no menor a 15 días antes de cada ensayo con el fin de saturar el material como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Probetas sumergidas en agua.

4. INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS

Los ensayos realizados son necesarios para la determinación de los valores de esfuerzo admisible para diferentes solicitaciones, se siguió la metodología descrita en la NTC 5525 “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth”. Para los ensayos de compresión perpendicular a la fibra se utilizó la metodología indicada en el documento “Validación de la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles” (MADR UNAL, 2010).

4.1. CRITERIO DE CHAUVENET

Para cada uno de los ensayos se realizó un análisis estadístico, donde el número de datos se da después de excluir los resultados atípicos usando el Criterio de Chauvenet.

Ecuación para determinar datos atípicos mediante el criterio de Chauvenet.

$$\frac{x - \bar{x}}{s} \quad (4.1)$$

4.2. DETERMINACIÓN DEL VALOR CARACTERÍSTICO Y EL ESFUERZO ADMISIBLE

Luego de realizar el análisis estadístico de cada ensayo, es necesario obtener el valor de los esfuerzos admisibles, determinándolos según los valores característicos de cada solicitación. Para obtener este valor característico debe usarse la ecuación 4.2 usada en la NSR 10 G.12.7-1, esta ecuación se encuentra en la norma ISO 22156:2004

$$Rk = R_{0.05i} \left(1 - \frac{2.7m}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \right) \quad (4.2)$$

En donde:

R_{ki} = es el valor característico en la solicitación i .

$R_{0.05i}$ = es el percentil 5 de los datos en la solicitación i .

s = es la desviación estándar de los datos de las pruebas de laboratorio.

m = es el promedio de los datos de las pruebas de laboratorio.

n = es el número de datos del ensayo.

i = subíndice que depende del tipo de solicitación (f para flexión, t para tracción paralela a las fibras, c para compresión paralela a las fibras, cp para compresión perpendicular a las fibras, v para cortante paralelo a las fibras)

Luego de hallar el valor característico para cada tipo de ensayo, se determinó el esfuerzo admisible según la ecuación 4.3 usada en el documento MADR-UNAL-2010 y tomada de la Norma ISO 22156:2004 (Bamboo – structural design) numeral 7.4.

$$\sigma_{admi} = R_{ki} \times Gx \frac{D}{S} \quad (4.3)$$

En donde:

σ_{admi} = es el esfuerzo admisible.

R_{ki} = es el valor característico para la sollicitación i

G = es el coeficiente de modificación para la diferencia entre la calidad del laboratorio y la práctica cuyo valor predeterminado es 0.5.

D = es el coeficiente de modificación por duración de la carga (1.0 para carga permanente (M), 1.25 para carga permanente más carga temporal (M+V) y 1.5 para carga permanente más carga temporal más carga de viento (M+V+W)).

S = es el factor de seguridad cuyo valor predeterminado es 2.25.

i = subíndice que depende del tipo de sollicitación (f para flexión, t para tracción paralela a las fibras, c para compresión paralela a las fibras, cp para compresión perpendicular a las fibras, v para cortante paralelo a las fibras).

Con el fin de realizar comparación de resultados, se usó la ecuación 4.4 establecida en la NSR-10 (G.12.7-2), esta ecuación es diferente a la tomada de la norma ISO22156.

$$F_i = \left(\frac{FC}{F_s \times FDC} F_{ki} \right) C_m \quad (4.4)$$

F_i = es el esfuerzo admisible en la sollicitación i

F_{ki} = Valor Característico 17.47 MPa

FC = Factor de reducción por diferencias entre las condiciones de los ensayos en el laboratorio y las condiciones reales de aplicación de las cargas en la estructura (1.0 para flexión, 0.5 para tracción, 1.0 para compresión paralela, 1.0 para compresión perpendicular y 0.6 para corte).

F_s = es el factor de seguridad (2.0 para flexión, 2.0 para tracción, 1.5 para compresión paralela, 1.8 para compresión perpendicular y 1.8 para corte).

FDC = factor de duración de carga (1.5 para flexión, 1.5 para tracción, 1.2 para compresión paralela, 1.2 para compresión perpendicular y 1.1 para corte).

C_m = Coeficiente de modificación por CH.

Adicionalmente se tendrán en cuenta la metodología descrita en la NSR-10 correspondientes a la determinación de los esfuerzos admisibles (G.12.7-1) y Módulos de Elasticidad (G.12.7-2).

Tabla 1.

Valores de esfuerzos admisibles. Fuente: NSR-10. (AIS, 2010).

Esfuerzos admisibles F_i (MPa), CH=12%

F_h Flexión	F_t Tracción	$F_{t }$ Compresión	$F_{t\perp}$ Compresión ⊥	F_v Corte
15	18	14	1.4	1.2

|| = compresión paralela al eje longitudinal.

⊥ = compresión perpendicular al eje longitudinal.

*La resistencia a la compresión perpendicular está calculada para entrenudos rellenos con mortero de cemento.

Tabla 2.

Valores de módulos de elasticidad Fuente: NSR-10. (AIS, 2010).

Módulos de elasticidad, E_i (MPa), CH=12%

Módulo promedio $E_{0,5}$	Módulo percentil 5 $E_{00,5}$	Módulo mínimo E_{min}
9.500	7.500	4.000

Tabla 3.

Coefficientes de modificación por contenido de humedad (c_m) Fuente: NSR-10. (AIS, 2010)

Esfuerzos		CH≤12%	CH=13%	CH=14%	CH=15%	CH=16%	CH=17%	CH=18%	CH≥19%
Flexión	F_b	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Tracción	F_t	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Compresión paralela	F_c	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Compresión perpendicular	F_p	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Corta	F_y	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Modulo de elasticidad	$E_{0,5}$	1.0	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.90
	$E_{00,5}$								
	E_{min}								

5. ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

Para la elaboración de los ensayos de contenido de humedad se siguió la metodología de NTC 5525, el ensayo se elabora calculando la pérdida de masa durante los ciclos de secado de forma progresiva. Se calculó el porcentaje del contenido de humedad de acuerdo a la siguiente ecuación:

Contenido De humedad Fuente: NTC 5525

$$CH = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (5.1)$$

En donde:

m = masa de la probeta antes del secado.

m_0 =masa de la probeta después del secado.

5.1. COMPARACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD (CH)

La guadua con menor contenido de humedad inicial fue la del municipio de Oiba (19%) CH, Las guaduas con mayor contenido de humedad fueron las de la Socorro, Santander (126%)CH, la guadua de Socorro- Santander incrementó su contenido de humedad de un 42% a 126% variando un 84%, fue la guadua que tuvo más variación en su CH. el menor cambio lo tuvo la guadua MADR con un incremento en el CH de 28%

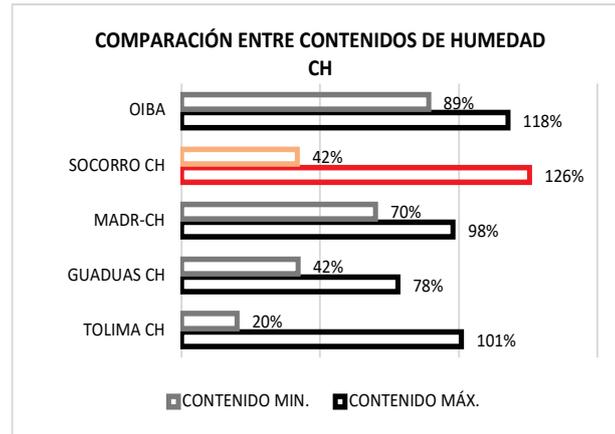


Figura 8. Comparación entre contenidos de humedad (CH). Fuente: Autor.

6. ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

Según lo indicado en la NTC 5525 aplicó una carga de 0.01 mm/s, a probetas con longitud igual al diámetro exterior de la guadua, debe garantizarse la aplicación uniforme de la carga de la probeta, para reducir la fricción se utilizaron placas de acero delgadas en los dos extremos de la probeta como se observa en la figura 9.

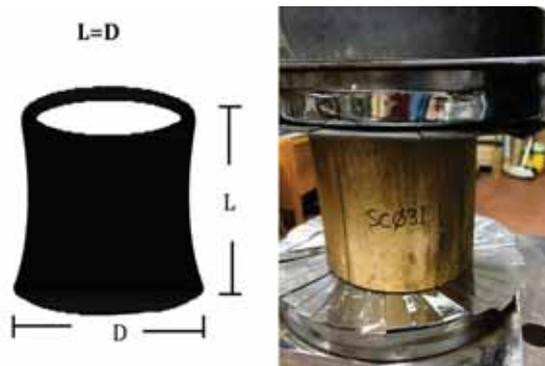


Figura 9. Montaje y dimensiones de la probeta para el ensayo de compresión paralela a las fibras.

Con el fin de hallar el módulo de elasticidad longitudinal (E) a compresión paralela a las fibras, a la mitad de las probetas del ensayo se les instaló una galga extensométrica ubicada en la mitad de su longitud para medir el acortamiento en el sentido longitudinal de las fibras. Los datos fueron recolectados por un adquisidor de datos Kyowa PCD-300 como se observa en la figura 10.

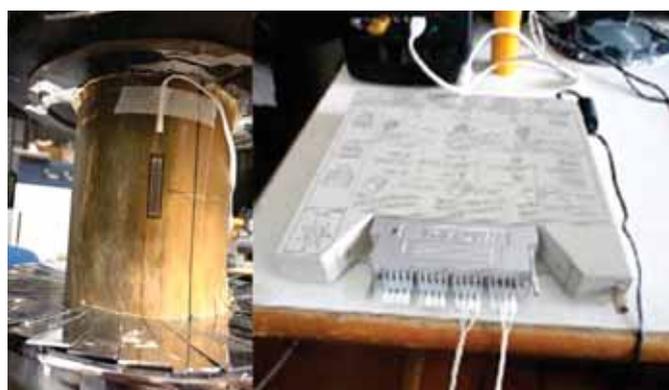


Figura 10. Equipos necesarios para el ensayo de Compresión paralela a las fibras.

Después de realizado el ensayo, se pudieron observar las fallas típicas de las probetas (figura 6-3), las cuales consisten en la separación de las fibras en los extremos superior e inferior de la probeta. Otro tipo de falla consiste en la aparición de fisuras verticales alrededor de toda la pared externa de la probeta.



Figura 11. Tipos de fallas típicas en el ensayo de Compresión paralela a las fibras.

6.1. ESFUERZO ULTIMO A COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

Para hallar el esfuerzo último de compresión paralela a las fibras se usó la siguiente ecuación tomada de la NTC 5525.

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A} \quad (6-1)$$

En donde

σ_{ult} = Esfuerzo último (MPa)

F_{ult} = Carga máxima de la probeta (N)

A = Área de la sección transversal de la probeta (mm²)

En comparación con investigaciones anteriores, la *Guadua angustifolia* Kunth de Socorro Santander sólo presenta un mejor comportamiento en el esfuerzo ultimo a compresión respecto a la Guadua de Oiba, Santander, que tiene un promedio de 22,86 MPa y un comportamiento más cercano a la guadua de Guaduas, Cundinamarca que tiene un promedio de 37,95 MPa.

Tabla 4. Comparación de resultados esfuerzo último a compresión paralela.

DATOS ESTADÍSTICOS	TOLIMA	GUADUAS	OIBA	SOCORRO
NÚMERO DE DATOS (N)	28	77	77	75
PROMEDIO (MPa)	45,99	37,95	22,86	33,62
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	8,04	5,59	8,21	6,95
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	17%	15%	36%	21%
PERCENTIL 5 (MPa)	34,80	29,43	6,56	23,52
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	31,69	2,10	5,83	22,02

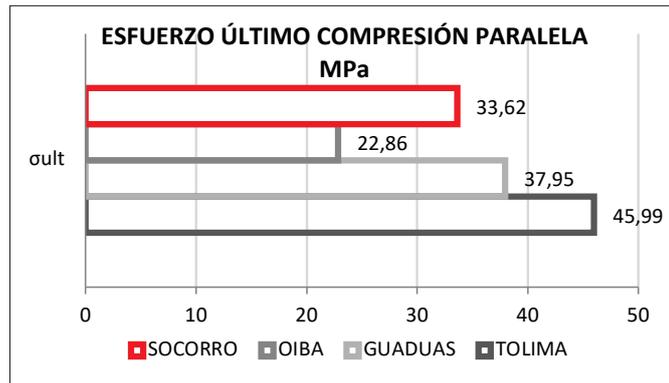


Figura 12. comparación entre regiones esfuerzo último compresión paralela.

6.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

Posteriormente a la obtención de los datos de desplazamiento (mm) y esfuerzo último (MPa), se calculó la deformación de la probeta y se halló el módulo de elasticidad para el esfuerzo a compresión paralela a las fibras, para esto se realizaron las gráficas de esfuerzo vs deformación para cada probeta y se calculó la pendiente de la recta tangente en el rango elástico del material según el procedimiento indicado en la NTC 5525.

En cuanto al módulo de elasticidad en el ensayo de compresión, para poder comparar los resultados con la NSR-10 se realizó el cálculo del módulo de elasticidad mediante las gráficas de esfuerzo vs deformación, los valores obtenidos fueron superiores a lo reportado en la NSR-10 que es de 9500 MPa, ver figura 13.

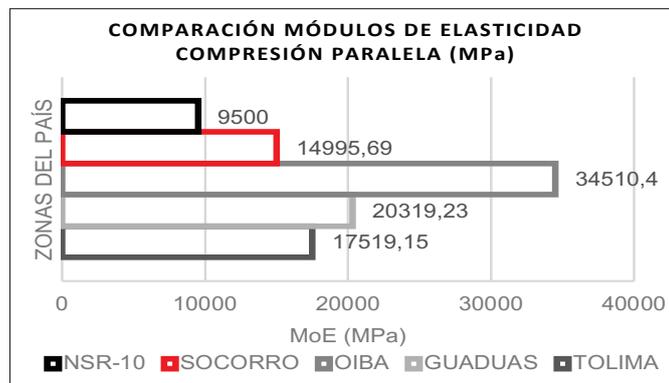


Figura 13. Comparación entre regiones módulo de elasticidad compresión paralela.

7. ENSAYO DE TENSIÓN PARALELA A LA FIBRA

Para la elaboración de este ensayo se realizó un montaje según lo descrito en la NTC 5525, en el cual se ejerce una carga de tensión constante a una velocidad de 0.01 mm/s por medio de unos sujetadores o mordazas, que garantizan la aplicación de dicha carga a lo largo del eje longitudinal de la probeta y eviten la torsión longitudinal de esta. Las probetas tienen una sección de 10cm, 5cm arriba y 5cm abajo del nudo, por una sección de 4 a 6mm, por el espesor de la pared de la guadua, los apoyos miden 25 mm en su zona de transición y 75mm en la zona a ser sujeta por la mordaza como se observa en la figura 14.

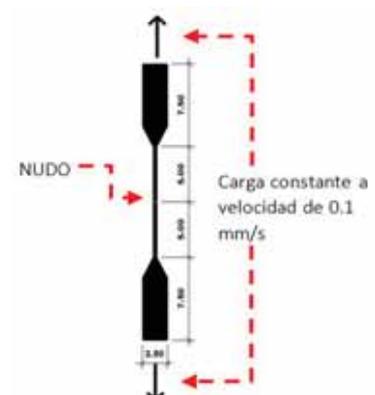


Figura 14. Dimensiones de las probetas para ensayo de Tensión paralela a las fibras.

Con el fin de determinar el módulo de elasticidad a tensión paralela de las fibras de la *Guadua angustifolia* Kunth, se instrumentó cada probeta con un extensómetro mecánico (figura 15). El extensómetro, marca Epsilon, se calibró para posicionarlo centrado en la sección de nudo de la probeta, este equipo se conectó al adquisidor de datos PCD-300 marca Kyowa.

La falla típica se produce causando una rotura en el centro de la probeta. La falla se manifiesta mediante el desprendimiento de las fibras en sentido diagonal hasta llegar a la otra cara. Esta falla se repite durante la totalidad de las probetas como se observa en la figura 15.



Figura 15. Tipos de fallas típicas en el ensayo de Compresión paralela a las fibras, montaje de extensómetro

7.1. ESFUERZO ULTIMO A TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

Para determinar el esfuerzo último a los ensayos de tensión paralela a las fibras, se toma como base la ecuación 8.1 extraída de la norma NTC-5525:

$$\sigma_{uc} = \frac{F_{ult}}{A} \quad (7.1)$$

En donde:

σ_{ult} = Esfuerzo último

F_{ult} = carga máxima soportada por la probeta

A = área de la sección transversal de la sección del ensayo.

En comparación del esfuerzo último a tensión, se observó que el valor característico de Tolima es el más alto (56,58 MPa), Socorro, Santander reportó el valor más bajo (22,73 MPa). Debido a que el contenido de humedad de las probetas a tensión paralela a las fibras de Socorro, Santander era mayor que el del resto de las investigaciones (125.54% CH). Se puede deducir que afectó el comportamiento de los ensayos, derivando en una resistencia menor al esfuerzo último. Ver figura 16

Tabla 5.

Comparación de resultados esfuerzo último a tensión paralela.

	TOLIMA	GUADUAS	OIBA	SOCORRO
NÚMERO DE DATOS (N)	36	67	75	73
PROMEDIO (MPa)	56.58	50,61	56.32	42,53
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	15.55	10,84	19.53	13,33
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	27.48%	21%	35%	31%
PERCENTIL 5 (MPa)	34.84	31,33	27	25,23
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	30.53	29,12	23.96	22,73

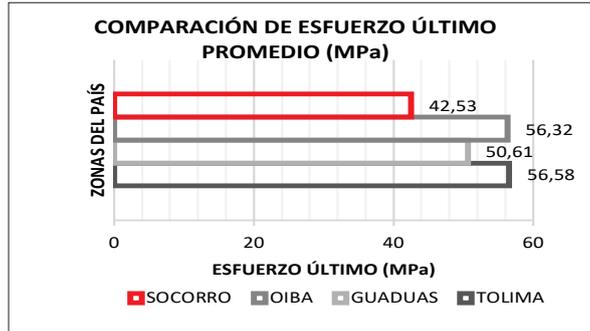


Figura 16. Comparación entre regiones esfuerzo último tensión paralela.

7.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD ENSAYO DE TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

En el ensayo de tensión paralela a las fibras, el mayor valor reportado fue el de Guaduas, Cundinamarca (19486,27 MPa), el menor valor fue el de Oiba, Santander (9425,19 MPa). Todos los valores sobrepasaron al valor reportado en la NSR-10 (9500MPa). Ver figura 17.

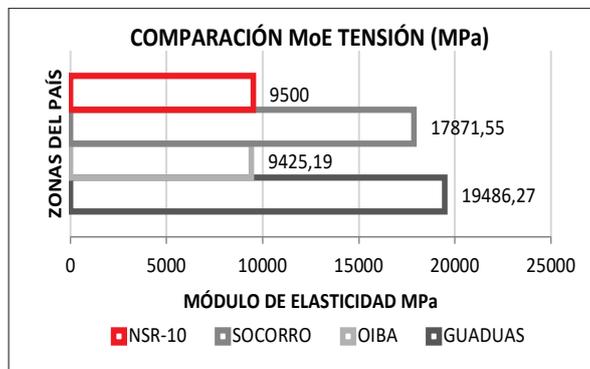


Figura 17. Comparación entre regiones módulo de elasticidad tensión paralela.

8. ENSAYO DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LAS FIBRAS

Para realizar este ensayo se utilizaron probetas de 17 cm de altura y sin nudo, estas se ubicaron en el centro del plato de carga hasta una posición de reposo natural y se les aplicó una carga pequeña para acomodar la probeta, finalmente se les aplicó una carga constante a una velocidad de 0.01 mm/s en el extremo superior como se observa en la figura 8-1, en las fallas típicas de las probetas, se generan fisuras en el sentido longitudinal, al interior en la parte superior e inferior y al exterior en las laterales.



Figura 18. Montaje y dimensiones de la probeta para el ensayo de compresión perpendicular a las fibras.

$$\sigma_{ucp} = \frac{3xD_e x F}{2xLxt^2} \quad (8-1)$$

En donde:

D_e = es el diámetro externo promedio de la probeta. (mm)

F = es la carga máxima aplicada (MPa)

L = es la longitud promedio (mm).

t = el espesor de pared promedio (mm).

8.1. ESFUERZO ULTIMO A COMPRESIÓN PERPENDICULAR

Para el esfuerzo ultimo a compresión perpendicular, los resultados obtenidos en la comparación arrojaron que la *Guadua angustifolia* Kunth procedente del municipio de Socorro tiene mejor comportamiento que la guadua de Oiba y Tolima, registrando un esfuerzo último promedio de 7.79 MPa similar al de Guaduas 7.81 MPa, zona que registró el mayor valor como se observa en la figura 19.

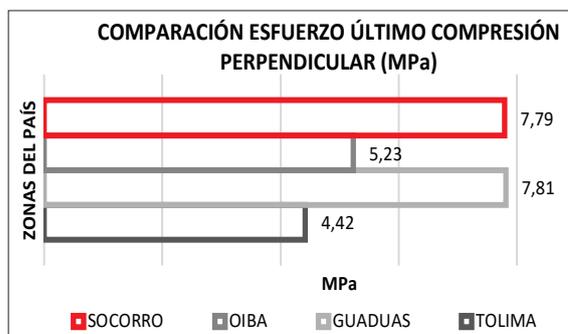


Figura 19. Comparación entre regiones esfuerzo último compresión perpendicular.

9. ENSAYO DE CORTE PARALELO A LAS FIBRAS

Para la elaboración de este ensayo se realizó el montaje siguiendo las indicaciones dadas en la NTC 5525, en el montaje se aplicó una carga constante a una velocidad de 0.01 mm/s. El montaje consistía en la ubicación de las probetas de igual diámetro y longitud, la mitad con nudo y la mitad sin nudo, ubicadas entre 2 placas con perforaciones opuestas mediante las cuales la probeta debía recibir la carga con la finalidad de producir la falla por corte, como se observa en la figura 20.

La falla de estas probetas se manifestó mediante fisuras verticales en los lugares donde estuvo apoyado el elemento. Ver figura 20.



Figura 20. Montaje y dimensiones de la probeta para el ensayo de corte paralelo a las fibras.

Para calcular el esfuerzo último a corte paralelo a las fibras se utiliza la siguiente ecuación tomada de la NTC 5525:

$$\sigma_{uv} = \frac{F_{ult}}{\sum(txL)} \quad (9.1)$$

En donde:

F_{ult} = es la carga máxima aplicada. (MPa)

t = es el espesor de pared en cada una de las cuatro áreas de corte. (mm)

L = es la altura de la probeta en cada una de las cuatro áreas de corte. (mm)

9.1. ESFUERZO ULTIMO CORTE PARALELO A LAS FIBRAS

En la comparación de resultados se observó que el mayor valor para el esfuerzo último lo obtuvo Guaduas, Cundinamarca (5.16 MPa), el valor de Oiba, Santander fue el más bajo (3,95 MPa). Ver figura 21.

Tabla 6.

Comparación de resultados esfuerzo último corte paralelo.

DATOS ESTADÍSTICOS	TOLIMA	GUADUAS	OIBA	SOCORRO
NÚMERO DE DATOS (N)	64	76	75	70
PROMEDIO (MPa)	4.46	7.57	3.95	7,82
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	1.13	1.38	1.15	1,37
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	25.31%	18%	29%	18%
PERCENTIL 5 (MPa)	2.69	5.47	2.06	5,49
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	2.46	5.16	1.87	5.18

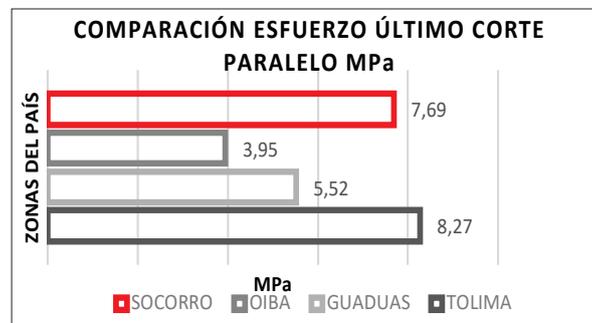


Figura 21. Comparación entre regiones esfuerzo último corte paralelo.

10. ENSAYO DE FLEXIÓN

Se ensayaron 12 probetas ante esfuerzo de flexión, las probetas fueron tomadas de la sección media de cada culmo, ya que por requerimiento de la NTC 5525 la longitud de la probeta debe ser 30 veces el diámetro de esta, lo que usualmente sobrepasa los 3m. de la sección superior y los 1.5 m. de la parte inferior. Para estos ensayos se requiere un montaje en el cual se debe aplicar una carga constante a velocidad de 0.5 mm/s en los tercios de la luz libre entre los dos apoyos. Tanto la carga como las reacciones se aplican en los nudos del culmo como se observa en la figura 22.

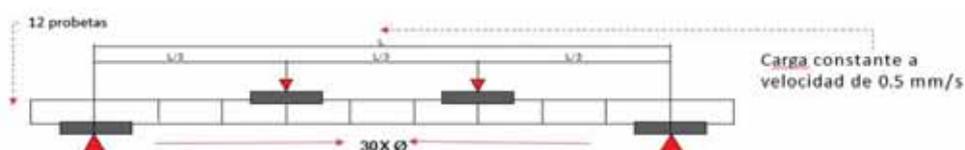


Figura 22. Montaje de la probeta para el ensayo de flexión.

Para todas las probetas se realizaron los ensayos usando un equipo LVDT en el centro de la luz del elemento para realizar la medición de la deflexión (δ) y luego el cálculo del módulo de elasticidad (E) a flexión.



Figura 23. Equipo LVDT.

La falla de la probeta, donde ocurre aplastamiento del elemento, además de rotura del nudo y rajaduras en dirección a las fibras.



Figura 24. Falla típica del ensayo de flexión.

El momento de inercia (I_B) se calculó usando la siguiente ecuación NTC 5525.

$$I_B = \frac{\pi}{64} (D^4 - (D - 2t)^4) \quad (10.1)$$

En donde:

I_B = Momento de inercia

D = Diámetro externo promedio.

T = Espesor de pared promedio.

10.1. ESFUERZO ÚLTIMO A FLEXIÓN

El esfuerzo último a flexión (σ_{uf}) se determinó usando la ecuación 10.2 tomada de la NTC 5525, que está en función del momento de inercia I_B de la ecuación 10.1

En donde:

$$\sigma_{uf} = FxLx \frac{D/2}{6} x \frac{1}{I_B} \quad (10.2)$$

σ_{uf} = Esfuerzo último del ensayo a flexión en MPa

F = Carga máxima aplicada.

L = Luz libre.

D = Diámetro externo.

Para el esfuerzo a flexión, en comparación con los resultados obtenidos en investigaciones previas para otras regiones del país se observa que la *Guadua angustifolia* Kunth procedente del municipio de Socorro tiene un esfuerzo último promedio de 68.39MPa, inferior al valor de 72,82 MPa del municipio de Guaduas, mientras que es mucho mayor al de Oiba que obtuvo un valor de 39 MPa.

Tabla 7.

Comparación de resultados esfuerzo último a flexión.

ESFUERZO ÚLTIMO				
	TOLIMA	GUADUAS CUNDINAMARCA	OIBA SANTANDER	SOCORRO SANTANDER
DATOS ESTADÍSTICOS	SECCIÓN MEDIA	SECCIÓN MEDIA	SECCIÓN MEDIA	SECCIÓN MEDIA
NÚMERO DE DATOS (N)	12	12	11	12
PROMEDIO (MPa)	38.88	72.82	39.81	68,39
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (MPa)	4.85	9.45	10.72	29,73
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	12.47	13%	27%	43%
PERCENTIL 5 (MPa)	33.9	60.42	28.18	27,63
VALOR CARACTERÍSTICO (MPa)	30.60	54.31	22	18.26

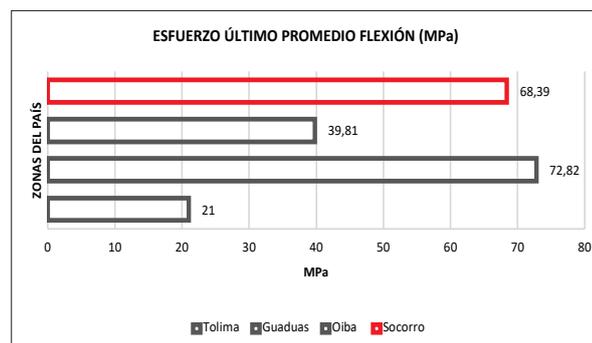


Figura 25. Comparación entre regiones esfuerzo último flexión.

10.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD ENSAYO DE FLEXIÓN

El módulo de elasticidad (E) a flexión se determinó usando la siguiente ecuación tomada de la NTC 5525.

$$E = \frac{23xFxL^3}{1296x\delta xI_B} \quad (10.3)$$

En donde:

E= Módulo de elasticidad

F = es la carga máxima aplicada.

L = es la luz libre.

IB= es el momento de inercia.

δ = es la deflexión en el punto medio de la luz.

En la comparación de los resultados obtenidos por las investigaciones para el módulo de elasticidad calculado en el ensayo de flexión, se observó que la *Guadua angustifolia* Kunth procedente del Tolima obtuvo el valor más alto (14933 MPa), Los resultados son bastante cercanos entre sí, todos los valores sobrepasan al valor otorgado por la NSR 10 que es de 90500 MPa como se observa en la figura 26.

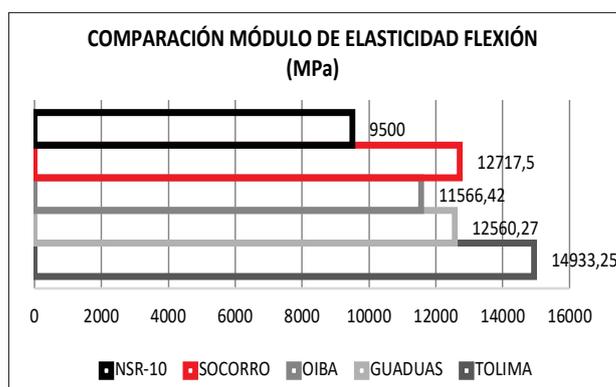


Figura 26. Comparación entre regiones módulo de elasticidad flexión.

11. ENSAYO DE DENSIDAD

Para la determinación de la densidad básica de la *Guadua angustifolia* Kunth, se siguieron los lineamientos establecidos en la NTC 5525, basada en el principio de la determinación de la masa mediante el pesaje y del volumen a través de la medición de sus dimensiones, para el cálculo de la masa por unidad de volumen de *Guadua angustifolia* Kunth.

$$\rho = (m/V) \times 10^6 \quad (11.1)$$

En donde:

ρ = es densidad, en Kg/m³.

m = es la masa de la probeta seca en horno, en g.

V = es el volumen húmedo (verde) de la probeta en mm³

Para la elaboración del ensayo de densidad se utilizaron los siguientes instrumentos como se observa en la figura 27.



Figura 27 Equipos utilizados para el ensayo de densidad.

Tabla 8 Resultados ensayo de densidad.

DATOS ESTADÍSTICOS	SECCIÓN INFERIOR	SECCIÓN MEDIA	SECCIÓN SUPERIOR	TOTAL
NÚMERO DE DATOS (N)	12	12	12	35
PROMEDIO (Kg/m ³)	547,95	522,58	551,98	545,98
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (Kg/m ³)	27,79	31,02	15,32	40,24
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	5%	6%	3%	7%

11.1. COMPARACIÓN DE ENSAYOS DE DENSIDAD

En comparación con los valores de densidad obtenidos para las zonas de Guaduas, Cundinamarca (620.47 kg/m³) y Oiba Santander, (531.26 kg/m³) se puede observar que la densidad entre Oiba y Socorro es similar, esto puede ser por la cercanía entre la localización de los municipios, factores como la temperatura y la altitud pueden influir en la guadua proveniente de estas zonas como se observa en la figura 28.

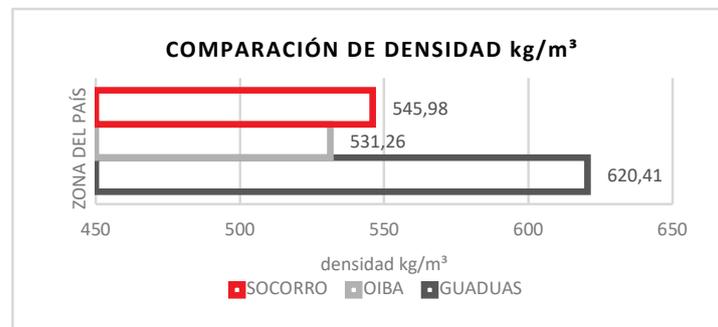


Figura 28. Comparación entre regiones densidad.

12. DISCUSIÓN

Durante la caracterización de la *Guadua angustifolia* Kunth de Socorro, Santander, se encontró que en la NSR 10 hay un apartado donde se indica que los ensayos realizados para el Título G se realizaron bajo un contenido de humedad de 12% CH, con el fin de poder comparar los resultados obtenidos en los ensayos, la Norma contiene unos coeficientes de modificación por CH, que deben aplicarse a los resultados de esfuerzo admisible y módulo de elasticidad, los valores de estos coeficientes se observan en la tabla 9. Por lo anterior es importante tener en cuenta los coeficientes de modificación por contenido de humedad par próximas caracterizaciones, este paso es muy importante para hacer un comparativo más acertado respecto a los valores especificados en la NSR-10. (Sánchez Escobar, 2018)

Tabla 9. Coeficientes de modificación por CH para esfuerzo admisible. Fuente NSR 10

Esfuerzos		CH≤12%	CH=13%	CH=14%	CH=15%	CH=16%	CH=17%	CH=18%	CH≥19%
Flexión	F _b	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Tracción	F _t	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Compresión paralela	F _c	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Compresión perpendicular	F _p	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Corta	F _y	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Módulo de elasticidad	E _{0,5}								
	E _{00,5}	1.0	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.90
	E _{min}								

Se recomienda revisar los valores especificados en la NSR-10 en cuanto a esfuerzos admisibles, ya que en los resultados de los ensayos casi ningún valor llega a los exigidos por la norma como se observa en la figura 29.

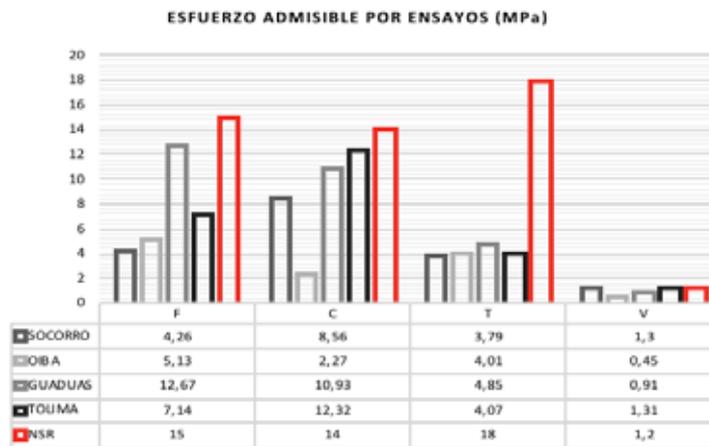


Figura 29. Resultados de Esfuerzos admisibles por ensayos y lugares.

Se debe plantear tanto un tiempo máximo de inmersión en agua de las probetas, así como existe un tiempo mínimo (dos semanas), ya que las probetas al ser de un material vegetal pueden descomponerse afectando la elaboración de probetas y ensayos.

Debido a los resultados heterogéneos que se obtuvieron en las investigaciones, es importante incluir en la NSR-10 los valores de esfuerzo admisible por departamentos y municipios, de esta forma se puede hacer una comparación más específica y con valores reales de las propiedades físico-mecánicas por cada zona del país

13. CONCLUSIONES

13.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

Se halló el contenido de humedad para cada probeta y se clasificó por ensayos, teniendo en cuenta que varía la geometría de la probeta en cada procedimiento. El Contenido de humedad CH, para los culmos obtenidos del Socorro Santander, varía entre las probetas con el menor contenido de humedad (flexión 41.75% CH) y las de tensión paralela tuvieron el mayor contenido de humedad (126.78% CH).

Comparando con los estudios realizados a la *Guadua angustifolia* Kunth de las regiones del Socorro Santander, MADR, Guaduas Cundinamarca y Tolima, la *Guadua angustifolia* Kunth del Socorro tiene el mayor contenido de humedad 126.78%, mientras que la de Guaduas tiene el menor contenido de humedad 41.43% como se observa en la figura 30.

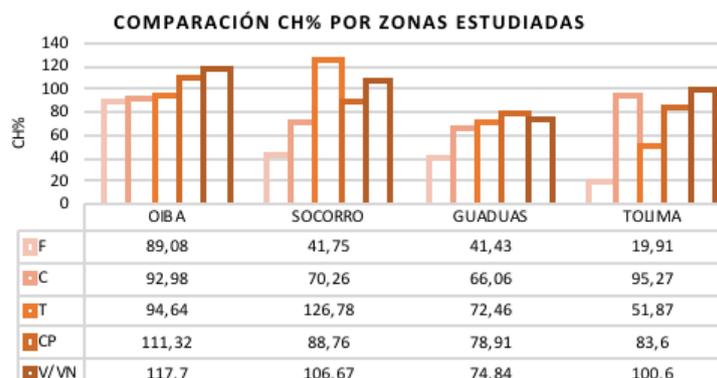


Figura 30. Comparación porcentaje mínimo y máximo de contenido de humedad entre regiones.

13.2. ENSAYO A FLEXIÓN

En comparación con los esfuerzos admisibles de Tolima, Guaduas-Cundinamarca y Oiba-Santander, Socorro Santander tiene el menor valor (4,26 MPa) y Guaduas Cundinamarca el mayor valor con (12,67 MPa), ninguno de los resultados supera el valor registrado en la NSR-10, los valores de todos los resultados fueron corregidos con los coeficientes de modificación para contenido de humedad.

En la comparación de los módulos de elasticidad, la guadua del Tolima obtuvo el mayor valor 13.439 MPa. El menor valor lo obtuvo la guadua de Oiba-Santander, con un valor de 10409,778 MPa. El valor reportado por la NSR-10 es de 9500 MPa como se observa en la figura 31.

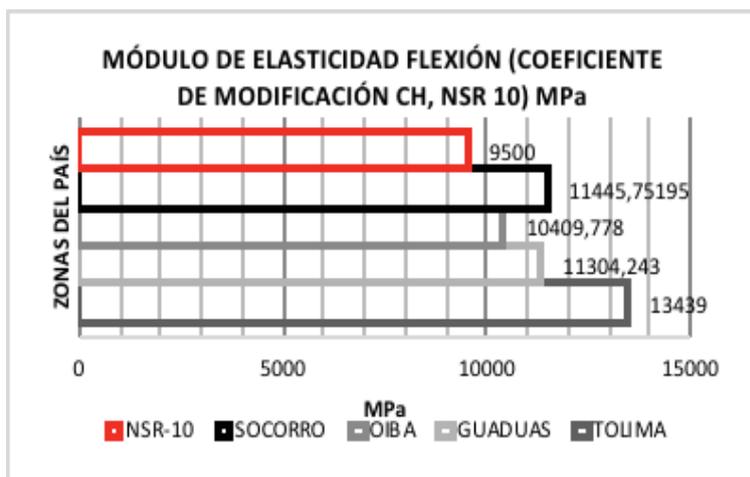


Figura 31. Comparación módulo de elasticidad flexión (coeficiente de modificación CH -NSR 10).

13.3. ENSAYO A COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

En comparación con los esfuerzos admisibles de Tolima, Guaduas-Cundinamarca y Oiba-Santander, Socorro Santander tiene el menor valor (2.27 MPa) y Tolima el mayor valor con (12.32 MPa), ninguno de los resultados supera el valor mínimo de la NSR-10 (14 MPa), los valores de todos los resultados fueron corregidos con los coeficientes de modificación para contenido de humedad.

En la comparación de los módulos de elasticidad Socorro Santander es el menor valor obtenido, el máximo valor lo obtuvo la guadua de Oiba-Santander, con 31059,36 MPa, como se observa en la figura 32.

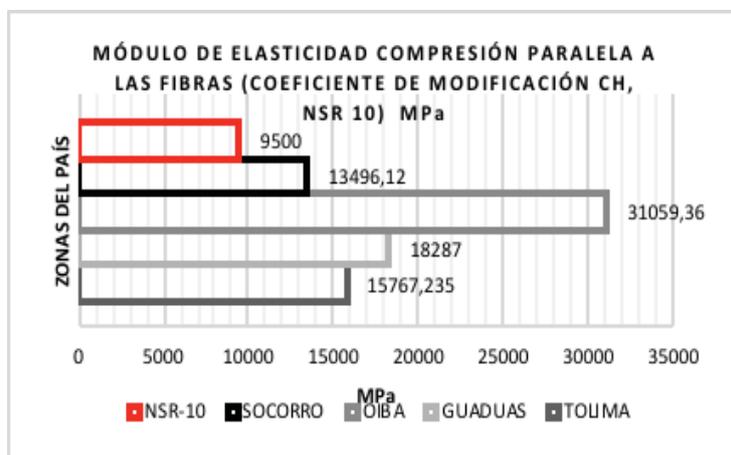


Figura 32. Comparación módulo de elasticidad compresión paralela a las fibras (coeficiente de modificación CH -NSR 10).

13.4. ENSAYO A TENSIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

En la comparación de los esfuerzos admisibles Socorro Santander tiene el menor valor (3.03 MPa) y Guaduas el mayor valor con (4.85 MPa), ninguno de los resultados supera el valor mínimo de la NSR-10 (18 MPa), los valores de todos los resultados fueron corregidos con los coeficientes de modificación para contenido de humedad.

En la comparación entre los módulos de elasticidad, Oiba-Santander es el menor valor 8482.671 MPa, el máximo valor lo obtuvo la guadua de Guaduas-Cundinamarca, con 17537.64 MPa, como se observa en la figura 33.

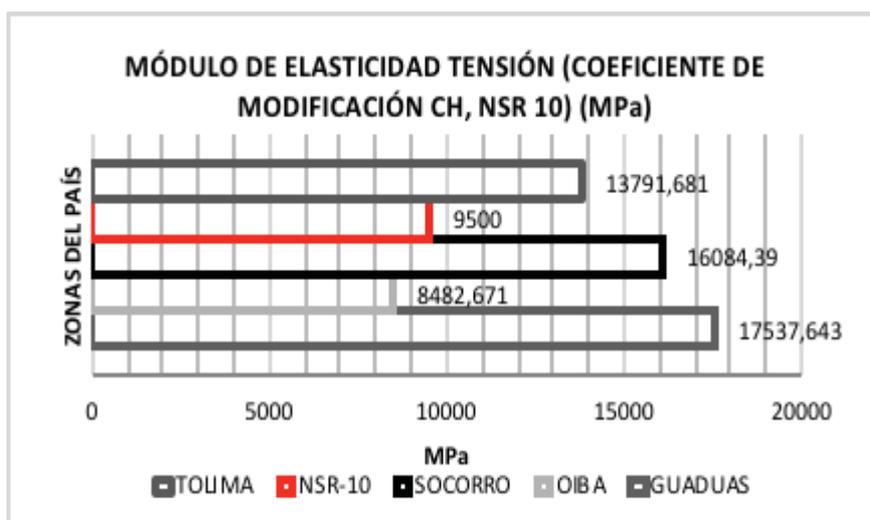


Figura 33. Comparación módulo de elasticidad tensión paralela a las fibras (factor de corrección CH -NSR 10).

13.5. ENSAYO A COMPRESIÓN PERPENDICULAR A LAS FIBRAS

En comparación con los esfuerzos admisibles de Tolima, Guaduas-Cundinamarca y Oiba-Santander, Oiba-Santander tiene el menor valor (0.66 MPa) y Guaduas el mayor valor con (1.89 MPa), Socorro-Santander ocupa el tercer lugar con 1.01 MPa.

13.6. ENSAYO DE CORTE PARALELO A LAS FIBRAS

En la comparación de los esfuerzos admisibles, Oiba-Santander tiene el menor valor (0.45 MPa) y Tolima el mayor valor con (1,31 MPa), Socorro-Santander ocupa el segundo lugar con 1,30 MPa. Los resultados de Socorro-Santander y Tolima son mayores que el valor especificado en la NSR-10 (1,40 MPa), los valores de todos los resultados fueron corregidos con los coeficientes de modificación para contenido de humedad.

13.7. ENSAYO DE DENSIDAD

Se realizó el ensayo de densidad siguiendo las indicaciones de la NTC 5525, tomando las medidas de espesores y secciones correspondientes, en la comparación de las investigaciones, se evidencia que el mayor valor es el de Guaduas- Cundinamarca (620,41 kg/m³) y el menor es el de Oiba-Santander (531,26 kg/m³). El resultado de Socorro (545,98 kg/m³) se encuentra en la mitad, siendo un valor más cercano al de Oiba- Santander, estos municipios son limítrofes y es probable que por la similitud en cuanto a altitud y temperatura presenten algunos valores cercanos, Lo que evidencia que las condiciones del territorio donde crece la *Guadua angustifolia* Kunth afectan su estructura y por ende su comportamiento.

REFERENCIAS

- AIS. NSR-10 (*Reglamento Colombiano De Construccion Sismoresistente*). , (2010).
- Ardila Pinilla, C. L. (2013). *Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú Guadua angustifolia Kunth del departamento de Tolima, Colombia*. 106. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/12616/>
- GarzónAponte, A. F. (2016). *Caracterización físico-mecánica de la guadua en el municipio de Guaduas- Cundinamarca*. 112.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC. NTC 5525. , (2007).
- MADR UNAL. (2010). *Validación de la Guadua angustifolia como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles*.
- Moreno, L. E., Osorio, L., & Trujillo, E. E. (2006). Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *Guadua angustifolia*. *Ingeniería y Desarrollo*, (20), 125–133.
- Narváz Estefan, S. (2017). *Caracterización de las propiedades físico - mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth del municipio de Oiba, Santander*. 129. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/57366/>
- Rodríguez, W. (2007). *Análisis del comportamiento de la producción y comercialización de la guadua y su efecto económico y social en el departamento de Santander*. 1–69. Retrieved from http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/10185/12119/1/T10.07_R618a.pdf
- Sánchez Escobar, L. C. (2018). *Caracterización de las propiedades físico-mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth del municipio de Socorro, Santander-Colombia* (Universidad Nacional de Colombia). Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/71484/7/LauraCatalinaSánchezEscobar.2018.pdf>
- Takeuchi, C. P., & González, C. E. (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería y Universidad*, 11(1), 89–103. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100005>

Sistema constructivo con *Guadua aculeata* para la producción social de la vivienda.

Construction system with *Guadua aculeata* for the housing social production

Alvaro Hernández Santiago⁽¹⁾
Diego Torres Hoyos⁽¹⁾

⁽¹⁾ Facultad de Arquitectura,
Universidad Veracruzana, Poza Rica,
Veracruz, México.
alvahernandez@uv.mx
dtorres@uv.mx

Recibido: 7 de Julio, 2019
Aceptado: 10 de Noviembre, 2019

Doi: <http://dx.doi.org/10.24133/ciencia.v22i1.1290>

"THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED."

RESUMEN

Se presentan resultados de la investigación básica, sistema de uniones y construcción de prototipo de vivienda rural con *Guadua aculeata*.

La investigación básica contempla: a partir de la selección y corte, bajo los procedimientos de Montoya, (2006); Cruz Ríos, (2013); Preservado con sales de boro, evaluación de la penetración y retención con los procedimientos de MAVDT, (2010); Posada Giraldo, (2015) y Pérez Cruz, (2018); Secado, bajo los procedimientos de Montoya A. (2006); ISO 22157-1 (2004).

Los ensayos mecánicos en uniones se incluyeron a la *Guadua angustifolia*, normas NSR-10, ASTM D176 e INECOL (2017), contrastando resultados, se obtuvo contenido de humedad y densidad relativa.

En la segunda fase se construye un prototipo de vivienda rural, el proceso constructivo inicia a partir del acopio del material, acondicionamiento, producción de derivados, trabajos preliminares, sistema estructural, prefabricación de armaduras, colocación, cubierta, entrepiso, muros y acabados.

Se concluye que, los resultados obtenidos de las experimentaciones, permiten obtener modelos de predicción como una herramienta práctica que facilita el trabajo de los usuarios en la construcción de sistemas arquitectónicos. El sistema constructivo comprende desde la selección hasta su aplicación como elemento estructural y recepción de elementos secundarios que conforman las limitantes del espacio, la *G. aculeata* presenta excelentes condiciones para la producción social del hábitat.

Palabras clave:

Guadua aculeata, sistema constructivo, hábitat, investigación básica, uniones

ABSTRACT

Results of the basic research, union system and prototype construction of rural housing with *Guadua aculeata* are presented.

The basic research contemplates: from the selection and cutting, under the procedures of Montoya, (2006); Cruz Ríos, (2013); preserved with boron salts, evaluation of penetration and retention with MAVDT procedures, (2010); Posada Giraldo, (2015) and Pérez Cruz, (2018); dried, under the procedures of Montoya A. (2006); ISO 22157-1 (2004).

The mechanical trials in joints were included in the *Guadua angustifolia*, NSR-10, ASTM D176 and INECOL (2017), contrasting results, moisture content and relative density were obtained.

In the second phase a prototype of rural housing was built, the construction process starts from the collection of the material, conditioning, production of derivatives, preliminary work, structural system, prefabrication of reinforcement, placement, roof, mezzanine, walls and finishes.

It is concluded that, the results obtained from the experiments, allow to obtain prediction models as a practical tool that facilitates the work of users in the construction of architectural systems. The construction system includes from the selection to its application as a structural element and reception of secondary elements that make up the limitations of the space. *Guadua aculeata* presents excellent conditions for the social production of the habitat.

Key words:

Guadua aculeata, constructive system, research, basic, prototype.

1. INTRODUCCIÓN

En México el bambú de la especie *Guadua aculeata* (tarro), como material de construcción ha sido utilizado desde tiempos prehispánicos, investigaciones arqueológicas demuestran su uso en actividades cotidianas, en la construcción de viviendas en forma rolliza y en reglillas con el sistema de bajareque (INFONAVIT, C. P. (1999). En general los bambúes tienen grandes beneficios ambientales: productor de oxígeno, biomasa, retenedor de CO₂, regenerador de suelos, por su rápido crecimiento útil en la reforestación y para detener la erosión de suelos de márgenes de ríos y arroyos. La *Guadua aculeata* es un material sustentable con ventajas sobre otros materiales naturales, reemplaza con éxito a la madera y materiales convencionales, su resistencia y menor energía en su obtención lo hacen el material de menor valor en lo referente a su eco-coste (Morán Ubidia, J. A. S/F). Con características como: diámetros de 20 cm, longitud utilizable de 18 m, entrenudos desde 23 cm hasta 60 cm, espesores de pared de 3 cm en la parte baja y 7mm en la parte alta, rápido crecimiento y propiedades mecánicas importantes.

Las propiedades mecánicas identificadas lo hacen un material apto para construcción Ordoñez Candelaria, V. R., & Bárcenas Pazos, M. G. (2014); Ordoñez., M. e. (2012); y Zaragoza, Hernández, I. (2012). comparado con otros materiales tiene ventajas de resistencia mecánica. El uso estructural de la *Guadua aculeata*, se realiza de manera pragmática, el desconocimiento de las condiciones previas al uso del material genera incertidumbre, los riesgos imprevisibles y los daños por el tiempo no pueden ser controlados. La sección cónica, la variabilidad de las secciones, las deformaciones en el eje central longitudinal, dificulta el proceso de ensamblaje de los diferentes elementos de la estructura y no permite la estandarización del proceso de construcción.

El sistema constructivo integra en la primera fase la investigación básica de la *Guadua aculeata*, como la generación del conocimiento necesario sobre el material, la definición o identificación de las condiciones adecuadas para ser usado como material estructural, a partir de la selección y corte con la medición del contenido de humedad. La

preservación por medio de soluciones a base de sales de boro por el método de inmersión difusión, su evaluación por penetración y retención en EAB/m³ (equivalente de ácido bórico). El secado por métodos naturales a intemperie, en diferentes regiones geográficas y épocas del año.

Los sistemas de unión con pernos, tienen ventajas estructurales comparados con las uniones artesanales, las cuales dificultan el proceso y se prolonga el tiempo de construcción.

Los antecedentes para el estudio del sistema de uniones, están establecidos en Colombianas, Normas Técnicas NTC. (2010). Los valores de diseño para uniones empernadas tipo “P”, (tensión paralela a la fibra, “Q” (tensión perpendicular a la fibra) y “T” (compresión perpendicular a la fibra) figura 1.

La segunda fase del sistema constructivo, corresponde a la aplicación de los conocimientos generados en la investigación básica, aplicados en la construcción de un prototipo de vivienda rural, integrando los procedimientos constructivos a partir de la cimentación, anclajes, fijación, relleno de entrenudos con mortero, prefabricación del sistema estructural, sistema de uniones a diferentes esfuerzos mecánicos con pernos de 3/8 plg y 1/2 plg, con mortero y sin mortero, sistema estructural de entrepiso, estructura de cubierta, muros y acabados.

Se presentan los resultados de las experimentaciones realizadas de la investigación básica de la *Guadua aculeata*: determinación del contenido de humedad al momento del corte por el método gravimétrico en las cuatro fases lunares en época de lluvias y de secas en un año, la evaluación de la solución preservante mediante la medición de la penetración por la aplicación de soluciones reveladoras ante la presencia de las sales de boro, medición de la retención de la solución preservante de sales de boro EAB/m³, por el método de la Azometina H y espectrofotometría, determinación de la velocidad de secado con la medición de la variable contenido de humedad en periodos de tiempo establecidos. Ensayos de tipos de unión, a tensión paralela a la fibra “P”, tensión perpendicular a la fibra” Q” y compresión perpendicular a la fibra “T”, rellenos con mortero en el entrenudo y sin relleno, con pernos de 3/8 plg y 1/2 plg, de las especies *Guadua aculeata* y *Guadua angustifolia*.

Los resultados de la segunda fase; la construcción del prototipo de vivienda rural, desde la extracción de los tallos hasta los acabados interiores. Los tallos utilizados para las experimentaciones de la investigación se colectaron en guaduales de crecimiento natural, la selección, corte y madurez bajo los lineamientos establecidos Morán Ubidia, J. A. (S/F); Cruz Ríos, H. (2013) y Londoño, X. (2005). Los de *G. angustifolia* de plantaciones en el municipio de Hueytamalco, Puebla y la *Guadua aculeata* del centro experimental “Las Margaritas” del INIFAP. El material de ensayo se utilizó en condición seca (CH < 19%), colombianas, N. T. (2010); Morán Ubidia, J. A. (S/F); Montoya Arango, J. A., & Jiménez Arias, E. (6 de enero de 2006), NTC 5301, preservado con sales de boro Peña V., L., Burgo s., A., González F., A., & Will Valero, S. (julio de 2009).

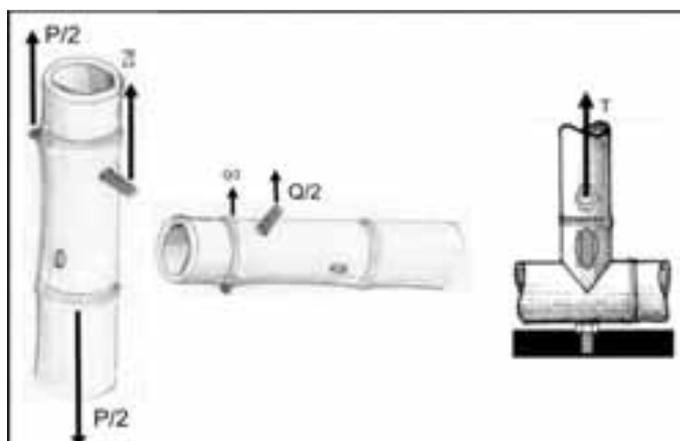


Figura 1. Uniones empernadas “P”, “Q” y “T”. Tomadas de la Norma Colombiana NSR 10 Capítulo G12 estructuras de Guadua p.G-127.

Para este estudio el concepto de sistema constructivo se estableció como un conjunto de elementos, técnicas y procedimientos para la construcción de viviendas con *Guadua aculeata*, que integrados dan orden y sentido funcional.

Las experiencias en la construcción del prototipo de la vivienda rural permitieron establecer los procedimientos constructivos (técnicas) en todas sus etapas, contrastar el cumplimiento de las necesidades funcionales del sistema, las cualidades de los materiales, su producción, vulnerabilidad y la eficiencia del diseño del proceso constructivo.

La prefabricación del sistema estructural, diseñado con elementos que atendieron a exigencias funcionales estructurales con una geometría racional modulada, redujo el tiempo de los procesos constructivos por facilidad del montaje y reducción de mano de obra especializada.

La producción de materiales para la construcción del prototipo es producto de las experimentaciones del proceso de acondicionamiento de la *Guadua aculeata* para uso estructural.

La construcción del prototipo de la vivienda representa la etapa final de la investigación realizada, concentra los resultados de las experimentaciones con *aculeata* para determinar las condiciones previas al uso.

2. METODOLOGÍA

2.1. LA INVESTIGACIÓN BÁSICA.

2.1.1. SELECCIÓN Y CORTE.

Comprende la generación del conocimiento necesario sobre el material, para ser usado como material estructural. Todas las muestras fueron extraídas en tres guaduales distintos, identificadas de manera inequívoca “recias” o “maduras” según criterio de observación Morán Ubidia, (s/f); Cruz Ríos, (2013). Los tallos se cortaron en el sitio durante cada fase lunar. Se realizaron dos cortes en dos periodos lunares, se cortaron dos rodajas de 5 cm de altura de las partes baja, media y alta de 6 tallos extraídos, con un metro de separación entre corte y corte, 36 muestras por fase lunar, con un total de 360 muestras en los dos periodos. Se midió el Chi (contenido de humedad inicial) a cada muestra por el método gravimétrico (Montoya, 2006). Se pesaron para obtener su peso inicial (PI), posteriormente se secaron a temperatura ambiente bajo sombra, se introdujeron al horno de secado durante 48 horas a temperatura $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, obteniendo su peso anhidro, (0 % CH). Con los valores obtenidos, se determinó el Chi en porcentaje.

2.1.2. LA PRESERVACIÓN.

Se utilizó el método de inmersión-difusión, una solución química hidrosoluble, a base sales de boro como tratamiento para prevenir o contrarrestar la acción de alguno o varios tipos de organismos que destruyen o afectan la integridad de la guadua, las proporciones corresponden a MAVDT, (2010); ICONTEC, (2006); y NTC, (5301). Es incolora e inodora, de baja toxicidad para los mamíferos, efectiva y económica, mientras no esté expuesta a altas humedades y se encuentre protegida por los rayos del sol (Turner, 2008) y (Peña y González, 2009).

El diseño experimental fue de tres niveles de altura en el tallo (baja, media y alta); tres niveles de concentración de la solución preservadora (4 %, 5 % y 6 %); y tres periodos (4, 5, y 6 días) con tres repeticiones por nivel, en total 81 muestras de 1.5 m de longitud, de las cuales se obtuvieron las rodajas de 5 cm de altura, 81 muestras para la penetración, 81 muestras para retención, 81 muestras para la densidad y 81 para CH. Una vez preservadas se colocaron a la intemperie para secarlas por medios naturales, hasta bajar el CH a menos del 19 %.

La evaluación de la penetración de la solución preservante con sales de boro, fue con el método de (Erdoiza y Echenique, 1980), con indicadores de la retención de EAB alcanzada en el material preservado: un rojo brillante

puede contener ≥ 1.28 kg/m³, el rojo marrón a amarillo marrón puede contener @ 0.96kg/m³, y el amarillo @ 0.32 kg/m³ (FAO, 1986).

Para determinar la retención de las SB en kg/m³ EAB, se aplicó un método cuantitativo, espectrofotométrico para boro (B) mediante la formación de un complejo coloreado con Azometina H de acuerdo con lo descrito por Pérez Cruz, (2018) y Ponce, D. L. (2010).

2.1.3. PROCESO DE SECADO.

La experimentación se realizó en dos épocas; de lluvias y secas y dos ambientes geográficos, la selección de las muestras por el mismo procedimiento para todas las experimentaciones, las muestras con una longitud de 6m y diámetros diversos, se realizaron cortes transversales en rodajas de 5 cm de altura en las partes baja y alta de cada tallo en diferentes periodos, establecidos de acuerdo a la norma ISO 22157-1 (2004), numeral 6 y la norma DIN 52 183 (citada en Montoya Arango & Giménez Arias, 2006. Se midió el contenido de humedad por el método gravimétrico registrando los valores obtenidos hasta lograr reducir hasta menos del 18% para ser usado como material estructural (GOCDMX, NTC 2017).

2.1.4. SISTEMA DE UNIONES.

Se prepararon muestras con la calidad establecida en las normas, longitud de un entrenudo más 20 cm de cada extremo. Los ensayos fueron realizados con los procedimientos de la norma colombiana, título G, NSR-10, capítulo G12: distancia al nudo 50 mm, distancias mínimas del perno al extremo y dimensiones de arandelas. Complementándose con la norma ASTM D1761: la distancia entre las reacciones es 300 mm, superando los tres diámetros en la mayoría de los ensayos. Velocidad de carga (0,9 mm/min), en una máquina universal de pruebas. Se realizaron 144 ensayos, 108 con *Guadua aculeata* y 36 con *Guadua angustifolia*; Tensión paralela a la fibra "P", tensión perpendicular a la fibra "Q" y compresión perpendicular a la fibra "T". 72 ensayos tipo "P" "Q" y "T" con mortero y sin mortero con *G. aculeata* con perno de 3/8", colocados a 5 cm del nudo, 18 con mortero con perno de 1/2", 18 sin mortero con perno de 1/2". 36 ensayos con *G. angustifolia* tipo "P" "Q" y "T" con y sin mortero con perno de 1/2" colocados a 5 cm del nudo.

2.1.5. SISTEMA CONSTRUCTIVO.

La construcción del prototipo representa la parte final de la investigación e integra los resultados de las experimentaciones de la investigación básica y los resultados del proceso constructivo en sus diferentes etapas. La producción del material, selección y corte, con la metodología generada producto de las experimentaciones realizadas, con las condiciones de madurez según Morán Ubidia, (s/f) y Cruz Ríos, (2013). El preservado se realizó por el método de difusión-inmersión con sales de boro al 6% y durante 6 días, derivado de las experimentaciones realizadas y la NTC (5301); Peña, (2009). El secado bajo sombra y a la intemperie se realizó una vez que fueron extraídos de la piletta de preservación, colocados verticalmente para el escurrimiento del exceso de preservante, se rotaban cada 8 días, se pesaban y media el CH en periodos de tiempo establecidos (Montoya, 2006).

La prefabricación de armaduras, con uniones a tensión paralela a la fibra y tensión perpendicular a la fibra derivadas de las experimentaciones en el sistema de uniones, el trazo y armado en el sitio con sistemas geométricos básicos, las uniones con pernos de 3/8pulg y 1/2pulg, con mortero y sin mortero. La construcción del sistema estructural inicia con el izado y colocación de las armaduras en cada eje estructural, colocación de postes, vigas longitudinales entre armaduras, riostras diagonales entre postes y entre armaduras, elementos de unión entre armaduras en la cubierta, las uniones se estabilizan dependiendo del esfuerzo actuante, con pernos y rellenos de mortero. La construcción del entrepiso, cubierta y muros, así como el anclaje con los procedimientos establecidos en (MAVDT, 2010). La producción de reglilla y esterilla, fue determinada por las experimentaciones realizadas previamente, posteriormente preservadas y secadas según Turner, (2008); Peña y González, (2009) y Montoya, (2006).

3. RESULTADOS

3.1. SELECCIÓN Y CORTE.

Los contenidos de humedad obtenidos por fase lunar presentaron una gran variabilidad en los dos periodos de lluvias y de secas, la diferencia entre los promedios de cuarto menguante es de 46.3 %, en luna nueva es de 6.9 %, en cuarto creciente es de 23 %, en luna llena es de 25.2 %. El segundo registro de cuarto menguantes fue de 5.6 %. En la época de lluvias el menor contenido de humedad se obtuvo en el cuarto menguante y luna llena, en la época de secas en luna llena y cuarto creciente Tabla 1.

Tabla 1.

Resumen de resultados promedio de contenido de humedad inicial de muestras de *G. aculeata* de la región de Hueytamalco, Puebla, por fase lunar, periodos 2017-2018. Fuente: elaboración propia.

Ubicación	Periodo	Clave	Cuarto menguante	Luna nueva	Cuarto creciente	Luna llena	Cuarto menguante
Guadual 2	Mayo-junio 2017	1	116.5	90.5	108.2	105.8	94.6
		2	89.2	159.9	110.6	102.0	108.5
		3	103.3	121.4	97.6	102.1	109.3
Guadual1		4	91.8	83.9	95.3	90.6	112.9
		5	101.8	101.5	100.3	87.5	94.8
		6	78.8	92.2	110.6	93.7	115.6
Promedio			96.9	108.2	103.8	96.9	106.0
Palmatita	Febrero-marzo 2018	1	117.2	128.3	61.8	55.1	102.1
		2	185.7	159.4	79.2	92.0	144.6
		3	130.0	78.1	67.5	83.6	90.4
		4	127.1	112.8	67.2	78.1	84.0
		5	134.9	104.5	102.1	63.8	86.6
		6	164.7	108.0	105.8	57.5	94.1
Promedio			143.3	115.2	80.6	71.7	100.3

3.2. EVALUACIÓN DE LA PRESERVACIÓN.

En general se observa que la penetración fue en todo el espesor de las muestras, la parte interna del tallo se tornó a un color rojo brillante, lo que indica que existe una mayor concentración de sales de boro, sobre todo en las muestras de la parte baja de los tallos, se puede explicar porque en la parte interna de la pared de los tallos, hay una menor cantidad de fibras, esta cantidad aumenta hacia al exterior del tallo. En varias muestras se observa un color café rojizo, en otras se observa en la parte próxima a la externa un color café amarillento figura 2.



Figura 2. Resultados de la evaluación penetración y presencia de SB, al 4 %, en 4,5 y 6 días en las partes baja, media y alta del tallo, preservadas con SB por inmersión-difusión. *G. aculeata* de la región de Hueytamalco, Puebla.



Figura 3. Resultados, detalle de penetración-presencia de SB, concentración al 4 % en 4 días, partes baja, media y alta del tallo, preservadas por inmersión-difusión. *G. aculeata* de la región de Hueytamalco, Puebla.

En resumen, del total de las 81 muestras se identificaron siete muestras que representan el 9 %, que alcanzaron penetración irregular café amarillento PTIA, con un estimado de 0.20 % EAB, las once que representan el 14 %, con penetración total regular PTR rojo brillante, con un estimado de .30 % EAB y las 63 que representan el 77 % con penetración total irregular PTI café rojizo con un estimado de 0.25 % EAB, por encima de lo que establece la (FAO, 1986) figura 3.

La retención de las SB es equivalente a la absorción neta que se expresa en kg/m3. Los resultados promedio obtenidos se presentan en la Tabla 2 separados por niveles: altura del tallo, concentración de la solución preservadora y periodos de inmersión, se consideran dos resultados el primero con un g de material analizado EAB y el segundo el mismo material escalado al volumen del material tratado con la incorporación de la densidad básica (DB), EAB.

Por periodos de inmersión el mayor promedio obtenido de retención de SB fue a los 6 días con 3.01 kg/m3, a los 4 días con 2.88 kg/m3 y finalmente a los 5 días con 2.24 kg/m3. Los resultados obtenidos son superiores a lo que establece la (FAO, 1986).

Tabla 2.

Retención en las muestras de sales de boro en kg/m3 EAB, en las partes del tallo (baja, media y alta), concentraciones de sales de boro en la solución preservadora (4 %,5 % y 6 %), y tres periodos de inmersión (4,5 y 6 días), *G. aculeata* de la región de Hueytamalco, Puebla.

EAB* cálculos obtenidos por (Cruz Pérez, 2018), EAB** cálculos obtenidos por el autor.

Parte del tallo	Concentración de la solución (% de SB)	Inmersión	EAB*	Concentración de B	B	Densidad básica (DB)	EAB**	
		Días	kg/m3	mg/kg	kg/kg	kg/m3	kg/m3	
Baja	4	4	2.20	2200	0.0022	522	1.15	
		5	1.00	1000	0.0010	490	0.49	
		6	5.10	5105	0.0051	509	2.60	
	5	4	2.03	2030	0.0020	510	1.04	
		5	1.40	1400	0.0014	478	0.67	
		6	1.10	1104	0.0011	509	0.56	
	6	4	4.24	4241	0.0042	546	2.32	
		5	3.21	3210	0.0032	564	1.81	
		6	1.08	1080	0.0011	544	0.59	
	Media	4	4	1.31	1310	0.0013	558	0.73
			5	2.01	2010	0.0020	600	1.21
			6	2.02	2015	0.0020	611	1.23
5		4	6.52	4410	0.0044	583	2.57	
		5	4.41	3300	0.0033	618	2.04	
		6	6.63	6636	0.0066	528	3.51	
6		4	1.70	1701	0.0017	598	1.02	
		5	1.12	1120	0.0011	589	0.66	
		6	2.21	2212	0.0022	591	1.31	
Alta		4	4	2.10	2100	0.0021	594	1.25
			5	1.46	1460	0.0015	657	0.96
			6	3.15	3150	0.0032	589	1.86
	5	4	3.30	3300	0.0033	607	2.00	
		5	4.56	4565	0.0046	644	2.94	
		6	4.67	4670	0.0047	589	2.75	
	6	4	2.28	2250	0.0023	689	1.55	
		5	1.00	1005	0.0010	610	0.61	
		6	1.10	1105	0.0011	616	0.68	

Los resultados promedio con relación a la altura del tallo, son contrarios al supuesto de mayor densidad menor retención. A mayor concentración de SB, mayor retención y con mayor tiempo de inmersión mayor retención.

3.3. EL SECADO POR MEDIOS NATURALES A INTEMPERIE.

Las experimentaciones realizadas en la ciudad de Xalapa, arrojaron el tiempo de secado para el periodo octubre 2016-febrero 2017 el promedio de contenido de humedad obtenido en la primera medición fue de 71.1%, a los 21 días de 45.3%, a los 42 días de 27.1%, a los 62 días de 19.3%, a los 103 días de 19.1% y a los 125 días fue de 16.5% de CH. En la ciudad de Papantla, en el periodo septiembre 2016-enero 2017, en la primera medición se obtuvieron CH en promedio de 75.1%, a los 21 días de 39%, a los 40 días de 13.2%, a los 64 días de 19.6%,

a los 84 días de 17.1% a los 105 días de 15.6% y a los 132 días de 12.2%. En contraste durante el secado en el periodo de marzo a mayo en Papantla en Chi fue de 71% y en 56 días alcanzó un CHE de 16.88 %. Con estos resultados se denota claramente el efecto de la temperatura y la humedad sobre el secado al aire libre, puesto que entre septiembre y febrero es más frecuente la precipitación pluvial y más baja la temperatura, mientras que entre marzo y mayo es escasa la precipitación pluvial, con mayor número de días no nublados y empieza a elevarse la temperatura.

En la figura 4 se presenta un modelo de predicción para calcular el CH al 19% establecido en GOCDMX, NTC. (2017). en la ciudad de Xalapa se identifica a los 64 días, en Papantla en el mismo periodo a los 56 días, en Papantla en el periodo marzo-mayo a los 28 días.

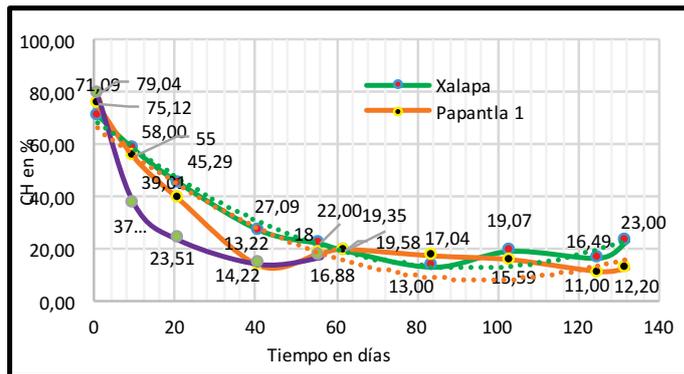


Figura 4. Comparación entre los tres procesos de secado de tallos de *G. aculeata* de la región de Hueytamalco, Pue. Xalapa octubre 2016 febrero 2017 y Papantla, Ver., septiembre 2016 febrero 2017 y marzo-mayo 2017.

3.4. SISTEMA DE UNIONES.

Los resultados en el sistema de uniones con *G. angustifolia* sin mortero y perno de 1/2" registran un incremento respecto a las uniones con *G. aculeata* con las mismas características. 77% para tensión paralela (P), 79.6% para compresión perpendicular (T) y 39.6% para tensión perpendicular a la fibra (Q). Las cargas máximas registradas en uniones tipo "P", "Q" y "T" sin mortero y perno de 1/2", en *G. aculeata*, comparadas con la *G. angustifolia*, denotan una diferencia importante, la cual se encuentra relacionada con el incremento del diámetro y el espesor de pared. El 4%, 10% y 12% para el diámetro y 37%, 33% y 38% para el espesor de pared, figura 5. Con mortero y perno de 1/2" el incremento para tensión paralela (P) es de 7.6%, en compresión perpendicular (T) la *G. aculeata* supera ligeramente a la *G. angustifolia*, en tensión perpendicular (Q) las uniones con *G. aculeata* superan a las con *G. angustifolia* en 17.3%, figura 6.

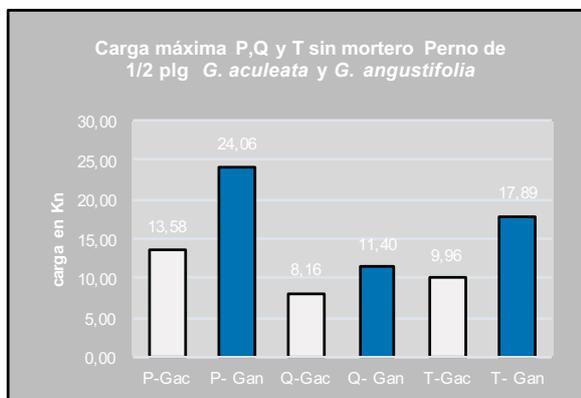


Figura 5. Resultados uniones "P", "Q" y "T" *G. aculeata* y *G. angustifolia*, perno de 1/2", sin mortero, carga máxima.

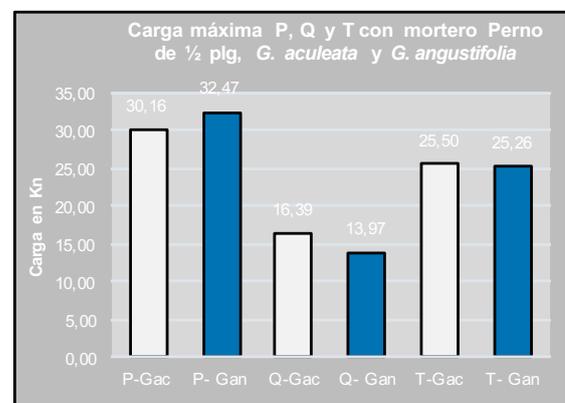


Figura 6. Resultados uniones "P", "Q" y "T" *G. aculeata* y *G. angustifolia*, perno de 1/2", con mortero, carga máxima

Con mortero y perno de 1/2" el incremento para tensión paralela (P) es de 7.6%, en compresión perpendicular (T) la *G. aculeata* supera ligeramente a la *G. angustifolia*, en tensión perpendicular (Q) las uniones con *G. aculeata* superan a las con *G. angustifolia* en 17.3%, figura 6.

3.5 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

Los resultados de la construcción del prototipo en sus diferentes etapas, formulan procedimientos y técnicas constructivas para integrarlas al sistema constructivo.

Los elementos que integran el sistema constructivo inician desde la producción del material, trabajos preliminares, prefabricación de elementos estructurales; armaduras, vigas compuestas, cuerdas inferiores y superiores de la armadura, construcción del prototipo; armado de elementos prefabricados, construcción de cubierta, entrepiso, muros y evaluación del proceso constructivo.

Corte y selección: se extrajeron 450 tallos de 6 m de longitud de diámetros diferentes, 200 para el sistema estructural y 250 para la producción de esterilla y reglilla figura 7.



Figura 7. Extracción de tallos, corte, selección, clasificación y transportación a sitio para acondicionamiento.

La preservación de los tallos se realizó con el procedimiento experimentado, con sales de boro, por inmersión-difusión figura 8.



Figura 8. Proceso de preservado por inmersión-difusión, con solución a base de sales de boro.

El secado fue bajo sombra por las altas temperaturas y humedad relativa presentadas en el sitio, el proceso de secado requiere un control y medición del contenido de humedad. Se tomaron mediciones a algunas muestras durante el proceso de secado de manera aleatoria, bajo los procedimientos de la metodología empleada por (Montoya, 2006) figura 9.



Figura 9. Proceso de secado bajo sombra tallos rollizos, esterilla y reglilla.

Los derivados de los tallos de la parte media, esterilla y reglilla, se obtuvieron de manera artesanal con herramientas manuales, para muros, entrepiso y plafón de la cubierta. Fueron preservados y secados figura 10.



Figura 10. Producción de esterilla y reglilla por medios artesanales.

El sistema estructural fue anclado a la cimentación con varillas de 3/8" y pernos de 3/8plg y 1/2plg, con los entrenudos rellenos con mortero, el sistema de cimentación funciona a la inversa que el sistema tradicional constructivo, por su bajo peso (1.8 kg/ml) tiene que estar anclado, ante ráfagas de viento imprevistos. Los muros divisorios se anclaron a la trabe de liga, a la cadena de desplante y al piso, según los desempeños de cada elemento figura 11.

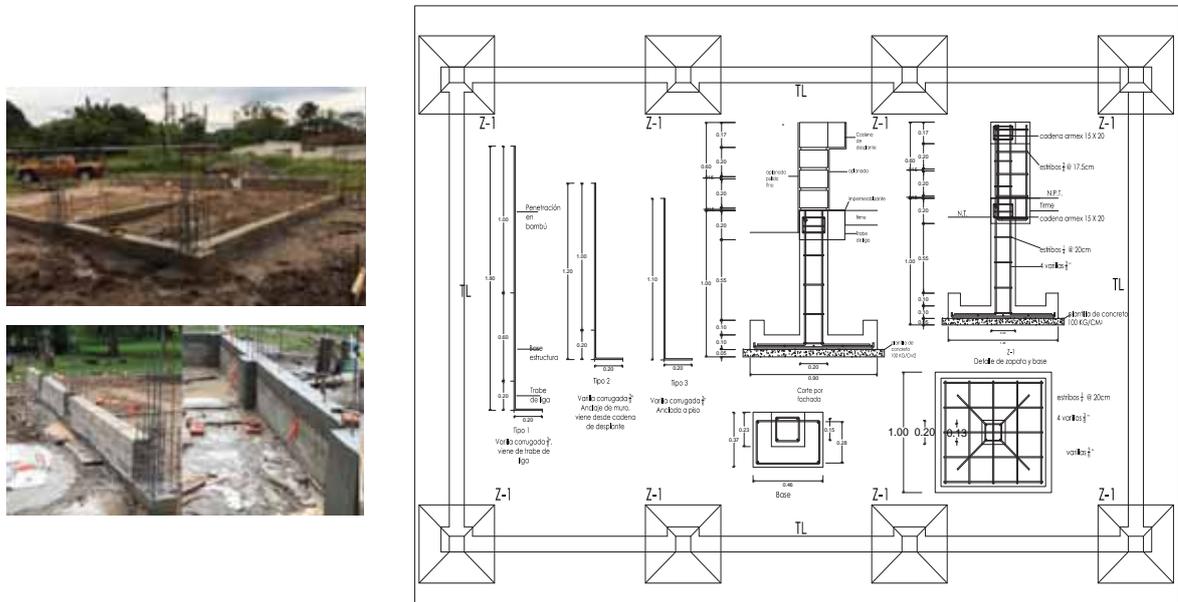


Figura 11. Proceso constructivo cimentación, armados y tipos de anclaje.

El análisis estructural determinó el uso de vigas compuestas y riostras. El procedimiento constructivo se realizó partiendo de la técnica para la selección del material, sin deformaciones del eje central longitudinal, diámetro, conicidad, calidad. Las uniones se realizaron con varilla roscada de 3/8 plg con tuercas y arandelas resultado de las experimentaciones realizadas figura 12.



Figura 12. Amarres provisionales, sujeción de elementos para su fijación con varilla roscada.

La configuración del sistema estructural está compuesta por armaduras porticadas moduladas, sus dimensiones y proporciones son originadas de la subdivisión del cuadrado, logrando uniformidad en los ángulos, uniones a boca

de pescado y pico de flauta, colocadas en plano seriado facilitan la coordinación de los elementos estructurales como postes y vigas y la modulación de elementos de cerramiento, muros perimetrales, interiores y acabados figura 13.

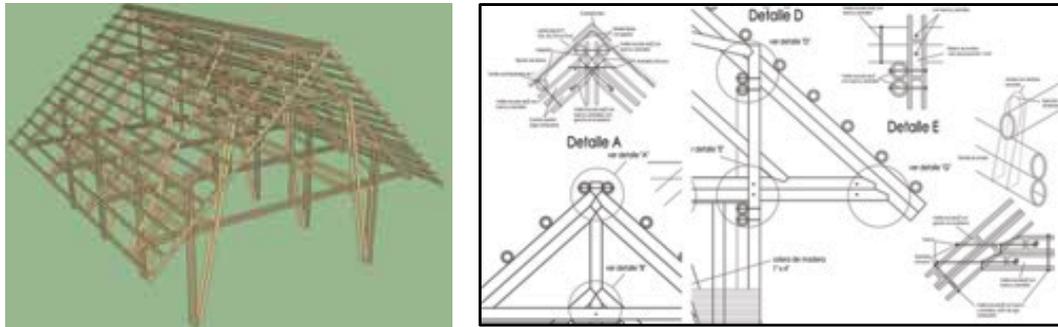


Figura 13. Detalles tipos de uniones en armadura.

El procedimiento constructivo de las armaduras porticadas una vez seleccionado el material, amarres provisionales con cuerda y alambre recocido, cortes a boca de pescado y pico de flauta, perforando el diafragma para introducir la varilla roscada figura 14.



Figura 14. Armadura, uniones y elementos componentes. Tipos de cortes, utilizados en las uniones.

La construcción se realiza en cuatro etapas, en la primera se construye el sistema estructural, integrando la colocación de armaduras, postes verticales, diagonales, y elementos rigidizantes, riostras longitudinales y diagonales, largueros de cubierta, estructura del tapanco, fijación de esterilla y relleno de entrenudos con mortero en uniones ensayadas figura 15.



Figura 15. Rigidización de las armaduras, colocación de riostras longitudinales.

Las uniones en el sistema estructural fueron a tensión paralela a la fibra, tensión perpendicular a la fibra y compresión perpendicular a la fibra, unidas con pernos de 3/8plg y 1/2plg, rellenos de mortero figura 16.



Figura 16. Uniones poste vertical con cuerdas inferiores, riostras longitudinales y cuerdas superiores.

La segunda contempló el armado de muros, incluye: los muros perimetrales, interiores y llenado de entrenudos con mortero. La tercera fase contempló acabados en muros, interiores y exteriores, colocación de reglilla y esterilla, malla gallinero, aplanados con mortero y aplicación de pintura, en interiores de cocina colocación de esterilla, malla gallinero y aplanados con mortero, en plafón de cubierta, colocación de esterilla en la parte baja de la estructura figura 17.



Figura 17. Estructura de muros, recubrimiento con esterilla y aplanado.

La cuarta fase contempló la carpintería, incluye: la construcción de puertas y ventanas con reglilla, colocación de reglilla en muros interiores figura 18.



Figura 18. Acabados muros interiores, reglilla con barniz.

4. CONCLUSIONES

El corte en época de lluvias en fase lunar menguante presenta menores contenidos de humedad inicial a lo largo del tallo, en época de secas la fase lunar llena y creciente presenta menores contenidos de humedad. Este estudio no es concluyente, es necesario continuar con más experimentaciones a lo largo del año y comparar resultados con otros estudios en las mismas condiciones.

La evaluación de la penetración de las sales de boro en general la mayor parte de las muestras presentaron resultados similares a los encontrados por (Morales Pinzón, 2006), una presencia casi total, observando una zona con penetración o presencia alta, donde el color rojo presentó una tonalidad mayor, corresponde a la parte interna del tallo, lo anterior se explica porque en la pared interior del bambú existe una mayor porosidad y menor densidad, hacia el exterior del bambú disminuye la porosidad y aumenta la densidad, lo que hace difícil la penetración del preservante. El mismo efecto se presentó en la parte baja del tallo, donde se obtuvieron mayores penetraciones,

con respecto a la media y alta, la parte baja con una baja densidad permite mayor penetración del preservante, en las muestras se identificaron mayores densidades en la media y alta respectivamente.

Los resultados obtenidos en la retención de las sales de boro, son superiores a los establecidos por la (FAO, 1986). Se encuentran entre los niveles aceptables de preservación 1.5 y 2.0 kg EAB/m³ y cumplen con los valores mínimos para que actúe como preservante (1 a 4 kg/m³, según (Posada Giraldo, 2015). La retención durante 4 o 5 días son diferentes a los sugeridos por (Montoya Arango, 2008) (4 kg/m³ EAB, como retención mínima).

El sistema de uniones en ambas especies con perno con y sin mortero presenta alternativas de uso para esfuerzos mecánicos importantes, el tipo de unión con y sin mortero que resiste más carga máxima es la "P" tensión paralela a la fibra, le sigue la "T" compresión perpendicular a la fibra y finalmente la "Q" tensión perpendicular a la fibra. En la *G. aculeata*, rellenar los entrenudos con mortero casi duplica la resistencia a diferentes esfuerzos mecánicos. Las propiedades mecánicas del sistema de uniones en ambas especies presentan excelentes condiciones para ser utilizado en sistemas constructivos para la vivienda.

Los resultados de la investigación ofrecen una tecnología con *Guadua aculeata*, a través de un trabajo sistemático, participativo y de organización, que reduce los costos de la obra, cubre las necesidades espaciales y detona el cambio de una realidad social. El sistema constructivo promueve la prefabricación de elementos estructurales disminuyendo considerablemente el tiempo de ejecución de la obra. Por su facilidad de aprendizaje permite adoptarlo como un sistema de autoconstrucción. La industrialización es posible en elementos portantes como muros de carga, divisorios, puertas, ventanas, muebles, pisos, y recubrimientos de muros. Utilizar el sistema constructivo con bambú *Guadua aculeata* para la construcción de viviendas siempre tendrá un costo menor que con materiales tradicionales. Es importante utilizar un sistema mixto, que involucre materiales tradicionales. Construir con *G. aculeata* es una alternativa que produce beneficios ecológicos, económicos y sociales

La propuesta funcional, formal y espacial, es una expresión de aspectos tradicionales, culturales e históricos de la vivienda tradicional totonaca, se rescatan los materiales tradicionales y la sabiduría de los sistemas constructivos ancestrales, con el uso racional de los materiales. Representa el concepto de vivienda "evolucionada" de (Moya Rubio, 1982). El sistema estructural, es un reflejo de la forma natural de trabajo de la *G. aculeata*, a tensión y compresión, cerchas cuyo origen son las tijeras en la solución de la cubierta de la vivienda tradicional, la geometría responde a cuestiones culturales de funcionamiento y fuerzas físicas. El rescate del bajareque con materiales mixtos que buscan la durabilidad y menor mantenimiento.

La similitud con la vivienda tradicional actual, evoca los valores e identidad que han permanecido a través del tiempo, se conjuga la modernización, tradiciones, disposición de los recursos naturales y la organización espacial.

El crecimiento progresivo de la vivienda a través de la modulación y prefabricación, conduce a la racionalización de los sistemas constructivos, con procedimientos sencillos y fáciles se puede utilizar en la autoconstrucción y disminución de los costos con la participación de la mano de obra solidaria o a mano vuelta.

El prototipo construido es un modelo de solución que puede transformar el contexto circundante con la participación solidaria de la mano de obra y representar una alternativa para la producción social de la vivienda.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al laboratorio de pruebas de productos maderables de la Red Ambiente y Sustentabilidad del Instituto de Ecología, A.C, de la ciudad de Xalapa, Ver., lugar donde se realizaron los ensayos mecánicos.

Al Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, centro experimental "Las Margaritas" en Hueytamalco, Puebla, por haber proporcionado las muestras para toda la investigación.

6. REFERENCIAS

- Colombianas, Normas Técnicas NTC. (2010). Estructuras de Madera y estructuras de Guadua, NSR-10. 156. Colombia.
- Cruz Ríos, H. (2013). *Bambú Guadua, Guadua aculeata*. Estudio, Bamboo Premier, México D.F.
- Cruz, L. P. (2018). *Determinación del ácido bórico y bórax, usado como preservante en la Guadua aculeata*. Tesis licenciatura, Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Poza Rica, Veracruz.
- Erdoiza, J., & Echenique, R. (1980). *Preservación de madera de pino con sales de boro*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre recursos bióticos, Laboratorio de ciencia y tecnología de la madera. Xalapa, Ver.: Instituto Nacional de Investigaciones sobre recursos bióticos.
- FAO Department, F. (1986). Wood preservation manual. Rome, Rome, Italy.
- GOCDMX, NTC. (2017). Gobierno de la Ciudad de México, Normas técnicas Complementarias Obtenido de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C.: <http://www.smie.org.mx/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias.php?ntc=ntc-madera>
- INFONAVIT, C. P. (1999). http://portal.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/infonavit/el+instituto/biblioteca/biblioteca_digital_infonavit. Recuperado el 13 de agosto de 2015, de http://portal.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/infonavit/el+instituto/biblioteca/biblioteca_digital_infonavit: <http://infonavit.janium.com/janium-bin/sumario.pl?Id=20150813123018>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (26 de 03 de 2008). Norma Técnica NTC Colombiana 5300. Bogotá, Bogotá, Colombia.
- ISO 22157-1 (2004). International Organization for Standardization. (junio de 2004). Bamboo -- Determination of physical and mechanical properties -- Part 1: Requirements. Geneva, Switzerland.
- Londoño, X. (2005). Aspectos generales de los bambúes latinoamericanos. *Congreso Mexicano del bambú*, I, pág. 3. Xalapa, Ver.
- Montoya Arango, J. A., & Jimenez Arias, E. (6 de enero de 2006). Determinación de la curva de secado al aire libre, mediante modelación matemática y experimental de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica Año XII, No 30, Mayo de 2006* UTP. ISSN 0122-1701, 415-419.
- Montoya Arango, J. A., & Jiménez Arias, E. (6 de enero de 2006). Determinación de la curva de secado al aire libre, mediante modelación matemática y experimental de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica Año XII, No 30, mayo de 2006* UTP. ISSN 0122-1701, 415- 419.
- Morán Ubidia, J. A. (S/F). *Preservación del bambú en América Latina, mediante métodos tradicionales* (Vol. 1). (R. I. INBAR, Ed.) Guayaquil, Guayaquil, Ecuador: Red Internacional de Bambú y Ratán INBAR.
- Norma Técnica NTC Colombiana 5301. (03 de Agosto de 2007). Preservación y secado del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth. Bogotá, Bogotá, Colombia.
- Ordoñez Candelaria, V. R., & Bárcenas Pazos, M. G. (2014). Propiedades Físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas. *Maderas y Bosques*, 20 (2-III-125), 112-127.

- Ordoñez., M. e. (2012). *Investigación para el diseño y construcción con bambú*. Investigación, Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, Veracruz.
- Peña V., L., Burgo s., A., González F., A., & Will Valero, S. (julio de 2009). Efecto de la preservación con mezclas de bórax-acido bórico y urea formaldehído sobre las propiedades físico- mecánicas y el ataque de insectos en *Guadua angustifolia*. *Revista Forestal Venezolana*, 135- 144
- Ponce, D. L. (2010). Universidad Nacional Agraria La Molina. *Facultad de Ciencias Forestales Características de Preservación por el Método de Inmersión del Tallo de Guadua angustifolia Kunth (bambú), proveniente del Distrito de La Florida, Cajamarca*. Tesis Licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias Forestales, Lima, Perú.
- Posada, Giraldo, R. E. (2015). *Deasrrollo de métodos alternativos de valoración de la calidad de la preservación, empleando sales de boro en la Guadua angustifolia Kunt*. Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales, Pereira, Colombia.
- Turner, A. A. (2008). *PENETRATION DEPTH OF BORATES IN HISTORIC WOODEN STRUCTURES IN VIRGINIA CITY, MONTANA*. tesis, Faculties of the University of Pennsylvania, h p://repository.upenn.edu/hp_theses/115, Pennsylvania.
- Zaragoza, Hernández, I. (2012). *Anatomía y propiedades físico-mecánicas del culmo de bambú (Guadua aculeata Rupr.) de la región nororiental del Estado de Puebla*. Científico, Universidad Autónoma de Chapingo, División de Ciencias Forestales, Texcoco, Edo. de México.

Galletas integrales tipo cookie con fibra de brotes de bambú: propiedades tecnológicas

Whole cookies with bamboo shoots: technological properties

Amanda Rios Ferreira⁽¹⁾,
Elisa Cristina Andrade Neves⁽²⁾,
Thaísa de Menezes Alves Moro⁽³⁾,
Mária Herminia Ferrari Felisberto^(1,2),
María Teresa Pedrosa Silva Clerici⁵

⁽¹⁾ University of Campinas (UNICAMP),
Campinas, São Paulo, Brazil.
amanda_5904@hotmail.com
eneves@ufpa.br
thaisamoro@gmail.com
mariaferrari.felisberto@gmail.com
mclerici@unicamp.br

⁽²⁾ Federal University of Viçosa, Viçosa,
Minas Gerais, Brazil.

Recibido: 19 de Julio, 2019
Aceptado: 11 de Diciembre, 2019

<http://dx.doi.org/10.24133/ciencia.v22i1.1330>

"THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED."

ABSTRACT

Brazilians consume about 8.5kg of cookies per capita/year, and cookies with a health claim are available in the Brazilian market, so the use of wholemeal flour and bamboo shoots can meet this demand for new products. The objective of this work was the elaboration of whole cookies without and with chocolate (GC) and commercial bamboo shoots fibre (FBB). Formulations were: standard (C0) without addition of FBB and GC; C1, with the addition of 15% GC; C2, with 10% FBB; C3 with 15% GC and 10% FBB and C4, with 15% GC, 10% FBB and 25% fat reduction. Ingredients were mixed, rolled, cut ($h = 5\text{mm}$ and $\varnothing = 5\text{cm}$), provided at 160°C for 8 minutes and evaluated after cooling. The addition of FBB with GC and the reduction of fat content reduced the mass spreading. The mass loss (%) was higher in formulations C1 and C4. Biscuits with fibres (C1 to C4) had a lighter color ($L = 60.31 \pm 1.99$) and a higher hardness than the standard (27.00 ± 2.29). Bamboo shoot fibres showed potential for use in cookies, and it can even be used for fat reduction, improving its nutritional characteristics and consumer demand for healthier products.

Keywords: Bamboo shoot, Fibres, Health.

RESUMEN

Considerando el aumento de la variedad de galletas con propiedades saludables, el uso de harina y fibra de brotes de bambú puede satisfacer la demanda de nuevos productos. El objetivo de este trabajo fue elaborar y evaluar las características tecnológicas de galletas tipo *Cookie* con y sin chocolate (GC), con fibras de brotes de bambú (FBB). Fueron elaboradas cinco formulaciones: un control (C0) sin adición de FBB y GC; C1, (15% GC); C2, (10% FBB), C3, (15% GC, 10% FBB); y C4, (15% GC, 10% FBB y 25% reducción de grasa). Los ingredientes fueron mezclados, la masa laminada, cortada ($h=5\text{ mm}$ y $\varnothing=5\text{ cm}$), y horneada a 160°C durante 8 minutos. La adición de FBB con GC, así como la reducción del contenido de grasa, disminuyeron la difusión de la masa durante el horneado. Las galletas con fibras (C1 y C4) presentaron una coloración más clara ($L=60.31\pm 1.99$) y mayor dureza en comparación al control

(27.00±2.29). Las fibras de brotes de bambú demostraron tener potencial para ser utilizadas en formulación de galletas, permitiendo reducir el % de grasa, mejorando sus características nutricionales a la vez que satisface la demanda de productos más saludables.

Palabras Clave: Brote de bambú, Fibras, Salud.

1. INTRODUCTION

Brazil is among the largest producers of biscuits, with a production of 1.3 million tons in 2015, with consumption per capita/year of 8.5kg, being surpassed only by Argentina, the United Kingdom, Italy, and the United States. This per capita consumption puts Brazil in 5th place as a consumer (Abimapi, 2015). Of these, cookies are very present in the trade, with a wide variety of sizes, flavors, and ingredients.

Cookies can be defined as baked cereal products that have high levels of sugar and fat, with a moisture content of 2 to 8% and a water activity ranging from 0.1 to 0.3, where the quality of the ingredients used in its formulation has a direct influence on the characteristics of the final product (Gökmen et al., 2008; Pareyt et al., 2009).

This type of biscuit is highly consumed by different audiences, due to its long stability and ease of consumption, especially by children, due to the sweet taste and crunchy texture (Chevallier et al., 2000; Fasolin et al., 2007; Jacob and Leelavathi, 2007, Moraes et al., 2010, Feddern et al., 2011, Simabesp, 2012).

There are classic chocolate chip cookie biscuits made with refined wheat flour, but there are cookies with health claims, and can be added with various whole grains and fibers, including bamboo shoots (*Bambuseae* spp.), Whose use in biscuits was reported by Farris and Piergiovanni (2008) and Farris et al. (2008)

Some crops like the Asian ones consume the bamboo in the form of sprout. Its nutritional potential has already been studied, being rich in vitamins, minerals, amino acids and fibers (Chongtham et al., 2011). Brazil has 89% of all bamboo genera and 65% of all known species in America. It also houses one of the largest native bamboo reserves in the world (180,000 km²), which is located in the southwest of the Amazon, constituting a solid economic possibility still unexploited (Judziewicz et al., 1999).

In the international market, there are several companies that market bamboo shoots fiber. However, Brazil does not produce this type of fiber and imports the CreaFibe® product at an average cost of R \$ 6.00 / kg. In other countries, bamboo shoot fibers are produced under the trade names Jelucel®BF (Jelu-Werk, 2016) and Nutriloid® Bamboo Fiber (Tic-Gums, 2016) and with specifications and percentages of use in the preparation of several types of food products.

Coupled with the greater demand of consumers for healthy products and contributing to the prevention of certain diseases, product formulations added with bamboo shoots fibers have been very successful since, in addition to increasing the supply of fibers, they reduce the energy value and the fat and sugar content present at high levels in bakery products, especially in cookie-type biscuits. The present work had as objective the elaboration, technological evaluation and the total alimentary fiber content and tasting of cookie type biscuits without and with the addition of drops of chocolate (GC) and of commercial bamboo shoot fiber (FBB).

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. MATERIAL

The bamboo shoots fibre used was supplied by *Nutrassim Indústria, Comércio Importação e Exportação LTDA* (Extrema, MG), and the other ingredients were purchased from the city of Campinas (SP).

2.2. PRODUCTION OF COOKIES

Whole cookies were prepared following formulations shown in Table 1, where formulation C0 is the control formulation, ie, it had no addition of commercial bamboo shoot fiber (FBB) or chocolate drops (GC).

Table 1.

Formulations of cookies with bamboo shoots fibre and reduction of fat content.

Ingredients	C0	C1	C2	C3	C4
Whole wheat flour (%)	100	100	100	100	100
Sugar (%)	54.6	54.6	54.6	54.6	54.6
Margarine (%)	38	38	38	38	28.5
Chocolate Drops - GC (%)	-	15	-	15	15
Bamboo shoot fiber - FBB (%)	-	-	10	10	10
Egg yolk (%)	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4
Water (%)	12	12	24	24	30
Bicarbonate ammonia (%)	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
Salt (%)	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
Spice (%)	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
Vanilla essence (%)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

Figure 1 shows the flowchart of cookies processing: in the mixing step, two phases were followed. In the first phase, the cream formation, sugar, margarine, egg yolk and vanilla essence were added in a mixer and beaten for five minutes at high speed. In the second step, for the mass formation, the other ingredients were added and the beating was performed for approximately five minutes, adjusting the amount of water to be added, according to the characteristics and appearance of the standard sample (C0). Afterwards, the dough was rolled in the thickness of 5 millimetres, cut into a cylindrical cutter with a diameter of 50 millimetres and transferred to baking sheets. The whole cookies were baked for approximately 8 minutes in an oven with temperatures close to 200 ° C in the ballast and 220 ° C in the ceiling. At the end of the delivery, the cookies were cooled for 30 minutes, packed in a vacuum and stored in a controlled temperature room, protected from light.

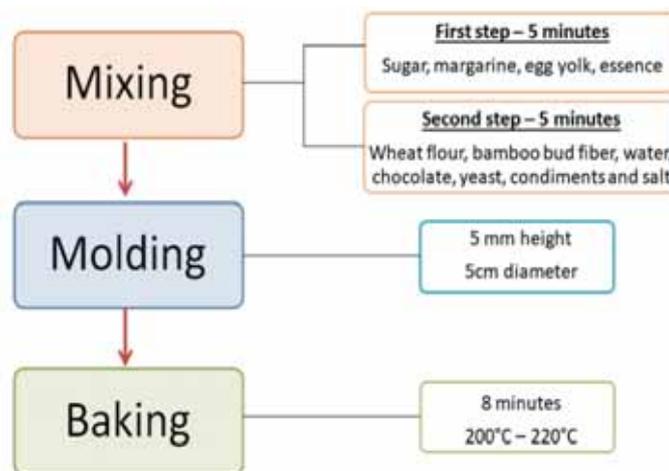


Figure 1. Flowchart of whole cookies processing steps.

2.3. Technological Analysis

Ten whole cookies, before and after baking, had their diameter and height measurements determined using pachymeter, to be evaluated for horizontal (CH) and vertical (CV) growth, it was also determined in the 10 biscuits the weight, using a semi-analytical balance, to calculate the mass loss in the delivery (PM).

The cookies were analyzed for specific volume (VE) by displacement of the millet seed and the measure of the proportion of growth of the cookies was calculated by dividing the diameter of the samples by the thickness of the same.

The hardness was determined in a Stable Micro Systems Texture Analyzer TAXT2 (Surrey, England) with probe 3-point bending rig (HDP / 3PB) and colour (parameters L*, a* and b*) using a colorimeter (CR 400 Konica Minolta, JAPAN), by the CIE-Lab system.

The theoretical calculation of the total dietary fibre content was carried out taking into account the specifications provided by the suppliers of whole wheat flour and also of the bamboo shoot fibre.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Table 2 shows the results of the technological analyses carried out on the cookies. It was found that all the formulations enabled the formation and cutting of the cookies mass. There was no significant difference between the samples in relation to the specific volume. With respect to growth, we observed an antagonistic behaviour, where the C3 and C4 cookies, which presented the highest vertical growth, also presented the lowest horizontal growth. That is, the addition of the FBB with GC as well as the reduction of the fat content had the effect of reducing the spreading of the mass during the baking.

Kaur, Singh and Kaur (2017) evaluated the effect of partial substitution of wheat flour on the production of cookies by different concentrations of flax meal and the impact of this substitution on the physical-chemical, antioxidant and sensorial characteristics of the cookies. The authors observed that the growth of cookies was higher in the greater percentages of substitution of wheat flour, a behaviour justified by them in the strength of the wheat flour used, which may have stopped the growth of cookies.

The hardness of the biscuits was higher for the whole cookies C3 and C4, which contained FBB and GC, and C4 was elaborated with the least amount of fat in its formulation in relation to the others and with a greater amount of added water. This may justify its high hardness value since fat is an important ingredient for maintaining the texture of biscuits (Manley, 2000).

Table 2.
Technological characteristics of whole cookies¹

Parameters evaluated	Formulations				
	C1	C2	C3	C4	C5
Vertical growth (mm)	1.9±1.1 ^b	1.1±0.9 ^c	2.7±0.95 ^b	5.5±1.2 ^a	5.9±0.9 ^a
Horizontal growth (mm)	2.0±0.2 ^a	1.58±0.2 ^b	2.04 ±0.3 ^a	0.84±0.2 ^c	0.63±0.2 ^c
Weight loss (%)	15.61±0.93 ^b	16.86±2.95 ^a	14.96±0.36 ^b	15.95±0.79 ^b	16.66±0.64 ^a
Specific volume (mL / g)	2.32±0.23 ^{ns}	2.26±0.24 ^{ns}	2.31±0.20 ^{ns}	2.16±0.21 ^{ns}	2.33±0.22 ^{ns}
Hardness (N)	27.00±2.29 ^c	41.43±4.07 ^c	39.48±3.82 ^c	73.41±5.83 ^b	86.57±7.41 ^a
Colour Parameters					
L*	52.33±0.60 ^b	48.25±2.05 ^c	53.76±0.67 ^b	60.31±1.99 ^a	58.98±1.79 ^a
a*	10.72±0.39 ^b	11.78±0.59 ^a	9.89±0.92 ^b	8.32±0.53 ^c	9.13±0.49 ^c
b*	28.63±0.69 ^a	28.50±0.74 ^a	28.49±1.15 ^a	26.11±0.28 ^b	27.08±0.60 ^b
Dietary fibre (%)	2.34	2.19	6.43	5.74	5.82

¹ Data expressed as mean ± standard deviation. Different letters on the same line differ from one another by the Scott-Knott test (p <0.05); ns: non-significant. C1 (Standard): 0% commercial bamboo shoot fibre (FBB) and 0% chocolate droplets (GC), C2: 0% FBB and 15% GC, C3: 10% FBB and 15% GC and C4: 10% FBB, 15% GC and 25% fat reduction.

There was a significant difference in the colour parameters L^* , a^* and b^* . For the parameter L^* , the highest means were from samples C3 and C4, which contained FBB in their formulation, indicating clearer cookies than the others, as can be observed in Figure 1. For parameter b^* , which indicates variations of colour between blue and yellow, all averages were positive, indicating products with yellowish colour, being the highest averages in formulations C0, C1 and C2. Kaur, Singh and Kaur (2017) studied the partial replacement of wheat flour with linseed flour in cookies and observed that the higher percentages of linseed flour incorporation resulted in a lower luminosity (L^* parameter) of the cookies. The data observed in the present study (higher L^* values) for cookies with FBB presence can be justified because of the colour characteristics of the FBB itself, which is visually white with high L^* values.

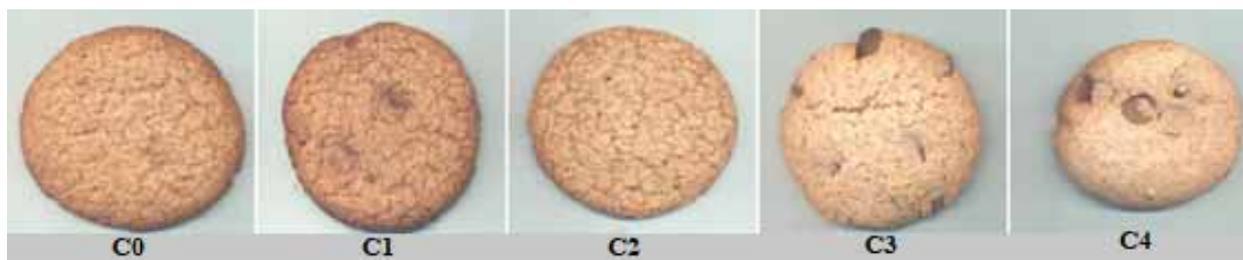


Figure 2. Image of whole cookie made with commercial bamboo shoot fibre (FBB) and chocolate drops (GC). C0 (standard): 0% FBB and 0% GC, C1: 0% FBB and 15% GC, C2: 10% FBB and 0% GC, C3: 10% FBB and 15% GC C4: 10% FBB, 15% GC and 25% fat reduction.

The whole wheat flour used in the study had a fibre content of 5.1g / 100g of flour and the bamboo shoot fibre 95.44g of fibre / 100g of fibre isolated according to the specifications provided by the suppliers. The theoretical calculation of the total dietary fibre content of whole cookies showed that for C0 and C1, without the addition of FBB, the theoretical content of dietary fibre was 5.1 g of fibres / 100 g of product. For samples C2, C3 and C4, this content was approximately three times higher, 14.64%, indicating that FBB can be used to increase fibre content and promote the consequent known benefits of human dietary fibre intake, such as increase of the faecal cake, regulation of the intestinal transit among others (Prosky, 2000; Brownlee, 2001).

Consumer demand for healthier products contributes to a change in the ingredients of products with an established market, such as cookies. Therefore, the search for new natural ingredients has been stimulated, aiming to insert the development of new food products in the concepts of health and well-being, sustainability and ethics, reliability and quality, sensoriality and pleasure as presented in Brazil Food Trends 2020 (2010). Ingestion of dietary fibre has been studied for decades and studies relate the low intake of this nutrient with diseases such as diabetes, coronary heart disease and some cancers. In the food industry the ingredient commonly added to bakery products for increasing fibre content is the wheat bran itself. However, studies relate the presence of bran and whole flours in food products with negative consumer perception (Kruger; Matsuo; Dick, 1998).

In Brazil, the National Agency of Sanitary Surveillance (ANVISA) allows the use of functional claims in the packaging of foods related to the amount of fibre in the portions. For "fibre source" claims the food must have at least 2.5 g of fibre per serving and to be considered as having "high fibre content" it must have at least 5 g of fibre per serving of product (Page 2 In the case of Europe, the specifications are somewhat more stringent, requiring 3 g per 100 g portion of product to be considered a source of fibres and 6 g per 100 g of product to be considered as rich in fibres (European Commission, 2012) .

Therefore, cookie type C3 and C4 biscuits meet the specifications of Brazilian legislation and fit as a source of fibre. In the case of formulation C2, added with FBB and without chocolate drops, the fibre levels were even higher and met the requirements of the European Commission, presenting 6.43 g of fibre in 100 grams of product.

The reduction of fat in formulation I5 and the incorporation of fibres in the formulations C1, C2, C3 and C4 also resulted in a caloric reduction of the product. A portion of 25g of cookie-type biscuits corresponds on average to 16% of the Recommended Daily Value of fat intake, and 6% of the RV of carbohydrates, considering a diet of 20000 kcal / day. The proposed formulations could increase the intake of non-digestible carbohydrates, which would reduce the energy value of the product, and cookies, which are foods rich in fats and carbohydrates, could present a healthier and therefore less harmful health profile.

4. CONCLUSION

The results indicate that it is possible to incorporate bamboo shoot fibre into whole cookies with adequate technological characteristics and without consumer rejection. The fibre content of the cookies was higher for the samples that contained bamboo shoot fibre, contributing to improve the nutritional characteristics of cookies and present a new product with bamboo derivatives what led us to take advantage of the productive chain of bamboo, and in a sustainable manner, its insertion in Brazilian food habits, providing the inclusion.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for funding (001), to São Paulo Research Foundation (FAPESP, 2015/196374) and Fund for Support to Teaching, Research and Outreach Activities (FAEPEX, (519292-2425/16) for the financial support, and to CAPES, National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), PIBIC and SAE/Unicamp, for the scholarship of the students who supported along the project.

REFERENCES

- ABIMAPI. Estatísticas de Biscoitos. 2018. (2018) Recovered in: <[http://www.abimapi.com.br/ estatistica-biscoito.php](http://www.abimapi.com.br/estatistica-biscoito.php)>.
- Baumgartner, B., Ozkaya, B., Saka, I., Ozkaya H. (2018). "Functional and physical properties of cookies enriched with dephytinized oat bran". *Journal of Cereal Science*, 80, 24-30.
- BRASIL FOOD TRENDS 2020. (2014). Campinas, SP: ITAL, 2014. 389 p. ISBN 978-85-7029-124-0.
- Brownlee, I. A. (2011). "The physiological roles of dietary fiber". *Food Hydrocolloids*, 25, 2, 238–250.
- Chevallier, S.; Colonna, P.; Della Valle, G.; Lourdin, D. "Contribution of Major Ingredients during Baking of Biscuit Dough Systems". (2000). *Journal of Cereal Science*, 31(3), 241-252.
- Chongtham, N.; Bisht, M. S.; Haorongbam, S. (2011). "Nutritional Properties of Bamboo Shoots: Potential and Prospects for Utilization as a Health Food". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(3), 153-168.
- EUROPEAN COMMISSION. (2016). "Nutrition claims". Recovered in: <[http://ec.europa.eu/food/ safety/labelling_nutrition/claims/nutrition_claims/index_en.htm](http://ec.europa.eu/food/safety/labelling_nutrition/claims/nutrition_claims/index_en.htm)>
- Farris, S.; Piergiovanni, L. (2010). "Effects of ingredients and process conditions on 'Amaretti' cookies characteristics". *International Journal of Food Science & Technology*, 43(8), 1395-1403.

- Farris, S.; Piergiovanni, L.; Limbo, S. (2008). "Effect of bamboo fibre and glucose syrup as new ingredients in the manufacture of Amaretti cookies". *Italian Journal of Food Science*, 20(1),75-90.
- Fasolin, L. H.; Almeida, G. C. D.; Castanho, P. S.; Netto-Oliveira, E. R. (2007). "Biscoitos produzidos com farinha de banana: avaliações química, física e sensorial". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 27(3),524-529.
- Feddern, V.; Durante, V. V. O.; Miranda, M. Z. D.; Salas-Mellado, M. D. L. M. (2011). "Avaliação física e sensorial de biscoitos tipo cookie adicionados de farelo de trigo e arroz". *Brazilian Journal of Food Technology*, 14(4),267-274.
- Gökmen, V.; Serpen, A.; Açar, Ö. Ç.; Morales, F. J. (2008). "Significance of furosine as heat-induced marker in cookies". *Journal of Cereal Science*, 48(3),843-847.
- Jacob, J.; Leelavathi, K. (2007). "Effect of fat-type on cookie dough and cookie quality". *Journal of Food Engineering*, 79(1),299-305.
- Jelu-Werk. (2016). "Bamboo fibres as food additives". Ludwigmühle, Germany, 2016. Recovered in: < <http://www.jelu-werk.com/cellulose/products/plant-fibres/jelucel-bf-bamboo-fibre/> >.
- Judzewicz, E. J.; Clark, L. G.; LOnoño, X.; Stern, M. J. (1999). "American Bamboos". Washington D. C. : Smithsonian Institution Press, 392.
- Kaur, M., Singh, V., Kaur, R. (2017). "Effect of partial replacement of wheat flour with varying levels of flaxseed flour on physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of cookies". *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 9(1),14-20.
- Manhães, A. (2008). "Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil: abordagem preliminar". (Monografia). Departamento de Silvicultura, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- Manley, D. J. R. (2000). "Technology of biscuits, crackers and cookies. 3". Boca Raton, FL: Cambridge, CRC.
- Moraes, K. S. D.; Zavareze, E. D. R.; Miranda, M. Z. D.; Salas-Mellado, M. D. L. M. (2010). "Avaliação tecnológica de biscoitos tipo cookie com variações nos teores de lipídio e de açúcar". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(1),233- 242.
- Pareyt, B.; Talhaoui, F.; Kerckhofs, G.; Brijs, K.; Goesaert, H.; Wevers, M.; Delcour, J. A. (2009). "The role of sugar and fat in sugar-snap cookies: Structural and textural properties". *Journal of Food Engineering*, 90(3),400-408.
- Pereira, M. A. R.; Beraldo, A. L. (2010). "Bambu de corpo e alma". (4ªed.) Bauru/SP: Canal 6.
- Prosky, L. (2000). "When is dietary fiber considered a functional food?" *Bio Factors*, 12(1),289–297.
- SIMABESP. (2012). "Mercado de Biscoitos. Sindicato da Indústria de Massas Alimentícias e Biscoitos no Estado de São Paulo", 2012. Recovered in: < http://www.simabesp.org.br/site/mercado_biscoitos_simabesp.asp >.
- TIC-GUMS. (2016). "Nutriloid® Bamboo Fiber". Philadelphia, USA. Recovered in: < <http://www.ticgums.com/products/nutriloid/product/nutriloid-bamboo-fiber.html> >.



Ciclo de floración de *Chusquea mollis* L.G. Clark (Poaceae, Bambusoideae, Bambusae, Chusqueinae) en los Andes Venezolanos

Flowering cycle of *Chusquea mollis* I.G. Clark (Poaceae, Bambusoideae, Bambusae, Chusqueinae) in the Venezuelan Andes

Francisca Ely⁽¹⁾
José V. González⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto Jardín Botánico de Mérida, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Avenida Alberto Carnevali, Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez. Mérida, Venezuela.
felyenator@gmail.com

⁽²⁾ Instituto Jardín Botánico de Mérida, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Avenida Alberto Carnevali, Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez. Mérida, Venezuela.

Recibido: 25 de Agosto, 2019
Aceptado: 10 de Noviembre, 2019

<http://dx.doi.org/10.24133/ciencia.v22i1.1411>

"THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED."

RESUMEN

En la mayoría de bambúes leñosos, existe mucha incertidumbre respecto a su ciclo de floración, dado que su frecuencia y duración varía según la forma de vida, distribución latitudinal y altitudinal. Los bambúes de ecosistemas andinos tropicales combinan eventos de floración gregaria sincrónicos y asincrónicos. El objeto del presente estudio era el de determinar el patrón de floración de *Chusquea mollis*, un bambú monocárpico, nativo de los páramos de Venezuela y Colombia. La cronología de eventos de floración de la especie se determinó mediante la consulta de bases de datos, *exicatas* de herbarios y registros de floración de dos poblaciones de la Cordillera de Mérida, Venezuela. La diversidad etaria de las poblaciones de bambúes también contribuye a determinar el patrón de floración; por lo que se realizó un censo en una población ubicada en el Páramo La Aguada. Nuestros resultados sugieren que *C. mollis* presenta un patrón fenológico mixto, que combina eventos de floración gregarios y asincrónicos, transcurrido un período vegetativo relativamente corto (5-7 años). La población estudiada presentó una marcada diversidad etaria, conformada por plántulas, juveniles, adultos vegetativos, en reproductivo y post-reproductivo, siendo los juveniles el grupo más numeroso.

Palabras clave: Bambúes leñosos, Magnifoliae, fenología reproductiva, estructura poblacional, páramos.

ABSTRACT

Flowering cycles are poorly understood in the majority of woody bamboos, since their frequency and duration may vary according their growth-form and distribution across latitude and altitude ranges. Tropical Andean bamboos are known for combining gregarious, synchronic and asynchronic flowering events. The main objective of this study was to determine the flowering pattern of *Chusquea mollis* a monocarpic, native bamboo that grows in the subparamos

and paramos of Venezuela and Colombia. The chronology of flowering events of this species was based on the revision of herbarium specimens, online databases and the occurrence of flowering events in two populations of the Cordillera de Mérida, Venezuela. Taking in account that age diversity may also contribute to identify flowering patterns in bamboo populations; we performed a survey of a single population located in the Páramo La Aguada. Our results suggest that *C. mollis* combines gregarious and asynchronic flowering cycles, after a relatively short vegetative period (5-7 years). The census conducted in a single population of La Aguada revealed the co-existence of plantlets, juvenile plants, vegetative, reproductive and post-reproductive adults, of which the juvenile were the most numerous group.

Key words: Woody bamboos, Magnifoliae, reproductive phenology, population structure, paramos.

1. INTRODUCCIÓN

El género *Chusquea* Kunth representa actualmente el género más diverso entre los bambúes leñosos neotropicales, con aproximadamente 185 especies descritas para la fecha (Clark et al., 2015; Fadrique et al., 2019). No obstante, se estima que este número incrementará próximamente, puesto que existe un número indeterminado de potenciales especies nuevas en los Andes tropicales.

Estudios moleculares recientes indican que la subtribu Chusqueinae está representada exclusivamente por el género *Chusquea* Kunth; el cual comprende cinco subgéneros: *Chusquea* Kunth, *Rettbergia* (Raddi) L.G. Clark, *Swallenochloa* (McClure) L.G. Clark, *Platonía* Fisher & L. G. Clark y *Magnifoliae* L. G. Clark & Fisher (Fisher et al., 2014). Los primeros tres subgéneros comparten caracteres vegetativos como múltiples yemas por nudo en los culmos, tallos aéreos rectos o arqueados, pero siempre ramificados, entrenudos elongados, revestidos por hojas caulinares persistentes o caducas y hojas del follaje de tamaño variable, pero generalmente inferiores a 40 cm (Judziewicz et al., 1999). En contraste, los dos subgéneros restantes, *Platonía* y *Magnifoliae* presentan culmos siempre erguidos, que portan una única yema por nudo, entrenudos muy cortos, hojas caulinares pobremente desarrolladas y hojas del follaje usualmente muy largas y erectas. Este conjunto de caracteres, considerados ancestrales en el grupo le brindan un aspecto de roseta, que en nada se asemejan a un bambú leñoso típico, razón por la cual todos sus representantes se ubicaban anteriormente en el género *Neurolepis* Meisn. (Fisher et al., 2009, 2014).

Las especies del género *Chusquea* se distribuyen desde el norte de México hasta el sur de Chile y Argentina; la mayoría están asociadas a ecosistemas boscosos montanos y pastizales de altura (Judziewicz et al., 1999; Clark et al., 2015). Las regiones que concentran la mayor diversidad de especies son los Andes tropicales, el Escudo Guayanés (Clark & Ely, 2011) y el sudeste de Brazil (Judziewicz et al., 1999; Fisher et al., 2014; Vorontsova et al. 2016). Las especies del género *Chusquea* que crecen a mayor elevación pertenecen a los subgéneros *Swallenochloa*, *Magnifoliae* y *Platonía* (Fisher et al., 2014). En Venezuela, encontramos representantes de ambos subgéneros asociados a ecosistemas de alta montaña; concretamente, bosques nublados, subpáramos y páramos. Las especies del subgénero *Magnifolia* habitan principalmente páramos húmedos bajos o subpáramos, incluyendo la zona de contacto entre límite superior continuo de los bosques nublados y el páramo propiamente dicho (Ramírez et al., 2009; Clark & Ely, 2011), conocido como Bosque Paramero, donde crecen *C. spectabilis* L.G. Clark (2600-2900 m snm) y *C. mollis* (Swallen) L.G. Clark (2650-3400 m snm).

El subgénero *Swallenochloa* también tiene representantes en los páramos bajos o subpáramos (*Chusquea angustifolia* (Soderstrom & Calderón) L.G. Clark, *C. spencei* Ernst. y *C. tessellata* Munro 2600-2800 m snm); sin embargo, se diferencian de las especies del subgénero *Magnifoliae* por crecer en condiciones de mayor exposición, lo cual les permite colonizar el límite superior del páramo propiamente dicho (*C. spencei* 2700-3650 m snm), e inclusive, ascender hasta el superpáramo o páramo altiandino (*C. guirigayensis* Niño, Dorr & L.G. Clark, 3700-4010 m snm).

En los Andes venezolanos, los bambúes leñosos de los subgéneros *Chusquea* y *Swallemochloa* son elementos muy conspicuos del paisaje andino tanto en ecosistemas boscosos como parameros (Judziewicz et al., 1999; Cuello & Cleef, 2009; Cuello et al., 2010; Insuasty-Torres, 2015; Clark et al., 2015). En contraste, los representantes del subgénero *Magnifolia* como *Chusquea mollis* (Swallen) L.G. Clark y *C. spectabilis* L.G. Clark (= *Neurolepis mollis* Swallen y *N. aperta* (Munro) Pilger, respectivamente) no destacan del mismo modo, por el hecho que forman poblaciones pequeñas y muy discontinuas, por lo que no aportan de manera significativa a la cobertura de los bosques parameros, ni del páramo propiamente dicho (Ramírez et al. 2009; Ely comunicación personal). Por este motivo se incluyó a *C. mollis* en la lista de especies amenazadas de la IUCN (Ely & Clark, en prensa).

Los bambúes leñosos se han catalogados típicamente como monocárpicos; sin embargo, excepciones a esta regla son comunes en bambúes templados y tropicales, en los cuales sobrevive una proporción variable de ramets y rizomas después de la floración (Pearson et al., 1994; Judziewicz et al., 1999; Kitamura & Kawahara, 2009; Miyazaki et al. 2009; Montti et al., 2011; Clark et al., 2015; Ely, comunicación personal). Los ciclos de floración en bambúes leñosos varían en función de su forma de vida, la latitud y las características genéticas propias de cada especie (Franklin, 2004; Tachiki et al., 2015; Wang et al. 2016). A grandes rasgos, se reconocen tres patrones que se describen a continuación:

1- Floración gregaria, que consiste en la floración masiva de especies típicamente monocárpicas (Clark et al. 2015), cuya floración se sincroniza entre diferentes poblaciones de la misma especie, en un lapso que puede extenderse entre 1-7 años (Pearson et al., 1994; Judziewicz et al., 1999; Franklin, 2004; Abe & Shibata, 2012; 2014; Dalagnol et al., 2018; Ely et al. 2019). En este tipo de eventos, la gran mayoría de las poblaciones concentran su floración en un mismo año, originando un pico de floración, producto de la activación de procesos regulatorios endógenos propios de la especie, que pueden estar influenciados por factores ambientales (Franklin, 2004). El tamaño y la distribución espacial de los genet, los procesos de competencia intraespecífica, limitaciones en la dispersión de los frutos y la reducción del fitness de la especie por entrecruzamiento pueden alterar la sincronización de las poblaciones, extendiendo la duración el evento de floración (Matsuo et al., 2014; Wang et al. 2016; Tachiki et al., 2015).

2- Floración esporádica o asincrónica, representa una variación del patrón anterior, donde no se ha logrado establecer un patrón en especies monocárpicas, dada la asincronía en los ciclos floración (Judziewicz et al., 1999; Kitamura & Kawahara, 2009; Abe & Shibata, 2012; Mizuki et al. 2014; Wang et al., 2016). Las causas de esta asincronía no han sido dilucidadas con exactitud; entre los factores que se manejan está la modificación de procesos regulatorios endógenos (mutaciones, supresión y/o expresión de genes de floración y factores de transcripción) (Zhang et al., 2012; Zeng et al., 2015; Wysocki et al., 2016).

3- Continuos, que consisten en una variación del patrón anterior, pero se distinguen por la presencia en cualquier época del año de un número variable de genet fértiles en la población (Clark, 1989; Clark et al., 2015; Ely et al., 2109), los cuales también han sido catalogados como policárpicas (Miyazaki et al., 2009; Ma et al., 2013; Matsuo et al., 2014). En las especies de floración regular policárpica, los eventos de floración no siempre conllevan a senescencia y muerte del genet materno; tal es el caso de *Guadua angustifolia* Kunth y *Guadua superba* Huber (Judziewicz et al., 1999; Londoño comunicación personal).

Los bambúes trepadores de bosques Atlánticos y nublados tropicales suelen seguir patrones de floración gregarios que se extienden un número variable de años con asincronía temporal entre poblaciones disyuntas de la misma especie (Pearson et al., 1994; Montti et al., 2011; Guerreiro, 2014). En contraste, los bambúes asociados a páramos y subpáramos presentan patrones de floración continuos (Clark, 1989; Judziewicz et al., 1999; Clark et al., 2015; Ely et al., 2019). La elevada frecuencia de eventos de floración asincrónicos observados en bambúes de ecosistemas parameros puede involucrar en algunos casos hasta el 40% de los individuos de la población (González-Mora, 2018) y se han observado en todas las especies venezolanas del subgénero *Swallemochloa* (Ely, comunicación personal).

Los patrones de floración asincrónicos y/o continuos incrementan la diversidad etaria de la población, así como su diversidad genética (Ely et al., 2019; Ma et al., 2013; Matsuo et al., 2014). Los estudios fenológicos en bambúes leñosos son algo limitados para la fecha, a causa de la extendida vida vegetativa de la mayoría de sus especies, que puede alcanzar 120 años en bambúes asiáticos (Makita, 1998; Clark et al., 2015) y 10 a 45 años en bambúes americanos de ecosistemas boscosos (Pohl, 1982; Pearson et al., 1994; Judziewicz et al., 1999; Montti et al., 2011; Clark & Ely 2013, Guerreiro 2014). Hasta la fecha, no existen estudios detallados que involucren la fenología y dinámica poblacional en bambúes leñosos de ecosistemas andinos, cuyos ciclos de floración son presumiblemente cortos en representantes del subgénero *Magnifoliae*, dada la alta incidencia de individuos fértiles observados en campo (Ely, comunicación personal).

Observaciones de campo realizadas por la primera autora desde el año 2006 en diferentes poblaciones de *Chusquea mollis* en los Andes venezolanos sugieren que la especie obedece un patrón de floración estrictamente monocárpico, que conlleva a la senescencia y muerte del genet en un lapso generalmente de dos a tres años; sin embargo, no está claro si los eventos de floración ocurren de manera sincronizada o no. Tanto los eventos de floración sincrónicos como los asincrónicos contribuyen a mantener la diversidad genética en plantas clonales con ciclos de floración largos como los bambúes leñosos (Ely et al., 2019); sin embargo, su influencia en la composición etaria de la población debe variar, en función del patrón de floración de la especie. La floración gregaria sincrónica origina poblaciones de estructura etaria relativamente homogéneas, a diferencia de la floración asincrónica y/o continua que promueve poblaciones heterogéneas, con representación de diferentes grupos etarios.

Teniendo en consideración la complejidad de los patrones de floración en bambúes leñosos andinos y la escasa información disponible, nos planteamos analizar el patrón de floración de *Chusquea mollis*, en función de los siguientes objetivos:

- 1- Establecer el patrón fenológico de la especie y su duración, estimada a partir de los eventos de floración, basándonos en los registros de floración disponibles a partir de colecciones depositadas en herbarios e información recopilada en colecciones depositadas de diferentes salidas de campo realizadas desde el año 2006.
- 2- Establecer la composición etaria en una población determinada de la especie, asumiendo que los eventos de floración gregaria originan poblaciones de composición etaria homogénea y los asincrónicos poblaciones heterogéneas, para lo cual es necesario determinar la representatividad de cada grupo etario y su distribución en el bosque.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

Chusquea mollis (Swallen.) L.G. Clark. Syst. Bot. 39(3). 2014. Sinónimo: *Neurolepis mollis* Swallen, J. Wash. Bambúes cespitosos de rizomas paquimorfos, de 2-7 m de altura. Culmos erguidos (1,5-4 m x 0,4-1,5 cm), firmes, no ramificados, con 1 yema/nudo; entrenudos de 2-5 mm de longitud, lisos, sólidos. Hojas caulinares poco desarrolladas hasta ausentes. Hojas del follaje grandes (0,8-1,5 m x 4-6 cm), coriáceas. Panículas terminales, espiciformes (40-100 cm de largo x 3-6 cm de ancho), espiguillas pardas, uniflorescúculadas, de 3,5 a 4,8 mm de largo, no aristadas.

2.2. DISTRIBUCIÓN Y HÁBITAT

Chusquea mollis crece en subpáramos y páramos húmedos de Venezuela y Colombia, en un gradiente de elevación situado entre 2450-3500 m snm (Judziewicz 1999, Cuello et al. 2010) asociado a claros del bosque paramero y cañadas. En Venezuela, la distribución de esta especie es muy discontinua y se restringe a páramos húmedos de los estados Mérida (Mun. Libertador y Obispo Chacón, páramos La Aguada y Las Coloradas, Parque

Nacional Sierra Nevada), Táchira (Mun. Junin, Páramo de Tamá, Parque Nacional Tamá) y Trujillo (Mun. Boconó, Páramo de Guaramacal) (Ramírez et al. 2009, Cuello et al. 2010, Briceño et al. 2010, Ely, comunicación personal).

El presente estudio se enfocó en dos poblaciones de *C. mollis* de la Sierra Nevada de Mérida, asociadas a la vegetación de transición entre el bosque nublado montano alto y el páramo propiamente dicho denominado bosque paramero o bosque pre-paramero (Ramírez et al. 2009). La estratificación y composición florística de esta formación varía en función de la altitud y la orientación en la cordillera, pudiendo ser de tres o cuatro estratos.

Estudios florísticos previos realizados en el Páramo La Aguada, al Norte de la Cordillera por Yáñez (1998), Berg & Suchi (2002), Ramírez et al. (2009) indican que esta formación se compone de árboles de altura variable, generalmente de 4-12 m representados por *Podocarpus oleifolius*, *Ocotea calophylla*, *Schefflera rufa*, *Clusia multiflora*, *Cecropia santanderensis*, *Cybianthus marginatus*, *Drymis granadensis*, *Escallonia sp.*, *Gaiadendron punctatum*, *Hedyosmum racemosum*, *Gynoxis meridana*, *Miconia latifolia*, *M. tinifolia*, *Oreopanax chrysoleucum*, *Vallea stipularis*, *Ugni myricoides* y *Weinmania glabra*; helechos arborescentes como *Cyathea caracasana*, arbustos de 1,5-2,0 m de altura representados principalmente por *Lybanothamnus lucidus*, *L. neerifolia*, *Psaamisia penduliflora*, *Themistoclesia dependens*, *Vaccinium meridionale*, arbustos esclerófilos enanos (0,30-1,2 m) representados principalmente por *Arcytophyllum nitidum*, *Chaetolepis lindeniana*, *Hesperomeles ferruginea*, *Hypericum laricifolium*, *Gaultheria myrsinoides*, *Pentacalia andicola* y *Valeriana parviflora*, bambúes leñosos como *Chusquea mollis* y *C. spencei*, rosetas caulescentes, principalmente *Espeletia schultzii* y *Ruilopezia atropurpurea*, sufrutices como *Monochaetum meridensis*, *M. humboldtianum* y *Monnina meridensis*, hierbas erectas y prostradas, siendo las más comunes *Lachemilla hirta*, *Lobelia ternera*, *Geranium chamaense* y *Orthosanthus chimboracensis*, gramíneas en macolla como *Calamagrostis effusa* y *Cortaderia nitida*, helechos de los géneros *Blechnum*, *Elaphoglossum* y *Jamesonia canescens* y una importante diversidad de briófitos.

2.3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN FENOLÓGICA

Los registros de floración se basaron en información recopilada a partir de *exicatas* del herbario MERC (Instituto Jardín Botánico, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes), MER (Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA), MERF (Facultad de Farmacia y Bionálisis, ULA), PORT (Universidad Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora), VEN (Herbario Nacional, Fundación Instituto Botánico de Venezuela Tobías Lasser, Universidad Central de Venezuela y las colecciones depositadas en el herbario MO (Missouri Botanical Garden), disponibles en la base de datos TROPICOS (www.tropicos.org). La información obtenida a partir de observaciones de campo se recaudó de salidas realizadas desde el año 2006-2018 al Páramo La Aguada (08°35' N, 71° 09' O, 2800-3320 m snm) y el supáramo Las Coloradas (8°28'80,5"N; 71°57'02,7"O, 2700-2820 m snm), ambos forman parte del Parque Nacional Sierra Nevada de Mérida, en la Cordillera de Mérida.

2.4. ESTUDIO POBLACIONAL

Los censos poblacionales se realizaron en el año 2018, en una población ubicada a 2930 m snm, asociada al bosque paramero que colinda con el Páramo la Aguada, adyacente a la estación del teleférico que lleva el mismo nombre. En dicha área, se censaron todos los individuos (plántulas, juveniles y adultos) presentes en dos parcelas de 10 m², separadas 12 m lineales, ubicadas a lados opuestos del sendero principal. Sin embargo, también se contabilizaron individuos que crecían fuera de las parcelas a lo largo de un gradiente de elevación 2930-3200 m snm. Los individuos de *Chusquea mollis* forman macollas discretas, por lo que usualmente es relativamente sencillo distinguir un individuo de otro, particularmente en el caso de las plántulas e individuos juveniles.

Los individuos adultos pre y post-reproductivos se concentran en los claros naturales del bosque, creciendo junto a bambúes arbustivos como *C. spencei* y ocasionalmente con bambúes trepadores como *C. aff. serrulata*. En contraste, tanto las plántulas como los individuos juveniles de los primeros estadios (<3 años) crecen en las condiciones umbrófilas que proporciona el sotobosque del bosque paramero.

2.5. CARACTERÍSTICAS MICROCLIMÁTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Estación La Aguada se ubica a 3452 m snm y forma parte del sistema Teleférico Mukumbarí, ubicado al norte de la ciudad de Mérida. El clima de La Aguada corresponde a un páramo húmedo, con un patrón de precipitaciones bimodal (Andressen y Ponte 1973). Los meses más lluviosos suelen ser mayo y octubre, los secos enero y febrero. La precipitación media anual en esta localidad es de 1811 mm; sin embargo, es probable que esta cifra haya incrementado en los últimos años, aunque no se disponen de registros continuos que apoyen esta afirmación. La temperatura media anual en la Estación La Aguada es de 7 °C, las temperaturas máximas promedio en horas de mediodía son 24 °C y la mínima registrada en horas de madrugada -0,9 °C. La humedad relativa en la Aguada promedio es de 76 %, pudiendo incrementar a 97 % en días lluviosos y descender a 60 % en días soleados.

Los suelos en el Parque Nacional Sierra Nevada son muy heterogéneos, corresponden a suelos jóvenes de tipo inceptisoles y entisoles, de textura franco a franco arenosa, ricos en materia orgánica y nitrógeno, de pH ligeramente ácido y baja capacidad de intercambio catiónico en general (Ramírez et al. 2009).

3. RESULTADOS

3.1. ESTUDIO FENOLÓGICO DE LA ESPECIE

La información derivada de las escasas colecciones de herbario disponibles para esta especie se recopiló a partir de las colecciones depositadas en MERC, PORT y MO (Apéndice 1), puesto que no se encontraron *exicatas* de esta especie depositadas en los herbarios MER, MERF ni VEN. Los especímenes de *C. mollis* depositados en MERC proceden todos de páramos del Estado Mérida, ubicados en la Sierra Nevada de Mérida, específicamente los páramos La Aguada y Las Coloradas. Hasta la fecha, no se han localizado poblaciones creciendo en los páramos de Sierra La Culata, ni *exicatas* de la especie depositadas en herbarios locales, posiblemente por el hecho de que los páramos de dicha sierra son más secos, abiertos y también más intervenidos. La revisión realizada en la base de datos disponible en línea (www.tropicos.org) reveló la existencia de *exicatas* depositadas en MO procedentes de Colombia (Norte de Santander y Antioquia) y Venezuela (Mérida, Táchira, Trujillo).

Los registros de floración de *C. mollis* en los Andes venezolanos, obtenidos a partir de las colecciones de herbario y de los registros obtenidos en las salidas de campo aportan información para un lapso de 74 años, en el cual se han contabilizado un total de 17 eventos de floración para la especie; de los cuales 11 corresponden a registros de Venezuela (Fig. 1). En Venezuela, el 60 % de los eventos registrados corresponden a las poblaciones de los páramos La Aguada y Las Coloradas, ubicados en el Parque Nacional Sierra Nevada de Mérida, Estado Mérida.

La alta frecuencia con la que ocurren los eventos de floración, que sugieren intervalos muy cortos de 5-7 años (Fig. 1), aunque la ausencia de registros de floración correspondientes a los períodos 1997-2004, 2008-2012, 2014-2015 impiden determinar con exactitud la frecuencia y duración estos eventos. Basándonos en este registro, podríamos sugerir dos patrones de floración en *C. mollis*:

- 1- Patrón de floración gregario, en intervalos muy cortos (5-7 años), cuya duración se extiende de 1-3 años (Fig. 1), en cuyo caso se esperaría encontrar una estructura etaria relativamente homogénea en las poblaciones censadas.
- 2- Patrón de floración mixto, que involucra ciclos de floración gregarios que se solapan con eventos de floración asincrónicos aislados. La elevada frecuencia de eventos reproductivos, que combina ciclos sincrónicos y asincrónicos originan poblaciones heterogéneas, conformada por diferentes grupos etarios (juveniles de diferentes edades con adultos adultos pre y post reproductivos).

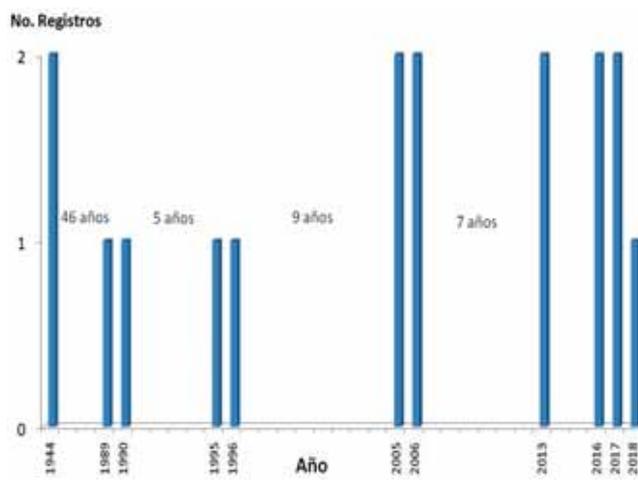


Figura 1. Eventos de floración registrados en poblaciones de *C. mollis* de la Cordillera de Mérida, Venezuela.

3.2. COMPOSICIÓN ETARIA DE LA POBLACIÓN DEL PÁRAMO LA AGUADA

Los censos preliminares realizados en el año 2018 revelaron una densidad de individuos relativamente baja en la población, de 152 individuos en el área total muestreada a lo largo de un gradiente de elevación de 62 m en La Aguada. La composición de la población resultó heterogénea, con representantes de todos los grupos etarios: plántulas (individuos de 5-10 cm de alto), juveniles en diferentes estados de desarrollo (20-100 cm), adultos jóvenes pre-reproductivos (130-180 cm), adultos en floración y adultos post-reproductivos senescentes (altura >2,0 m) (Figura 2 A-D). Sin embargo, es importante acotar que la representatividad de cada grupo en la población no fue equitativa, dado la mayor proporción de individuos estaba conformada por juveniles de diferentes edades (Figuras 3 A). El grupo de los adultos estaba conformado por un número variable de adultos jóvenes en estado vegetativo, adultos en floración y adultos en diferente estado de senescencia (post-reproductivos), cuya proporción era ligeramente mayor a la del resto del grupo de adultos (Figura 3 B).



Figura 2. A: Plántula en el sotobosque. B: Individuo juvenil. C: Adulto reproductivo. D: Adulto en estado vegetativo (pre-reproductivo).

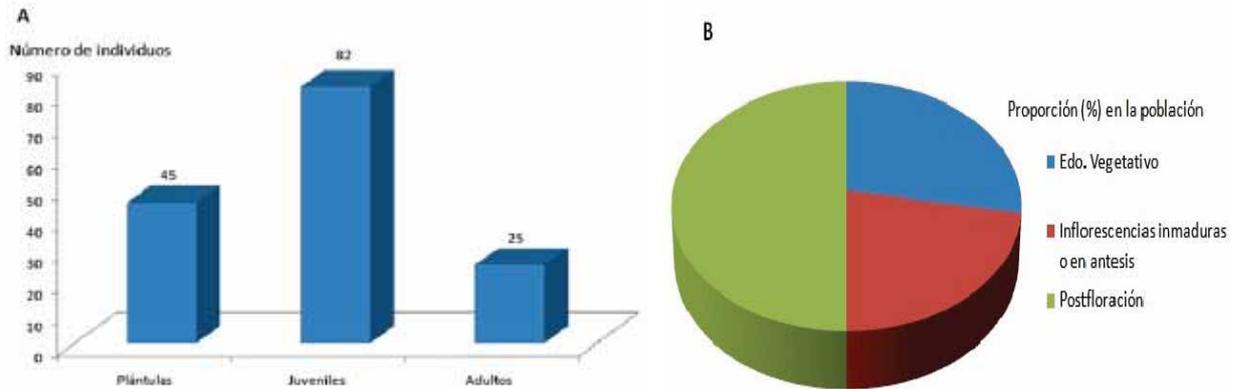


Figura 3. A: Número de individuos contabilizados de cada grupo etario en la población de *Chusquea mollis* ubicada en el páramo La Aguada durante los años 2017-2018. **B:** Proporción de individuos adultos en estado vegetativo, en estado reproductivo y post-reproductivo.

4. DISCUSIÓN

La alta proporción de juveniles respecto a los otros grupos sugiere la predominancia de ciclos de floración gregarios, que ocurren en intervalos cortos (5-7 años) que se extienden de 1-3 años, que se combinan con eventos de floración asincrónicos observados previamente en bambúes andinos pertenecientes al subgénero *Swallemochloa* (Judziewicz et al. 2009, Clark et al. 2015, González-Mora 2018, Ely comunicación personal) y en bambúes arbustivos del género *Sasa* en bosques montanos de Japón (Ma et al. 2013, Mizuki et al. 2014).

El ciclo de floración de *C. mollis*, de acuerdo a los resultados del presente estudio son más cortos que los reportados en bosques neotropicales andinos y Atlánticos (Pohl et al., 1982; Judziewicz et al., 1999; Clark & Ely, 2013; Montti et al., 2011; Guerreiro et al. 2014).

Aún cuando el presente estudio no contempló determinar la producción de frutos viables en *C. mollis*, se presume que es baja, dado que cada adulto fértil forma un mínimo de 2-4 sinflorescencias cuya longitud excede generalmente 1,0 m, y cada una porta un número elevado de espiguillas que deberían en conjunto aportar una lluvia de frutos abundante en el sitio, por lo que se esperaría encontrar bancos de plántulas más densos en las parcelas y en consecuencia, poblaciones con mayor densidad de individuos por superficie.

La viabilidad de los frutos en bambúes leñosos tiene una duración relativamente limitada, generalmente de pocas semanas (Judziewicz et al., 1999), por lo que la dispersión juega un papel muy importante. En la gran mayoría de los casos, los frutos caen al suelo cerca de la planta materna, con menor frecuencia, son dispersados por animales mediante epizootocoria (Judziewicz et al., 1999). La producción de frutos puede variar mucho en los diferentes grupos de bambúes leñosos; con mucha frecuencia se encuentran poblaciones bambúes arbustivos del subgénero *Swallemochloa* como *C. angustifolia*, *C. spencei* y *C. guirigayensis* que producen inflorescencias que no forman cariopsis (Clark, 1989; Ely comunicación personal), lo cual confirma que no todos los genets aportan propágulos fértiles en la misma proporción durante los eventos de floración, dado que la producción de los frutos en bambúes leñosos también es influenciada por el fitness del genet (Matsuo et al., 2014).

También es importante tomar en cuenta otros factores que limitan la viabilidad de los frutos, así como el establecimiento y sobrevivencia de plántulas. Entre los principales factores que influyen en el reclutamiento de plántulas está la distribución espacial de los genets adultos, la estructura del sotobosque, la temperatura del aire y del suelo al momento de la dispersión y la radiación incidente que reciben las plántulas durante su fase de establecimiento (Muñoz et al., 2012; De La Fuente & Pacheco, 2017; Matsuo et al., 2018).

Estudios ecofisiológicos preliminares en juveniles y adultos de esta especie en el sitio de estudio indican que tanto las plántulas como las juveniles que ocupan el estrato más bajo del sotobosque reciben niveles de radiación bajos ($60-80 \mu\text{mol fotón m}^{-2} \text{s}^{-1}$) debido a que la vegetación del bosque paramero intercepta una proporción muy alta de la radiación incidente, la cual a su vez está afectada por la elevada nubosidad que caracteriza los páramos húmedos como La Aguada (González-Figueroa, 2019). Por lo tanto, es factible que tanto la calidad como la cantidad de radiación incidente contribuyan regular la densidad poblacional de *C. mollis*. Sin embargo, es fundamental realizar un estudio de viabilidad de los frutos detallado, aunado a un seguimiento regular del desarrollo de los individuos de los diferentes grupos etarios, así como estudios microclimáticos en el sitio para determinar con mayor precisión los factores que limitan la densidad poblacional en esta especie. También es aconsejable continuar censos poblacionales de esta especie, en diferentes localidades, en intervalos regulares, con el objeto de comprender con mayor precisión su dinámica poblacional y regeneración en ecosistemas andinos.

Los estudios fenológicos durante períodos de tiempo extendidos en ecosistemas de alta montaña pueden resultar complejos, ya sea por dificultades para acceder a los sitios de observación, o por la aparición inesperada de factores imprevistos como perturbaciones naturales o de origen antrópico que afectan las poblaciones de estudio. En el caso específico de los Andes venezolanos, este último factor ha cobrado mucho peso a causa del progresivo avance de la frontera agrícola y asentamientos humanos desde comienzos del siglo XX, que han originado la sustitución de una parte importante de la vegetación autóctona por cultivos de rubros alimenticios, ganadería de altura la extracción de leña (Monasterio and Molinillo 2003, Ely comunicación personal).

La formación boscosa y el páramo al Norte del Parque Nacional Sierra Nevada, adyacente a la estación La Aguada está actualmente muy conservada, a diferencia de la porción sur del al misma formación montañosa, donde se ubica el subpáramo Las Coloradas; que pese a formar parte del mismo parque nacional, no ha recibido el mismo estatus de área protegida; en consecuencia, el bosque paramero se encuentra severamente fragmentado y alterna con pastizales de altura, originados por la eliminación de grandes porciones de bosque para el establecimiento de la ganadería de altura, cultivos y extracción de leña (Ely, comunicación personal).

Tomando en consideración la distribución restringida y el tamaño limitado de las poblaciones de esta especie en la Cordillera de Mérida, se recomienda realizar un seguimiento de las poblaciones de *C. mollis* en los Andes venezolanos, e implementar medidas destinadas a proteger y conservar los páramos húmedos, que representan el único hábitat de esta especie.

5. REFERENCIAS

- Abe, Y., Shibata, S. (2012). Spatial and temporal flowering patterns of the monocarpic dwarf bamboo *Sasa veitchii* var. *hirsuta*. *Ecological Research*. DOI: org/10.1007/s11284-012-0933-9
- Andressen, R. & Ponte, R. (1973). Climatología e hidrología. Proyecto 18 de Estudio Integral de las cuencas de los ríos Chama y Capazón. Subproyecto II. Universidad de los Andes-Corpoandes. Mérida-Venezuela.p.135.
- Berg, A. & Suchi, S. (2002). La vegetación de los Páramos La Aguada, La Fría y Espejo en Los Andes Venezolanos. *Plantula*, 3(1), 47-64.
- Clark, L.G. (1989). Systematics of *Chusquea* Section *Swallenochloa*, Section *Verticillatae*, Section *Serpentes* and Section *Longifoliae* (Poaceae-Bambusoideae). *Systematic Botany Monographs*, 27, 1-127.
- Clark L.G., Ely F. (2011). Géneros de bambúes (Poaceae: Bambusoideae: Arundinarieae, Bambuseae) leñosos de Venezuela. *Acta Botánica Venezolánica*, 34(1), 79-103.

- Clark L.G., Ely, F. 2013. Two New Species of *Chusquea* (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae) from Venezuela and a Redescription of *Chusquea purdieana*. *Systematic Botany*, 38,1–9. doi 10.1600/036364413X674922.
- Clark, L.G., Londoño, X. & Ruiz-Sanchez, E. (2015). Bamboo Taxonomy and Habitat. En: Liese, W., Köhl, M. (Ed.). *Bamboo, the plant and its uses*. Heidelberg, Germany, Springer Verlag. *Tropical Forestry Series*, 10: 1-30. doi 10.1007/978-3-319-14133-6_1.
- Cuello, N. & A. M. Cleef (2009). The páramo vegetation of Ramal de Guaramacal, Trujillo State, Venezuela. 1. Zonal communities. *Phytocoenologia*, 39 (3), 295–329. 1926.
- Cuello, N. L., Cleef, A. M. & Aymard, G. (2010). Phytogeography of the vascular páramo flora of Ramal de Guaramacal (Andes, Venezuela) and its ties to other páramo floras. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 67(2), 177-193.
- Dalagnol, R., Wagner, F. H., Galvão, L. S., Nelson, B. W., L. E., Oliveira & Aragão de, C. (2018). Life cycle of bamboo in the southwestern Amazon and its relation to fire events. *Biogeosciences*, 15, 6087–6104. DOI: 10.5194/bg-15-6087-2018
- De la Fuente, A. & Pacheco, N. (2017). Biomasa, producción de semillas y fenología de *Chusquea montana* tras su floración masiva y sincrónica en el Parque Nacional Puyehue, Chile. *Bosques*, 38(3): 599-604. DOI: 10.4067/S0717-92002017000300018
- Ely, F., Rada, F., Fermin, F., Clark, L. G. (2019). Ecophysiology and genetic diversity in species of the bamboo *Chusquea* in the high Andes, Venezuela. *Plant Ecology and Diversity*. DOI: 10.1080/17550874.2019.1673847.
- Ely, F., Clark, L. G. En prensa. *Bambúes amenazados de la flora Venezolana*. Aceptado en el *Libro Rojo de la Flora Venezolana*, segunda edición, que publicará la gerencia de Desarrollo e Investigación de la Fundación Instituto Botánico de Venezuela.
- Fadrique, B., Pianissola, E. M., Feeley, K. J., & Clark, L. G. (2019). A preliminary revision of *Chusquea* sect. *Swallemochloa* (Bambuseae, Bambusoideae, Poaceae) in Peru including the description of two new species and the resurrection of two other species. *Phytotaxa*, 418(2), 171-194.
- Fisher, A.E., Triplett, J.K., Ho, C.S., Schiller, A.D., Oltrogge, K.A., Schroder, E.S., Kelchner, S.A. & Clark, L. G. (2009). Paraphyly in the bamboo subtribe *Chusqueinae* (Poaceae: Bambusoideae) and a revised infrageneric classification for *Chusquea*. *Systematic Botany*, 34. 673–683.
- Fisher, A.E., Clark, L. G., Kelchner, S. A. (2014). Molecular Phylogeny Estimation of the Bamboo Genus *Chusquea* (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae) and Description of Two New Subgenera. *Systematic Botany*. doi: 10.1600/036364414X681554.
- Franklin, D.C. (2004) Synchrony and asynchrony: observations and hypotheses for the flowering wave in a long-lived semelparous bamboo. *Journal of Biogeography* 31: 773–778.
- González-Figueroa, J. V. (2019). *Respuesta Ecofisiológica y estructura morfoantómica foliar de individuos juveniles y adultos de Chusquea spectabilis LG Clark (Subgénero Magnifoliae, Bambusoideae, Bambusae, Poaceae)*. Trabajo especial de Grado de para optar al título de Licenciado en Biología, Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- González-Mora, R. D. (2018). *Variabilidad genética intra-poblacional de Chusquea guirigayensis Niño, L. G. Clark & Dorr, en el Páramo Piedras Blancas - Los Romeros (Mérida, Venezuela)*. Trabajo especial de Grado de para optar al título de Licenciado en Biología, Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

- Guerreiro, C. (2014). Flowering cycles of woody bamboos native to southern South America. *Journal of Plant Research*. doi: 13.1007/s10265-013-0593-z.
- Insuasty-Torres, J. (2015). *Variación espacio-temporal de la estructura poblacional de Chusquea tessellata Munro (Poaceae: Bambusoideae) a lo largo de un gradiente altitudinal en el parque nacional natural Chingaza*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Judziewicz, E. J., Clark, L. G., Londonño X. & Stern, M. J. (1999). *American Bamboos*. Washington, D. C.: Smithsonian Institution.
- Kitamura, K., Kawahara, T. (2009). Clonal identification by microsatellite loci in sporadic flowering of a dwarf bamboo species, *Sasa cernua*. *Journal of plant Research*. doi: 10.1007/s10265-009-0220-1.
- Ma, Q., Q., Song, H. X., Zhou, S. Q., Yang, W.Q., Li, D. S. & Chen, J. S. (2013). Genetic Structure in Dwarf Bamboo (*Bashania fangiana*) Clonal Populations with Different Genet Ages. *PLoS ONE* 8(11): doi:10.1371/journal.pone.0078784.
- Makita, A. (1998). The Significance of the Mode of Clonal Growth in the Life History of Bamboos. *Plant Species Biology*, 13,85-92.
- Matsuo, A., Tomimatsu, H., Suzuki, J.I., Saitoh, T., Shibata, S., Makita, A., Suyama, S. (2014). Female and male fitness consequences of clonal growth in a dwarf bamboo population with a high degree of clonal intermingling. *Annals of Botany*, 114,1035–1041.doi:10.1093/aob/mcu176.
- Matsuo, A., Tomimatsu, H., Sangetsu, Y., Suyama, Y., Makita, A. (2018). Genet dynamics of a regenerating dwarf bamboo population across heterogeneous light environments in a temperate forest understory. *Ecology & Evolution* 2018: 1-2. DOI: DOI: 10.1002/ece3.3793
- Miyazaki, Y., Ohnishi, N., Takafumi, O., Hiura, T. (2009). Genets of dwarf bamboo do not die after one flowering event: Evidence from genetic structure and flowering pattern. *Journal of Plant Research* 122(5):523-8. DOI: 10.1007/s10265-009-0241-9
- Mizuki, I., Sato, A., Matsuo, A., Suyama, Y., Suzuki, J-I., Makita, A. (2014). Clonal Structure, Seed Set, and Self-Pollination Rate in Mass-Flowering Bamboo Species during Off-Year Flowering Events. *PLoS ONE*9: e105051. DOI:10.1371/journal.pone.0105051
- Monasterio, M. & Molinillo, M. (2003). Los páramos de Venezuela. En: Hofstede, R., Segarra, P., Mena, M. (Ed.). *Los páramos del mundo*. Quito, Ecuador. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. *Global Peatland Initiative/ NC-IUCN/ Ecociencia*. p. 205-236.
- Montti, L., Campanello, P.I., Gatti, M.G., Blundo, C., Austin, A.T., Sala, O.E. & Goldstein, G. (2011). Understory bamboo flowering provides a very narrow light window of opportunity for canopy-tree recruitment in a neotropical forest of Misiones, Argentina. *Forest Ecology and Management*, 261,1360-1369. doi: 10.1016/j.foreco.2011.06.029.
- Muñoz, A. A., González, M. E., Celedón, C. & Veblen, T. T., Respuesta inicial de la regeneración arbórea luego de la floración y muerte de *Chusquea culeou* (Poaceae) en bosques andinos del centro-sur de Chile. *Bosque*, 33, 2, 153-162, 2012 DOI: 10.4067/S0717-92002012000200005.
- Pearson, A.K., Pearson, O.P. & Gómez, I. (1994). Biology of the bamboo *Chusquea culeou* (Poaceae, Bambusoideae) in southern Argentina. *Vegetatio*, 111, 93-126.

- Pohl, R. (1982). On the flowering of bamboos in Central America. *Brenesia*, 19/20: 465-475.
- Ramírez, L., Llambí, L. D., Schwarzkopf, T., Gámez, L. E. & N. J. Márquez. (2009). Vegetation structure along the forest – páramo transition belt in the sierra nevada de mérida: implications for understanding treeline dynamics. *ECOTROPICOS*, 22, 2: 83-98.
- Tachiki, Y., Makita, A., Suyama, Y., Satake, A. (2015). A spatially explicit model for flowering time in bamboos: long rhizomes drive the evolution of delayed flowering. *Journal of Ecology*, 103, 585–593. DOI: 10.1111/1365-2745.12390.
- Vorontsova, M.S., Clark, L.G., Dransfield, J., Govaerts, R. & Baker, W.J. (2016) *World Checklist of Bamboos and Rattans*. INBAR
- Technical Report No. 37. International Network of Bamboo & Rattan, Beijing, China, 466 pp.
- Wang, W., Franklin, S. B., Lu, Z., Rude, B. J. (2016) Delayed Flowering in Bamboo: Evidence from *Fargesia qinlingensis* in the Qinling Mountains of China. *Frontiers in Plant Science*. DOI: 10.3389/fpls.2016.00151
- Wysocki, W.P., Ruiz-Sanchez, E., Yin, Y., Duvall, M. (2016). The floral transcriptomes of four bamboo species (Bambusoideae; Poaceae): support for common ancestry among woody bamboos. *BMC Genomics* 17, 384. DOI:10.1186/s12864-016-2707-1
- Yáñez, P. (1998). Caracterización florística en un sector de cambio páramo- selva nublada en el parque nacional Sierra Nevada, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 42(1), 51-62.
- Zhang, X. M., Zhao, L., Larson-Rabin, Z., Li, D. Z., Guo, Z. H. (2012). De Novo sequencing and characterization of the floral transcriptome of *Dendrocalamus latiflorus* (Poaceae: Bambusoideae). *PLoS ONE* 7:e42082. DOI: 10.1371/journal.pone.0042082
- Zeng, H. Y., Lu, Y. T., Yang, X. M., Xu, Y. H., and Lin, X. C. (2015). Ectopic expression of the BoTFL1-like gene of *Bambusa oldhamii* delays blossoming in *Arabidopsis thaliana* and rescues the *tfl1* mutant phenotype. *Genet. Mol. Res.* 14, 9306–9317. DOI: 10.4238/2015.August.10.11.

APÉNDICE 1. *Exicatas* de herbario de *Chusquea mollis*.

1- COLOMBIA.

- 1.1. Santander: E.P. Killip & Albert C. Smith 15830, 1926, MO.
- 1.2. Santander: L.G. Clark & J. Cavalier 291, 1982, MO , L.G. Clark 296, 1982, MO.
- 1.3. Antioquia: J.M. MacDougal, F. J. Roldán & J.C. Betancur, 1989, MO.

2- VENEZUELA.

- 2.1. Mérida: J. Steyermark 56512, 1944 MO; Ricardi et al. s/n, 1989, MERC; Ely et al. 38, 43, 2006, MERC; Ely et al. 48, 2013, MERC, Ely et al. 53, 2017, MERC.
- 2.2. Táchira: 1944, J. Steyermark 57199, 57400, MO.
- 2.3. Trujillo. L.J. Dorr et al. 7368, 1990, MO.



Uso sostenible del bambú divulgado a través de actividades de extensión universitaria: proyecto y construcción de pérgola para biciletario

Sustainable use of bamboo disclosed through university extension activities: project and construction of a pergola for bicycle rack

Andrea Jarramillo⁽¹⁾
Sumara Lisbôa⁽²⁾
Tamara Goularte⁽³⁾
Lisiane Librelotto⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Universidad Tecnológica Equinoccial,
Ecuador.
andresalome@gmail.com

⁽²⁾ Universidad Federal de Santa Catarina,
Brasil.
arquitetasumara@gmail.com
tamaraolivogoularte@gmail.com
lisiane.librelotto@gmail.com

Recibido: 18 de Junio, 2019
Aceptado: 10 de Noviembre, 2019

Doi: <http://dx.doi.org/10.24133/ciencia.v22i1.1271>

"THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED."

RESUMEN

Este artículo es uno de los resultados del proyecto de extensión: "Uso sostenible del bambú en la construcción: cubierta para biciletario en la UFSC", ejecutado en la Universidad Federal de Santa Catarina. Con un enfoque práctico, el objetivo fue divulgar el conocimiento entre la comunidad y miembros de la universidad, motivando hábitos de manejo de bambú más sostenibles para su aplicación en pequeñas estructuras. En este texto, son presentados los antecedentes y el proceso de ejecución del proyecto, que fue dividido en tres etapas: cosecha y tratamiento del bambú, proyecto participativo, prefabricación y montaje de la pérgola en el campus universitario. Fueron utilizados culmos de bambú de las especies *Dendrocalamus asper* y *Phyllostachys aurea*, provenientes de macollas localizadas en el campus universitario. La técnica constructiva utilizada consideró el montaje rápido y la facilidad de mantenimiento de la estructura.

Palabras claves:

Bambú. Diseño participativo. Extensión universitaria Sostenibilidad.

ABSTRACT

This paper is a result of the extension project "Sustainable use of bamboo in construction: roof for bike rack at UFSC", executed in the *Universidade Federal de Santa Catarina*. With a practical approach, the objective was to disseminate knowledge among the community and members of the university, motivating more sustainable bamboo management habits for its application in small structures. In this text, the antecedents and the process of execution of the project are presented. The project was composed by three stages: bamboo harvesting and treatment; participatory project; prefabrication and assembly of the pergola in the university campus. Bamboo culms of the species *Dendrocalamus asper* and *Phyllostachys aurea*, originating

from clumps located inside the campus, were used. The constructive technique used provides quick assembly and easy maintenance of the structure.

Keywords:

Bamboo. Participatory design. Sustainability. University extension program.

1. INTRODUCCIÓN

El bambú es un recurso natural renovable de rápido crecimiento y muchas de sus especies poseen características que permiten su aplicación en la construcción, más aún en la actualidad por la creciente atención a los impactos de la construcción civil al medio ambiente.

Brasil es el país de América del Sur que posee más especies de bambú, sean endémicas o introducidas por la propia población. En áreas rurales este material es utilizado en la construcción de elementos sencillos y temporales como cercas, gallineros, entre otros.

En el caso de la ciudad de Florianópolis, Greco (2013) indica que en la isla, donde se asienta parte de la ciudad, existen varias especies de bambúes nativos y exóticos. Hay pocos casos en que el material es aplicado en la construcción y generalmente es utilizado como elemento decorativo, estructura provisional o complementaria. Los culmos usados en estas construcciones en muchos casos provienen de otras regiones, porque, aunque hay presencia de bambusales en la isla, las macollas no pasan por un manejo adecuado y tampoco existen proveedores del material (Jaramillo; Valle; Librelotto, 2018).

Aunque el bambú por sus características es considerado un material de bajo impacto ambiental, las prácticas constructivas con las que es aplicado en la construcción no siempre son sostenibles. Esto se debe a varios motivos, entre ellos la explotación de las macollas sin pensar en mantenerlas saludables para su aprovechamiento futuro y el uso de culmos que no están secos ni tratados, sin considerar las especificaciones técnicas que el bambú necesita para tener un buen desempeño en las construcciones, la falta de conocimiento sobre el mantenimiento de las edificaciones con este material.

En muchos lugares de Florianópolis, el bambú crece sin control, por ejemplo, en el camino que lleva del centro hacia *Lagoa da Conceição* o en el campus de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), localizado en el barrio Trindade. En estos lugares los culmos suelen ser usados esporádicamente por vecinos y miembros de la comunidad universitaria sin mayor conocimiento del cuidado o manejo sostenible y sin buscar el aprovechamiento del bambú de una manera más eficiente en la construcción.

Las macollas de bambú necesitan ser manejadas para mantenerlas aireadas, saludables y productivas. Para esto es necesario retirar los culmos más antiguos, dando espacio y nutrientes a los brotes que nacen cada año (Pereira; Beraldo, 2016). Saber identificar los culmos maduros entre los nuevos es parte del proceso de manejo, también es importante conocer la época más apropiada para el corte de los culmos, que es en invierno en el caso de las regiones del Sur y de preferencia en la fase lunar del cuarto menguante (Morán, 2002), cuando la mayor cantidad de líquidos está en las raíces de los culmos. Estos conocimientos son importantes para garantizar la conservación de este recurso en la naturaleza.

Por otro lado, para potencializar el desempeño del bambú en la construcción de estructuras es necesario el uso de culmos maduros, porque son los que poseen la resistencia más adecuada. Éstos están aptos y listos para la construcción de estructuras, cuando su edad está entre 3 - 6 años y no presentan defectos (Hidalgo-López, 2003; Pereira y Beraldo, 2016).

En este sentido, es fundamental la divulgación de estas buenas prácticas, principalmente cuando el bambú es utilizado en la construcción de estructuras pequeñas que son construidas en minga, porque es una forma de educar a la comunidad por medio de acciones sencillas y fáciles de incorporar a la rutina.

La existencia de una macolla de bambú de la especie *Dendrocalamus asper* en las inmediaciones del Departamento de Botánica de la UFSC y otra de la especie *Phyllostachys aurea* en las proximidades del nuevo edificio del rectorado, durante años motivó la realización de prácticas de bioconstrucción dentro del campus universitario.

El *D. asper*, conocido como bambú gigante o bambú balde, es una especie paquimórfica utilizada con frecuencia en la construcción debido a su grande tamaño, resistencia y durabilidad (Pereira; Beraldo, 2016). El bambú de la especie *P. aurea*, conocido coloquialmente en la región como *cana da Índia*, es leptomórfico y generalmente utilizado en la elaboración de muebles y estructuras pequeñas.

Con estos antecedentes se propuso el proyecto de extensión: "Uso sostenible del bambú en la construcción: cubierta para ciclistario en la UFSC", ejecutado entre julio de 2018 y enero de 2019 en el campus universitario, gracias a un trabajo conjunto entre el grupo de investigación Virtuhab de la Facultad de Arquitectura, el curso de Botánica y la Asociación Catarinense del Bambú - BambuSC. Se desarrollaron actividades teórico prácticas en tres etapas: a) manejo de las macollas, corte, tratamiento y secado del bambú, b) diseño participativo de la cubierta del ciclistario, y c) construcción de la cubierta. En todas estas actividades participaron en total 41 personas, entre estudiantes y docentes de la UFSC, miembros de la BambuSC y de la comunidad en general.

Este artículo tiene un enfoque práctico y describe las actividades que se realizaron en el proyecto de extensión, con el objetivo de diseminar el conocimiento y motivar hábitos más sostenibles de manejo del bambú para su aplicación en pequeñas estructuras.

2. CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE CON BAMBÚ

En la construcción sostenible con culmos de bambú, es necesario considerar las necesidades de los usuarios para elaborar el proyecto arquitectónico, así como los costos y las características del material (incluyendo su origen). Para el proceso de diseño debe tenerse en cuenta la especie de bambú que será utilizada y sus propiedades físico mecánicas, lo que será determinante para decidir la cantidad del material y los detalles constructivos de las conexiones.

Es importante destacar que los bambúes deben ser utilizados cuando presentan un contenido de humedad de 12%, se debe observar la linealidad en las diferentes regiones del culmo (cepa, basa y sobrebasa), las características de la parte externa o interna, de la región de los nudos y entrenudos; todos estos aspectos definen la densidad y la resistencia mecánica del material (Drumond; Wiedman, 2017).

El proceso inicia con el corte de los culmos, considerando el manejo sostenible de la planta, para permitir que sea posible su aprovechamiento futuro. Asumiendo que los culmos antiguos ya fueron retirados durante manejos anteriores, deben seleccionarse los culmos maduros para el corte, o sea, aquellos que tienen entre 3-6 años. Éstos deben tener pequeñas manchas como líquenes u hongos en el córtex, lo que indica su madurez, a diferencia de los culmos más jóvenes que son lisos y con manchas blanquecinas.

Después, es necesario dar un tratamiento preservante a los culmos para protegerlos del ataque de insectos y hongos, así como de la humedad y otros factores que los puedan deteriorar. Para este fin, existen dos tipos principales de métodos: físicos y químicos. El tratamiento químico, utilizando las proporciones correctas, debe evitar el surgimiento de insectos y no ser tóxico al ser humano o a los animales. Ya el tratamiento físico, también

conocido como curado, tiene la finalidad de remover, destruir o reducir el almidón del culmo y consecuentemente, disminuir las probabilidades de ataque de los insectos (Hidalgo-López, 2003).

El curado puede ser realizado por avinagrado, inmersión en agua, acción del fuego o del humo. Para curar los culmos con fuego es necesario calentarlos, cuando recién cortados, directamente con un soplete, para eliminar la savia por expulsión, con este calentamiento se busca alterar químicamente el almidón, tornando el bambú menos atractivo para los insectos (Pereira; Beraldo, 2016).

Según Kleine (2010), el tratamiento de curado por fuego es comúnmente aplicado en especies del género *Phyllostachys*, porque poseen una característica exclusiva: al ser sometidos a un alto calentamiento los culmos recién cortados pasan por un brusco cambio de coloración, pasando de verde para beige. La savia es expulsada a través de la superficie externa de los culmos y puede ser removida con un trapo impregnado de diésel, dejando la superficie con un aspecto brillante, como si estuviera barnizada.

Luego de las etapas de corte y tratamiento de los culmos, para su uso en la construcción son necesarias tres etapas más: 1) la elaboración del proyecto ejecutivo detallado, explicando todas las características de elementos y conexiones; 2) la capacitación y orientación de mano de obra y 3) la implementación de una unidad de prefabricación de los componentes, que cuente con equipos y una infraestructura adecuada (Pereira et al., 2012).

Finalmente, para un mejor desempeño relacionado a la durabilidad del bambú, es necesario considerar la protección de este material de la humedad y de la incidencia directa de los rayos solares, como lo indica el conocimiento popular: las construcciones con bambú deben tener botas y sombrero, refiriéndose a una base elevada del suelo y amplios aleros en la cubierta.

Sin embargo, como indicado por Jaramillo (2019), hay dos formas de abordar la durabilidad y sostenibilidad de las construcciones de bambú. La primera consiste en buscar extender al máximo la vida útil del material y de la edificación; la segunda es diseñar edificaciones con elementos de bambú que puedan ser sustituidos a lo largo de su vida útil. El segundo caso es aplicable principalmente en áreas rurales, donde hay macollas de bambú próximas y disponibilidad de personas que ejecuten las sustituciones de las piezas; en estos casos el tratamiento preservante del bambú no necesita ser tan agresivo, ya que se reconoce la característica natural que tiene el material para descomponerse naturalmente en el medio, causando un menor impacto al ambiente.

3. PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS

Con el objetivo de dar destaque a todo el proceso necesario para garantizar un uso sostenible del bambú en la construcción y para el desarrollo de las actividades, se proponen tres etapas descritas a continuación. Al inicio de cada una de ellas se compartieron contenidos teóricos sobre los que se basaron las actividades prácticas.

En este estudio de caso, para la construcción de la cubierta del bicicletario, se utilizaron bambúes de dos especies disponibles en el campus universitario: *D. asper*, y *P. aurea*, es importante destacar que cada especie de bambú requiere procesos distintos de tratamiento.

3.1 MANEJO DE LAS MACOLLAS, CORTE, TRATAMIENTO Y SECADO DEL BAMBÚ

La primera actividad del proyecto fue el manejo de la macolla *D. asper*, ubicada en las inmediaciones del Departamento de Botánica/UFSC, que ocurrió durante la primera semana de agosto en la fase lunar del cuarto menguante. Considerando las dimensiones de los culmos y el aprovechamiento del tiempo, el corte fue realizado utilizando una motosierra (figura 1), varias cuerdas, guantes para la protección individual, etc.

La elección de los culmos respetó el tiempo de maduración y la uniformidad dimensional del diámetro, a aquellos con exceso de hongos y atacados por insectos fueron retirados de la macolla y descartados, para aprovechar los culmos sanos y más rectilíneos.



Figura 1. Corte de *D. asper*.

Para esta especie se adoptó tratamiento químico con pentaborato de sodio al 5% aplicado por el método de inmersión vertical. Después del corte fueron perforados internamente los nudos de los culmos (con excepción del último de la base) con el auxilio de una varilla de acero de $\frac{3}{8}$ y un taladro (figura 2a). Posteriormente se colocaron los bambúes en posición vertical, con la base dentro de un tambor metálico de 200 l, colocando la solución química en el extremo superior de los culmos y dejando que descendiera por gravedad, hasta llenar todo el largo del culmo. Se tuvo el cuidado de mantener el interior del culmo lleno durante todo el tiempo de tratamiento (figura 2b).



Figura 2. Perforación de los nudos (izquierda) y tratamiento de los culmos por inmersión vertical (derecha).

Los culmos permanecieron en el tratamiento durante una semana, después, fueron retirados del tanque y apoyados verticalmente en la pared para el proceso de secado durante tres meses, hasta que alcanzaron la humedad de equilibrio higroscópico. Debido a la estación lluviosa, las bases de varios bambúes se humedecieron y sufrieron ataque de hongos, por este motivo, después de llevarlos al laboratorio de Sistemas Constructivos del departamento de Arquitectura y Urbanismo /UFSC, fueron cortados unos centímetros de los extremos dos culmos y después se realizó una limpieza manual de cada uno utilizando vinagre.

El día 5 de octubre se realizó el corte de los bambúes de la especie *P. aurea*, localizadas en el campus universitario, frente al edificio nuevo del rectorado. Por ser un bambú leptomorfo, fue más fácil acceder para escoger los culmos. Sin embargo, por la falta de manejo, esta fue una actividad que necesitó de mucho esfuerzo de los participantes para encontrar culmos con dimensiones uniformes y que no mostraran señales de ataque de insectos.

Los culmos fueron cortados con sierras de mano y serruchos, que sirvieron también para retirar las ramas (figura 3). En seguida los bambúes fueron transportados para el laboratorio y colocados en posición vertical, apoyados en la pared.



Figura 3. Corte de *P. aurea*.

Los culmos de esta especie fueron sometidos al tratamiento por fuego, utilizando soplete (figura 4 izquierda). Antes de este procedimiento, se perforaron internamente los nudos de los bambúes y también se limpió externamente el córtex con queroseno. Como ya estaba previsto, cambió el color de los bambúes (figura 4 derecha).



Figura 4. Tratamiento del bambú con fuego (izq.) y cambio de color de los culmos tratados (der.).

En esta actividad de tratamiento de los culmos de *P. aurea* con fuego, participaron estudiantes de los dos paralelos de la materia de Tecnología de la Edificación II de la carrera de Arquitectura y Urbanismo /UFSC.

3.2. DISEÑO PARTICIPATIVO DEL BICICLETARIO

Después que la materia prima (culmos) estuvo lista, se lanzó una convocatoria abierta en redes sociales, páginas web institucionales y con afiches, para llamar a los interesados en participar del proceso de diseño de la estructura del bicicletario.

Así, el día marcado para realizar el taller de diseño, se contó con la participación de 14 personas, entre voluntarios externos y miembros de la comunidad universitaria. Se inició con una introducción teórica sobre el uso de bambú en la construcción y los principios para la aplicación del material en edificaciones (como detalles y conexiones), aquí se contó con la colaboración de un experto en el uso estructural del bambú.

Se presentaron las condicionantes del proyecto: ubicación, entorno, materiales y herramientas disponibles, características de las especies de los bambúes utilizados, presupuesto y demandas de los usuarios: cubrir el bicicletario, dejar visible la estética de los culmos, dar soporte a plantas trepadoras, facilitar el montaje y mantenimiento de la estructura, pensando en un proyecto modular con elementos prefabricados.

Finalmente, los participantes comenzaron a trabajar en sus propuestas de proyecto (figura 5), algunos optaron por trabajar individualmente y otros en parejas. El objetivo era contar con varias propuestas para el proyecto del bicicletario al concluir la jornada. Durante esta actividad, los facilitadores estuvieron disponibles en caso de dudas, también se tenía libros y otras fuentes de información para auxiliar en el desarrollo de los proyectos.



Figura 5. Taller de diseño participativo del proyecto de la estructura de bambú.

Este trabajo fue desarrollado con la metodología de taller colectivo, en una mesa de trabajo donde, aunque cada uno estuviera trabajando en su propuesta, era posible conversar con el resto de participantes para intercambiar ideas y resolver dudas.

Los materiales utilizados para el desarrollo de las propuestas dependían de lo que cada uno necesitaba: papel, lápiz, reglas, palillos para las maquetas, etc. El final del día, cada uno presentó su propuesta, explicando las características principales y las ventajas. El resultado de la jornada fueron 6 propuestas del proyecto del biciletario (figura 6).

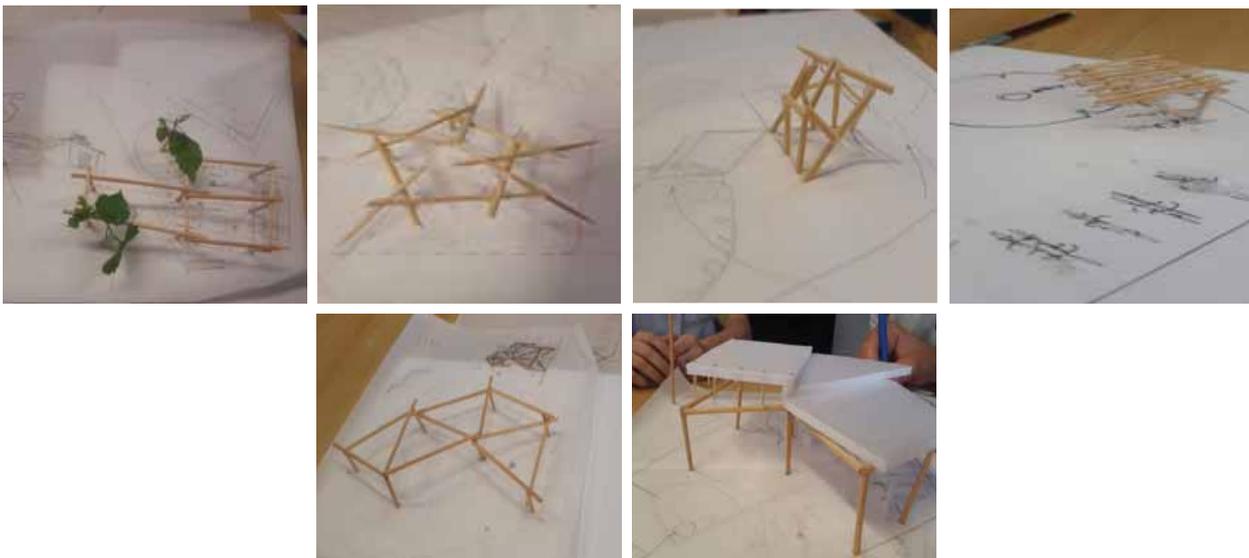


Figura 6. Propuestas de proyecto resultantes del taller (maquetas de estudio).

Frente a la dificultad para concretar la decisión por solo uno de los proyectos o la fusión entre varios, se optó por realizar un segundo encuentro, invitando a los usuarios para presentarles las propuestas y escuchar sus opiniones. Esto resultó en la elección de dos proyectos, que fueron los que mejor atendieron a las condicionantes iniciales.

En ese segundo encuentro, los usuarios solicitaron la retirada de la cubierta en lona plástica, con el objetivo de priorizar la estética del material sin importar la cantidad o frecuencia de mantenimientos que requiera la estructura. Incluso después que fueron avisados sobre la necesidad de mantener la cobertura para prolongar la durabilidad de los culmos, los usuarios dijeron que, debido a la disponibilidad de la macolla cerca del local de la construcción, sería posible hacer las sustituciones de las piezas cuando fuera necesario.

De esta manera, el equipo desarrolló de forma más detallada la propuesta final, en maqueta física y digital, considerando principalmente las mejores características constructivas de las dos opciones que habían sido escogidas. El resultado final fue una fusión entre las propuestas con una creación de 3 módulos estructurales,

cada un compuesto de 3 pilares que sostienen 3 vigas unidas formando un triángulo, sobre las que se apoyan varios culmos de *P. aurea* que proporcionan un efecto de sombra (figura 7).



Figura 7. Modelo tridimensional del proyecto. Fuente: Franchesca Medina (colaboradora del proyecto).

Una vez concluida esta etapa, fue posible desarrollar los detalles constructivos y continuar con la fase final del proyecto de extensión con la ejecución de la propuesta arquitectónica.

3.3 PREFABRICACIÓN Y MONTAJE DE LA ESTRUCTURA

Durante los meses de noviembre y diciembre de 2018 fueron prefabricados los módulos estructurales. Como punto de partida se prepararon los culmos de *D. asper*, limpiándolos externamente con vinagre y después de una semana se aplicó en ellos dos manos de Stain (figura 8).



Figura 8. Limpieza y aplicación de Stain en las piezas de *D. asper*.

En esta etapa se prefabricaron los principales componentes: los pilares y las vigas. Los culmos de *D. asper* fueron cortados siguiendo las medidas indicadas en el proyecto utilizando una sierra circular y una motosierra, para las conexiones fueron utilizadas barras roscadas $\frac{3}{8}$, tuercas y arandelas, ambos inox.

Los extremos de los culmos utilizados para la formación de los triángulos fueron cortados en ángulo de 30° para el encaje y como solución para la conexión de esas piezas, también se utilizaron barras roscadas $\frac{3}{8}$, tuercas y arandelas inox. La figura 9 muestra varios momentos de la prefabricación de estos componentes.



Figura 9. Prefabricación de los triángulos de vigas.

Para proteger los extremos de los culmos, se colocaron bases de botellas PET, las cuales fueron moldeadas al bambú con ayuda de un soplador térmico 1800 W. En los pilares los cortes fueron rectos, y en la parte superior de cada fueron fijados dos piezas de bambú o piezas de refuerzo, sobre las cuales serían apoyadas las vigas unidas en triángulos (figura 10).



Figura 10. Colocación de botellas PET, pilares con refuerzos. Fuente: autores.

Al concluir el proceso de prefabricación, los componentes fueron transportados cerca del lugar del montaje, los pilares fueron guardados en un local cerrado y los triángulos, debido a la mayor dimensión, dejados al aire libre, por debajo de un alero y suspendidos del suelo. Debido a un período de lluvia observamos la acumulación de agua pluvial y surgimiento de hongos en las puntas de las vigas. Hubo la necesidad de retirar las botellas PET y dejar las vigas al aire libre, después de una semana, los hongos habían desaparecido.

Para proteger la base de los pilares del contacto directo con el suelo, se realizó un cimiento con tubos de cemento, dejándolos a 50 cm sobre el suelo. Los diámetros de estos tubos siguen el patrón de soporte para 3 pilares con diámetro de 100 cm, para 2 con 60 cm y 1 con 20 cm (figura 11 arriba). Los tres módulos de vigas unidas en forma triangular se utilizaron para la demarcación de las fundaciones (figura 11 abajo).



Figura 11. Tubos de cemento para fundición (arriba) y demarcación con la ayuda de los módulos (abajo).

Después de la instalación de los tubos de cemento, éstos fueron llenados con tierra apisonada y sólo en los 10 centímetros finales fueron concretados, para después apoyar aquí los pilares. En ellos se fundieron dos varillas de $\frac{3}{8}$ para la fijación posterior de los pilares a la fundación, envueltos en tubo de PVC 40 mm para hormigonado. La determinación del diámetro del PVC ocurrió a partir del promedio de los diámetros internos de los culmos (figura 12).



Figura 12. Detalles de la instalación de los tubos prefabricados cementantes.

Después del tiempo de curado del concreto, con la impresión de hojas naturales (como acabado), se realizó la simulación del montaje de la estructura para observar su comportamiento estructural. A partir de la evaluación colectiva entre los participantes, se realizaron amarras entre los 3 triángulos y los pilares y entre las vigas paralelas (figura 13).



Figura 13. Imágenes de la estructura terminada.

De esa forma, las etapas finales siguieron el siguiente orden:

- amarre de los culmos más pequeños sobre las vigas con hilo de poliamida número 6;
- amarre de los tres módulos triangulares con los pilares y entre las vigas paralelas;
- aprieto de las tuercas en las conexiones metálicas;
- y, por último, la última mano de pintura con *Stain*.

La pérgola recibirá en sus bases plantas trepadoras ornamentales, escogidas por los usuarios. De esta forma, demarcará el espacio del bicicletario y atraerá a más visitantes al jardín de la Facultad de Botánica, motivando también para el uso del bambú.

En la pérgola será colgada una placa con informaciones sobre el bambú y el proceso de construcción, explicando los motivos de cada decisión tomada.

Al concluir el proyecto, fue escrito y entregado a los usuarios un manual de uso, para orientar el mantenimiento constante que requiere una obra con culmos de bambú sin cubierta, principalmente, la pintura y la sustitución de culmos que estén en proceso de deterioro.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La planificación de una construcción sostenible con bambú en un proyecto de extensión, requiere una organización que en realidad no depende exclusivamente del proyectista. Por la falta de culmos provenientes de macollas manejadas en el mercado, la preparación del material a ser utilizado en una obra exige mucho esfuerzo y la participación de varios actores.

Por otro lado, la concepción de un proyecto con uso de bambú en actividad de extensión, tipo taller colectivo, trae cualidades estéticas y funcionales por la pluralidad de ideas y contribuciones. Además, permitió a los alumnos de arquitectura (y simpatizantes oriundos de la comunidad) la aproximación con las condicionantes de diseño y detallamiento de proyectos con culmos de bambú.

Considerando la mano de obra voluntaria y los objetivos del proyecto, se adoptaron soluciones simples para la ejecución.

El proceso de preparación de las piezas de bambú fue complejo, debido a la falta de personas más experimentadas y por la alta rotatividad de participantes en el proyecto. Muchos encajes podrían haber sido elaborados de manera más eficiente y con más precisión, evitando así aberturas que puedan propiciar la entrada de animales y humedad en la estructura final.

También, por la dificultad en mantener un equipo "fijo" de trabajo, los voluntarios que participaron en la primera etapa, no fueron los mismos de la segunda o de la tercera. Probablemente esto también depende del interés de aprendizaje de cada uno o de la disponibilidad en las fechas establecidas.

La humedad fue un problema que apareció en casi todas las etapas del desarrollo del proyecto de extensión. Trabajar en área abierta, en época lluviosa y dejar los 3 módulos expuestos debido a la falta de local para almacenamiento trajo retrasos en el cronograma y en la finalización de la obra.

La solución adoptada con botellas PET para protección de las puntas de los culmos no funcionó cuando éstas se quedaron en forma de vaso (y no se adhirieron bien al culmo). Esto ocurrió principalmente en los bambú de mayor tamaño y por la dificultad en encontrar botellas del mismo diámetro. La solución fue retirar las botellas para no acumular humedad y propiciar la aparición de agentes de degradación.

En general, esa actividad, estrechó las relaciones de cooperación entre los departamentos de Arquitectura y de Botánica en la UFSC, abriendo un espacio para reflexión en el modo de hacer construcciones con bambú que tenga en su proceso, de la concepción a la ejecución, la interrelación con la biología y la ecología.

5. CONSIDERACIONES FINALES

El proyecto de extensión permitió divulgar el conocimiento de hábitos de manejo sostenible del bambú para la construcción de pequeñas estructuras y contó con la participación de 35 personas externas, gran parte sin alguna o poca experiencia con el uso de culmos de bambú en la construcción civil. Sin embargo, las actividades fueron desarrolladas con poca dificultad.

Se observó en el transcurso del proyecto de extensión, la gran demanda por este tipo de actividad y la necesidad en posibilitar la participación de la comunidad y el conocimiento sobre los procesos adoptados.

Se trataron temas tanto para el manejo de las macollas, como para la construcción sostenible con culmos de bambú, considerando todo el proceso como un todo: desde la cosecha hasta la fase final de montaje. Donde lo más importante no fue divulgar el producto construido sino el proceso sostenible de manejo del recurso.

En este sentido, el proyecto hizo uso de material existente en la UFSC y alrededores, caracterizándose así, por el uso de un material local y de bajo impacto para resolver una necesidad específica. El bajo impacto del material fue garantizado al no utilizar tratamientos químicos agresivos, permitiendo su degradación natural debido a la exposición a la intemperie, como fue solicitado por los usuarios.

Frente a esta situación, el diseño consideró que las piezas de bambú puedan ser reemplazadas con facilidad si así se lo considera necesario durante las inspecciones y acciones de mantenimiento. De esta forma, cuando se necesite sustituir elementos de bambú, el proceso de corte, tratamiento y secado será replicado, posibilitando continuar con la divulgación de la realización adecuada de estas actividades.

Es así que al finalizar este proyecto se afirma que fue posible divulgar el manejo y uso adecuados del bambú en la construcción por medio de técnicas simples y fáciles de replicar.

6. AGRADECIMIENTOS

A todos los involucrados en cada una de las etapas de ejecución de este proyecto de extensión, profesores, alumnos de la UFSC, miembros de la comunidad. A la BambuSC, a los departamentos de Botánica y Arquitectura. A SENESCYT y CAPES por las becas de Postgrado de miembros del equipo ejecutor.

7. REFERENCIAS

- Drumond, P. & Wiedman, G. (2017). "Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia". 655 p. 1 ed. Rio de Janeiro Instituto Ciência Hoje.
- Greco, T. (2013). "Diversidade de bambus (Poaceae: Bambusoideae) na Ilha de Santa Catarina (dissertação de mestrado)". Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. Disponible en: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107251>

- Jaramillo, A., Valle, Â. & Librelotto, L. (2018). "Inspección y estado de conservación de edificaciones de bambú en el litoral de Santa Catarina – Brasil". Proceedings of the 11th World Bamboo Congress. Part 3. 325 – 338. Disponible en: <http://worldbamboo.net/proceedings/wbcxi>
- Jaramillo, A. (2019). "Manifestações patológicas e decisões projetuais que incidem na durabilidade do bambu em edificações no Sul do Brasil". 281 p. Tesis (Doctorado) - Curso de Arquitetura y Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Hidalgo, O. (2003). "Bamboo, The gift of the gods". Bogotá: Bamboscar. 553 p.
- Morán, J. (2002). "Traditional bamboo preservation methods in Latin America". INBAR technical report 25, 72p.
- Pereira, M., Carrara, H., Barata, T., Valarelli, I. & Azambjua, M. (2012). "Projeto de Produção e Processo de Pré-fabricação de Componentes de Bambu". In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 13. Vitória. 10 p.
- Pereira, M., Beraldo, A. (2016). "Bambu de corpo e alma". 2. Ed. Bauru: Canal 6 Editora. 348 p.

Caracterización físico-mecánica de biotableros estructurales compuestos tipo sándwich – Alternativa de pared portante en construcciones no-convencionales

Physical-mechanical characterization of structural biocomposite sandwich-like panels – A load-bearing wall alternative for non-conventional constructions

Nathaly Andino ⁽¹⁾
Andrés García ⁽¹⁾
Oswaldo Mauricio González ^{(1) (2)}

⁽¹⁾ Carrera de Ingeniería Civil,
Departamento de Ciencias de la Tierra y
Construcción, Universidad de las Fuerzas
Armadas – ESPE, Sangolquí, Ecuador.
nsandino@espe.edu.ec
magarcia19@espe.edu.ec

⁽²⁾ School of Engineering and Built
Environment, Griffith University
Gold Coast campus, QLD 4222, Australia
m.gonzalezmosquera@griffith.edu.au

Recibido: 18 de Junio, 2019
Aceptado: 10 de Noviembre, 2019

<http://dx.doi.org/10.24133/ciencia.v22i1.1273>

“THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED.”

RESUMEN

La utilización de materiales tradicionales como elementos de mampostería en construcciones convencionales constituye una de las mayores causas de muerte durante eventos telúricos debido a su efecto de volcamiento. En Ecuador persiste la utilización de estos materiales a pesar de estar localizado en una zona de alto riesgo sísmico, y en un territorio privilegiado en recursos naturales que no son explotados adecuadamente. La presente investigación tiene por finalidad caracterizar físico-mecánicamente prototipos de biotableros estructurales compuestos tipo sándwich como alternativa de pared portante en construcciones no-convencionales que fomenten el desarrollo sustentable de biomateriales de la zona. 46 muestras extraídas de dos prototipos se ensayaron de acuerdo a la normativa vigente ASTM bajo los modos mecánicos de compresión, flexión, tracción y corte con sus respectivas densidades y contenidos de humedad. Los resultados experimentales fueron validados mediante 40 análisis de elementos finitos procesados en el software LS-Dyna, que a su vez permitieron establecer una proyección de sus capacidades estructurales bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados obtenidos reflejan biotableros con una excelente flexibilidad y resistencia mecánica que a su vez se traduce en un alto comportamiento dúctil; lo que permitirá disminuir efectos adversos durante eventos sísmicos de alta magnitud y duración.

Palabras Clave:

Caracterización mecánica de biomateriales, cross laminated timber, *Dendrocalamus asper*, engineered wood products, modelamiento y análisis de elementos finitos, *Ochroma pyramidale*.

ABSTRACT

The use of traditional materials as masonry elements in conventional constructions is one of the major causes of injuries and death due to the overbalance effect produced during telluric events. Nonetheless,

traditional materials are still widely used as part of the Ecuadorian construction industry despite the Country is located in both a high-risk seismic region and a territory privileged by natural resources that in turn are not properly exploited. Hence, this research aims to physically and mechanically characterize sandwich-like structural biocomposite panels as feasible alternative for load-bearing walls in non-conventional constructions that promote biomaterials sustainability. To fulfill the purpose in this study and according to the current ASTM standards, 46 samples from two biopanel prototypes were tested under the mechanical modes of compression, bending, tension and shear with their corresponding densities and moisture contents. Furthermore, the experimental results were validated by means of finite element analyses using the LS-Dyna software, to then calculate the biopanel structural capacities under different loading conditions. The acquired results show biopanel with an excellent flexibility and mechanical resistance that in turn reflects high ductile performance during progression of stresses; this will definitely allow reducing the abovementioned adverse effects during seismic events of high magnitude and duration.

Keywords:

Biomaterial mechanical characterization, cross laminated timber, *Dendrocalamus asper*, engineered wood products, finite element modeling and analysis, *Ochroma pyramidale*.

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador, ubicado en una de las zonas de mayor riesgo sísmico del mundo, presenta una recurrencia de eventos telúricos cuyas magnitudes superan los 7 grados en la escala de Richter, los mismos que son provocados por procesos de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (Hibsch *et al.*, 1996). Según Rivadeneira *et al.* (2007), en el territorio ecuatoriano se han registrado más de 37 terremotos durante los últimos 458 años, con efectos destructivos y catastróficos [6,2 - 6,95 y > 8 grados en la escala de Richter, respectivamente (Stein & Wysession, 2009)]; a esta estadística se añaden 96 eventos sísmicos si se toman en cuenta los sismos con magnitudes inferiores a 7 grados en la escala de Richter.

El 16 de abril del 2016 se registró el evento sísmico de carácter catastrófico más reciente (7,8 grados en la escala de Richter), cuyo epicentro se localizó en la ciudad de Pedernales, provincia de Manabí. El evento sísmico ocasionó graves daños en zonas con altos niveles de pobreza, dejando un saldo de 35000 viviendas afectadas, de las cuales 19500 quedaron totalmente destruidas; resultado de ello 670 muertos y 6300 heridos (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016). En las zonas afectadas por el sismo predominaban edificaciones construidas con materiales convencionales (hormigón armado con paredes de bloque o ladrillo y estructuras de acero) que si bien presentan beneficios en cuanto a resistencia y durabilidad, al no contar con diseños adecuados y al presentar falencias durante el proceso constructivo, solo agravaron los efectos destructivos del sismo.

En el evento sísmico de abril del 2016, referido en este estudio como el “terremoto de las mamposterías”, el efecto de volcamiento ocasionado por la falla de las mamposterías de bloque y/o ladrillo causaron la mayor cantidad de muertos y heridos debido a su capacidad limitada en términos dinámicos y mecánico-estructurales; es decir, no están diseñadas para resistir y disipar cargas sísmicas (Páez, 2016). Adicional al problema mencionado, se suma que los materiales convencionales ocasionan un alto grado de contaminación ambiental durante sus fases de extracción y procesamiento de materias primas; es así que la industria de la construcción es la segunda en el país (después de la industria manufacturera) en emitir gases contaminantes al producir alrededor de 319.402 toneladas de gases al año entre ellos dióxido de Carbono (CO₂), cifra que aumenta periódicamente debido a prácticas ineficientes y tradicionales que no priorizan la conservación del medio ambiente (Ministerio del Ambiente, 2014). En este contexto, la construcción con biomateriales representa en la actualidad una alternativa eficiente; de hecho, construcciones de acero y concreto son 26% y 31%, respectivamente, más contaminantes que construcciones en base a cualquier tipo de biomaterial (Lippke *et al.*, 2010). En efecto, países como Estados Unidos de América,

Australia, Canadá, Japón, Inglaterra y Chile, cuentan con estándares constructivos que permiten realizar edificaciones de gran envergadura en base a biomateriales, siendo elementos derivados de diferentes especies de madera o residuos de ella, los que son más utilizados bajo el nombre de engineered wood products [EWP, (McKeever, 1997)]. En el Ecuador sin embargo, y a pesar de ser un país privilegiado en recursos naturales como la madera antes referida, no se han implementado soluciones técnicas que permitan modernizar los sistemas constructivos tradicionales en base a biomateriales, debido al desconocimiento de sus capacidades y potenciales aplicaciones; desaprovechando así más de 7 millones de hectáreas de especies forestales disponibles, entre las cuales se puede citar al bambú, palma de coco y balsa (Salazar 2014). Es de gran relevancia entonces, proponer sistemas que incluyan soluciones estructurales con elementos innovadores que cumplan con requerimientos de ingeniería y medio ambiente. La presente investigación tiene por objeto caracterizar las propiedades físico-mecánicas, así como analizar el comportamiento biomecánico y estructural de biotableros estructurales tipo sándwich compuestos de un núcleo de *Ochroma pyramidale* (balsa) y paneles externos bidireccionales de *Dendrocalamus asper* (bambú), para proponer su aplicación como pared estructural en construcciones ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico.

2. MATERIALES Y EQUIPO

Se diseñaron 2 prototipos de biotableros: (i) prototipo 1 [PB1, (1200 mm x 600 mm x 74 mm)] y prototipo 2 [PB2, (1200 mm x 600 mm x 124 mm)]. La figura 1 presenta la configuración del tablero estructural compuesto tipo sándwich, la misma que consta de un núcleo de balsa y 3 láminas bidireccionales de bambú que conforman los paneles externos.

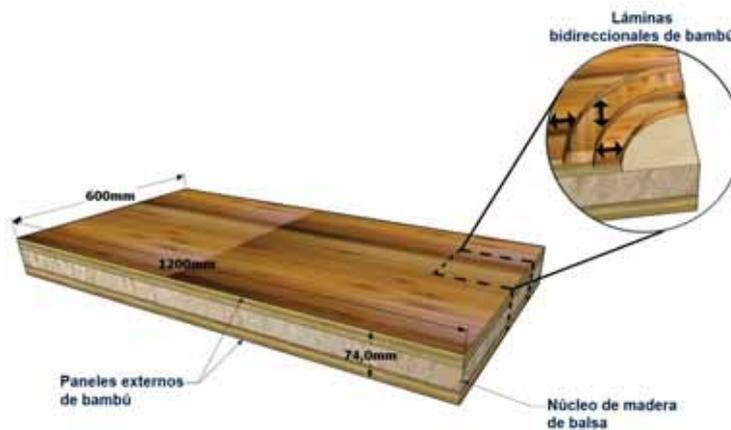


Figura 1. Prototipo de tablero estructural compuesto tipo sándwich elaborado con balsa y bambú.

Las láminas de bambú [módulo de elasticidad (MOE) paralelo a la fibra de 7420 MPa, densidad básica (d_b) de 658,42 kg/m³ al 14% de contenido de humedad (C.H)] se obtuvieron de un espécimen de aproximadamente 4 años de edad y 20 cm en promedio de diámetro exterior, que fue sometido a un proceso de latillado, curado, secado y cepillado. Se utilizó resina vinil acrílica como agente de unión entre latillas, mismas que se sometieron a una presión de 300 psi a 100°C durante 30 minutos para conformar el panel externo. El panel de núcleo de balsa tipo BALTEK® [módulo de elasticidad (MOE) paralelo a la fibra de 2526 MPa, densidad básica (d_b) de 148 kg/m³ al 12,6% de contenido de humedad (C.H)] se unió a los paneles externos con poliuretano de 2 componentes (Pur2C) para posteriormente prensarlo bajo los mismos parámetros de presión, temperatura y tiempo antes descritos, y así conformar el tablero compuesto como tal.

Los ensayos de laboratorio para caracterizar mecánicamente a los prototipos propuestos, se llevaron a cabo en una máquina de ensayos universales (UTM) de 300 kN de capacidad, marca AGS-X Shimadzu, equipada con un

video-extensómetro digital de procedencia japonesa [2 cámaras de alta resolución marca Kowa (f=25mm/F1,4 y HR F2,8/5mm)] para medir deformaciones unitarias; estos datos de deformación fueron verificados a través del uso de extensómetros de lámina (strain gauges) de 5 mm, adheridos a cada muestra mediante resina poliepóxido activada con un agente catalizador. Finalmente, para decodificar la información del extensómetro se utilizó un puente medidor de deformaciones Wheatstone marca Omega de 120 ohmios.

3. MÉTODOS

3.1. MODO MECÁNICO DE COMPRESIÓN

En concordancia con la ASTM C364/C364M-16 *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*, un total de 10 muestras sin defectos se ensayaron bajo el modo mecánico de compresión, 5 correspondientes al prototipo 1 (150 mm x 150 mm x 74 mm) y 5 del prototipo 2 (250 mm x 250 mm x 124 mm), como se muestra en la figura 2.

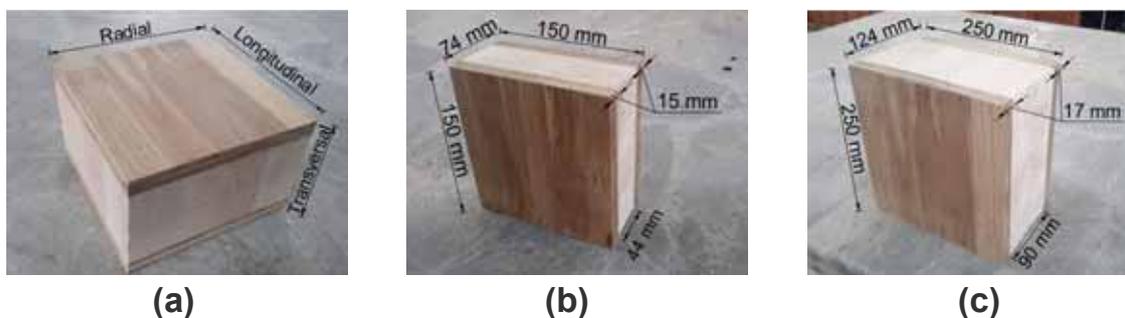


Figura 2. Muestras de tablero estructural compuesto tipo sándwich para pruebas de compresión (a) direcciones de carga, (b) muestra nominal del prototipo 1 y (c) muestra nominal del prototipo 2.

El ensayo consistió en la aplicación de carga axial sobre la muestra de tablero compuesto tipo sándwich, para esto la platina inferior de la UTM Shimadzu estuvo completamente fija, mientras que la placa superior (17 mm de espesor) se acopló sobre una rótula esférica para distribuir uniformemente la carga sobre la muestra. Para evitar los efectos de fricción entre la muestra y la máquina se colocó polvo de grafito entre las placas de carga y la muestra. El cabezal de la máquina se desplazó a una velocidad constante de 0.5 mm/min, logrando un tiempo de ensayo promedio comprendido entre 3 y 6 minutos. Debido a la reducción de la fricción entre placas y muestra, se anulan las tensiones producidas en el plano perpendicular, por lo tanto aplica la ley de Hooke (Ugural, 2008) a fin de calcular el módulo de elasticidad (MOE) en función del esfuerzo normal (σ) y la deformación unitaria (ϵ), como se indica en la ecuación 1.

$$\sigma_i = MOE_i * \epsilon_i \quad (1)$$

Aplicando el principio antes descrito, se determinó el módulo de elasticidad (MOE) en MPa, como la pendiente del rango lineal elástico de la curva esfuerzo-deformación unitaria; este valor es calculado únicamente bajo el presente modo mecánico ya que es una característica del material y no depende del tipo de aplicación de carga.

El módulo de ruptura en la dirección longitudinal [MOR_L , ver figura 2a], es la capacidad máxima que tiene un material para soportar cargas de tipo axial (Ugural, 2008), y en el presente estudio se lo calcula en base a la norma ASTM C364, mediante la ecuación 2.

$$MOR_L = F_{c_max} / (2 * w * f) \quad (2)$$

donde MOR_L está dado en MPa, F_{c_max} es la fuerza máxima en N, obtenida en el ensayo de compresión antes de que la muestra presente fallo mecánico, w es el ancho de la muestra en mm y f es el espesor de cada panel externo en mm.

3.2. MODO MECÁNICO DE FLEXIÓN

De acuerdo a la ASTM C393 *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*, un total de 10 muestras libres de defectos se ensayaron bajo el modo mecánico de flexión, de las cuales 5 muestras se tomaron del prototipo 1 (150 mm x 300 mm x 74 mm) y 5 muestras del prototipo 2 (250 mm x 500 mm x 124 mm) mm, como se muestra en la figura 3.

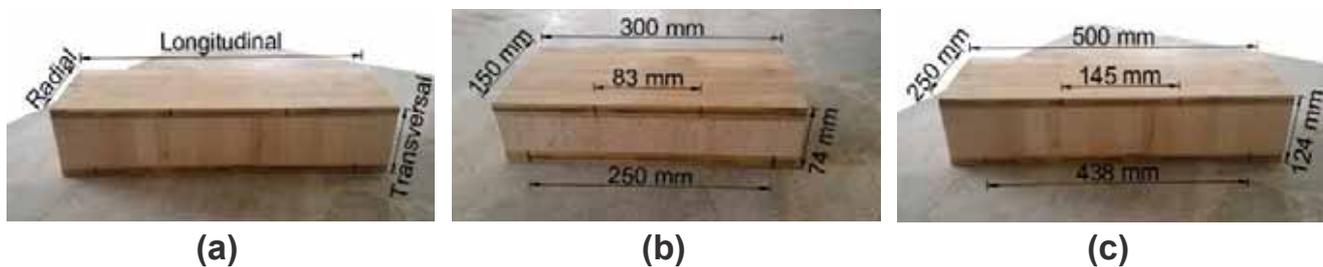


Figura 3. Muestras de tablero estructural compuesto tipo sándwich para pruebas de flexión (a) direcciones de carga, (b) muestra nominal del prototipo 1 y (c) muestra nominal del prototipo 2.

La configuración del ensayo de flexión a cuatro puntos, se realizó sobre dos apoyos fijos, en los cuales se colocó la muestra centrada para posteriormente aplicar carga mediante dos barras perpendiculares ubicadas equidistantemente sobre el tercio medio de la longitud entre apoyos (S); en los puntos de contacto entre muestra y barras de carga se colocaron almohadillas de caucho de 25 mm de ancho, 3 mm de espesor y 60 de dureza para evitar el daño local. La aplicación de carga se realizó a una velocidad constante de 0.5 mm/min durante un tiempo de ensayo comprendido entre 3 y 6 minutos.

El módulo de ruptura a flexión (MOR_{flex}) se define como la capacidad máxima de carga a flexión del tablero sándwich antes de llegar al fallo mecánico, éste parámetro se determinó en base a la ecuación 3 obtenida de la norma ASTM C393 como,

$$MOR_{flex} = (F_{flex_max} * S) / [3 * f * (d + c) * w] \quad (3)$$

donde, F_{flex_max} es la máxima fuerza en N, ejercida sobre la muestra previo al fallo mecánico del material, S es la longitud entre las barras de apoyo fijo en mm, f es el espesor de cada panel externo en mm, c es el espesor del panel de núcleo de balsa en mm, w es el ancho de la muestra en mm y d es el espesor total de la muestra en mm.

En los tableros compuestos tipo sándwich sometidos ante esfuerzos de flexión la falla predominante se da por corte en el material del núcleo, es por tanto preponderante el cálculo del esfuerzo máximo de corte (τ_{max}), mismo que se especifica en la norma ASTM C393, como se indica en la ecuación 4 (cuyos parámetros fueron previamente definidos en el párrafo anterior).

$$\tau_{max} = (F_{flex_max}) / [(d + c) * w] \quad (4)$$

3.3. MODO MECÁNICO DE TRACCIÓN

Conforme a la ASTM C297 *Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*, un total de 10 muestras libres de defectos se ensayaron bajo el modo mecánico de tracción, 5 muestras del prototipo 1 (50 mm x 50 mm x 74 mm) y 5 muestras del prototipo 2 (50 mm x 50 mm x 124 mm), como se muestra en la figura 4.

Previo al inicio del ensayo y para garantizar la distribución uniforme de la fuerza de tracción entre las muestras y la UTM, se adhirieron bloques de carga metálicos a los paneles externos usando masilla plástica poliéster. Posteriormente se colocó la muestra entre mordazas a presión y se aplicó carga de tracción progresiva perpendicular al plano de los paneles externos. La aplicación de carga se realizó a una velocidad constante de 1 mm/min durante un tiempo comprendido entre 3 y 6 minutos.

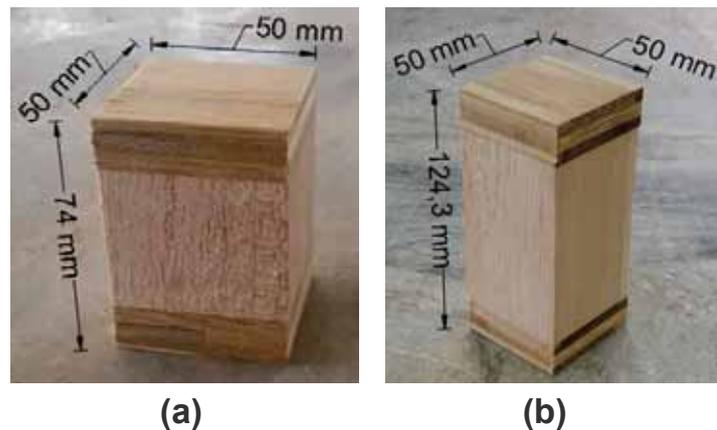


Figura 4. Muestras de tablero estructural compuesto tipo sándwich para pruebas de tracción (a) muestra nominal del prototipo 1 y (b) muestra nominal del prototipo 2.

El módulo de ruptura del modo mecánico de tracción (MOR_{tr}) refleja la máxima capacidad de resistir esfuerzos de tracción aplicados en sentido perpendicular al plano de los paneles externos (Ugural, 2008); este valor se calculó según la norma ASTM C297, mediante la ecuación 5,

$$MOR_{tr} = F_{T_{max}}/A \quad (5)$$

donde, $F_{T_{max}}$ es la máxima fuerza de tracción en N, aplicada sobre la muestra previo al fallo mecánico del núcleo y A es la sección transversal en mm^2 sobre la que actúa la carga.

3.4. MODO MECÁNICO DE CORTE

Según la normativa ASTM C273, *Standard Test Method For Shear Properties of Sandwich Core Materials*, un total de 10 muestras libres de defectos se ensayaron ante la acción de esfuerzos de corte, 5 del prototipo 1 (60 mm x 310 mm x 74 mm) y 5 del prototipo 2 (60 mm x 310 mm x 124 mm), como se muestra en la figura 5.

Previo al ensayo de corte se adhirieron placas metálicas a las muestras mediante el uso de masilla plástica poliéster para asegurar que los esfuerzos de corte generados se transfirieran al material de núcleo. Posteriormente, se colocó la muestra en la UTM dándole el ángulo necesario para que el plano de acción de la fuerza pase por los extremos de la muestra (entre 21° y $33,5^\circ$ de desviación respecto al eje axial de aplicación de fuerza). La aplicación de carga se realizó a una velocidad constante de 0.5 mm/min, durante un tiempo de ensayo comprendido entre 3 y 6 minutos.



Figura 5. Muestras de tablero estructural compuesto tipo sándwich para pruebas de corte (a) muestra nominal del prototipo 1 y (b) muestra nominal del prototipo 2.

El esfuerzo máximo de corte (τ_{max}) se calculó de acuerdo a la norma ASTM C273 en base a la ecuación 6,

$$\tau_{max} = F_{s,max} / (L * w) \tag{6}$$

donde $F_{s,max}$ es la fuerza máxima de corte en N ejercida sobre la muestra previo al fallo mecánico del núcleo, L es la longitud de la muestra en mm y w es el ancho de la muestra en mm.

El módulo de corte (G) es la propiedad que refleja la resistencia del material de núcleo ante deformaciones de corte producidas por la aplicación de cargas, mismo que se calcula de acuerdo a la normativa ASTM C273 mediante la ecuación 7.

$$G = (M * c) / (L * w) \tag{7}$$

donde, M es la pendiente del rango lineal elástico de la curva esfuerzo de corte-deformación unitaria, c es el espesor del núcleo de balsa en mm, L es la longitud de la muestra en mm y w es el ancho de la muestra en mm.

3.4 MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Los materiales de mampostería tradicional (bloques y ladrillos) son sumamente afectados por la acción de movimientos telúricos, es decir no se comportan adecuadamente ante la aplicación de cargas cíclicas (ver figura 6), generando dos tipos de mecanismos de fallo que son (i) fuera y (ii) dentro del plano (Carrillo & González, 2007, Varela-Rivera *et al.*, 2015).

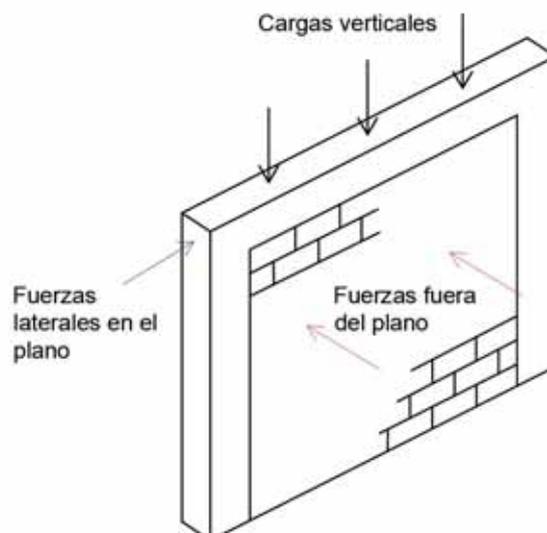


Figura 6. Tipo de cargas actuantes en pórticos con mampostería no reforzada.

Los fallos fuera del plano, comúnmente se producen por la falta de anclaje de muros a diafragmas de techo y piso, esta falla tiende a ser súbita disminuyendo la capacidad de resistir cargas gravitatorias. Por otro lado, los fallos dentro del plano, se producen por esfuerzos excesivos de cortante y flexión (ver figura 7), agravando su capacidad de resistencia y ocasionando en la mayoría de los casos el colapso de las estructuras de mampostería no reforzada (Carrillo & González, 2007, Varela-Rivera *et al.*, 2015).

En contraste, los biotableros estructurales tipo sándwich propuestos en esta investigación trabajan tanto dentro como fuera del plano, siendo este último comportamiento el más peligroso para esta clase de materiales (tipo relleno). Con el fin de determinar el comportamiento ante fallas dentro y fuera del plano, así como la validación y ajuste de resultados experimentales a través de factores de compensación (FC), se procedió a elaborar modelos de elementos finitos en base a los modos mecánicos preponderantes de compresión y flexión.

Previo al desarrollo de los modelos de elementos finitos (FEM), se asumieron suposiciones en base a la teoría de tableros compuestos tipo sándwich expuesta por Davies (1987) donde (i) se considera que los materiales componentes del tablero sándwich (paneles externos y panel de núcleo) trabajan únicamente en el rango lineal elástico, (ii) el panel de núcleo permite que el esfuerzo de corte sea constante a través de su estructura, (iii) no existe delaminación entre los materiales componentes del tablero tipo sándwich y (iv) el panel de núcleo no presenta deformación en dirección transversal.

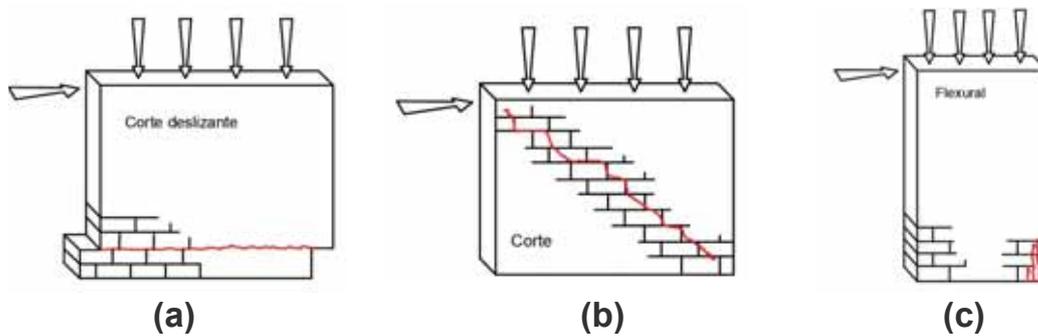


Figura 7. Modos de fallo típico de mampostería no reforzada sometida a cargas en el plano (a) Corte deslizante, (b) Corte Puro y (c) Falla Flexural con destrucción en la esquina. Modificado de (Garbin *et al.*, 2007)

El modelamiento computacional de cada modo mecánico se realizó en el software LS-Dyna®. En los modelos de elementos finitos (FEM) se asignaron las dimensiones geométricas y las direcciones de fibra de cada muestra ensayada. Las condiciones de borde en cada FEM se asignaron en función de los ensayos de laboratorio, es decir en la prueba de compresión se empotraron todos los nodos inferiores del modelo, mientras que en flexión se simulaban dos apoyos móviles con nodos restringidos, de modo que ambos sistemas de modelamiento estructural tuvieron 1 grado de libertad (ver figura 8).

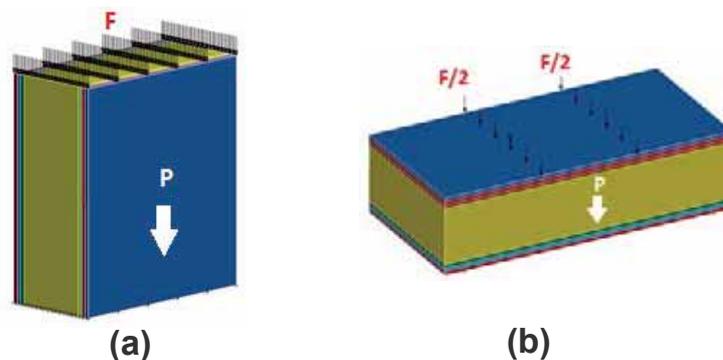


Figura 8. Condiciones geométricas, condiciones de borde y condiciones de carga en los modelos de elementos finitos (a) modo mecánico de compresión y modo mecánico de flexión.

Las propiedades físicas (densidad y contenido de humedad) y mecánicas (MOE , MOR_L , MOR_{flex} , τ_{max} y G) utilizadas en la elaboración de cada FEM se derivaron de los ensayos de laboratorio. Las propiedades de los materiales que no se determinaron a través de caracterización mecánica se obtuvieron de Ross (2010).

La modelación computacional comprendió un total de 40 análisis estático-no lineales que consideraron los efectos geométricos no-lineales resultado de las altas deflexiones y desplazamientos de cada FEM. El comportamiento ortotrópico y anisotrópico de los materiales componentes del tablero estructural tipo sándwich, así como la dirección de sus fibras se lograron replicar mediante un mallado de elementos hexaédricos tridimensionales de 8 nodos, mismos que permitieron calcular los esfuerzos generados en el centroide del elemento, basándose en la integración de Gauss de 8 puntos.

En el análisis finito de elementos (FEA) se consideraron dos condiciones de carga (i) fuerza de compresión axial paralela al plano de los paneles externos (compresión) y (ii) fuerza de flexión perpendicular al plano de paneles externos (flexión), en ambos casos denominada como (F).

Durante la fase de caracterización mecánica se estableció que los prototipos estudiados tienen un comportamiento elástico hasta que llegan al punto de fluencia, por lo tanto, la teoría de análisis de progresión de esfuerzos utilizada en esta investigación fue la de Von Mises (Hull & Clyne, 1996), en donde la falla del material se asume cuando la progresión de esfuerzos (energía de distorsión) rebasa la capacidad de resistencia mecánica del material (MOR), y se representa mediante un índice de falla (FI), por lo que, cuando $FI \geq 1$, se evidencia el inicio de falla del material en términos de mecánica estructural.

Una vez determinado el FEM óptimo (mediante el estudio de convergencia respectivo para cada modo mecánico), se procede al análisis finito de elementos respectivo con la finalidad de obtener los factores de compensación (ver ecuación 8) para los valores de resistencia a cargas máximas de compresión y flexión.

$$FC = (MOR_{FEA}) / (MOR_{lab}) \quad (8)$$

donde, es el módulo de ruptura en MPa obtenido de cada FEA y es el módulo de ruptura experimental en MPa.

3.6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE TABLEROS TIPO SÁNDWICH

Con la finalidad de establecer la aplicación estructural que tienen los prototipos propuestos en base a su comportamiento mecánico, es necesario determinar la carga axial admisible, carga lateral admisible y rigidez lateral de los mismos.

3.6.1. CARGA AXIAL ADMISIBLE

La máxima carga axial (antes del fallo mecánico por pandeo) que soportan los tableros estructurales tipo sándwich se determinó mediante el cálculo de la carga crítica de Euler misma que para tableros tipo sándwich se fundamenta en la ecuación 9 dada por Allen (2013),

$$P_{cr} = (\pi^2 * D) / L_{ef}^2 \quad (9)$$

donde, P_{cr} es la carga crítica por pandeo en kg, L_{ef}^2 es la longitud efectiva de una columna equivalente con articulaciones en sus extremos en mm^2 y D es la rigidez a flexión de los elementos del tablero tipo sándwich, misma que según Allen (2013), se calcula mediante la ecuación 10.

$$D = \left(MOE_f \cdot \frac{B_1 \cdot f^3}{6} + MOE_f \cdot \frac{B_1 \cdot f \cdot e^2}{2} + MOE_c \cdot \frac{B_1 \cdot dc^3}{12} \right) \quad (10)$$

donde, es el módulo de elasticidad de los paneles externos en kg/cm², es el módulo de elasticidad del panel de núcleo en kg/cm², es el ancho medido de la muestra en cm, es el espesor del panel externo en cm, es la profundidad del material del núcleo en cm, y es la distancia entre los centroides de los paneles externos en cm.

En la fase de caracterización mecánica las muestras ensayadas bajo el modo mecánico de compresión presentaron falla por aplastamiento de los paneles externos debido a que la longitud efectiva de las muestras fue muy corta para llegar a producir pandeo de las mismas; por consiguiente, se hace necesario determinar la carga admisible incluyendo el efecto de pandeo en los prototipos en base a las dimensiones reales con las cuales serán empleados en obra. Con el fin de proyectar la carga crítica de pandeo (P_{cr1}) de las muestras ensayadas en laboratorio, hacia la correspondiente (P_{cr2}) de los tableros de dimensiones estándar (1200 mm x 600 mm x d), se realizó una derivación de las ecuaciones 9 y 10, misma se representa por la ecuación 11.

$$P_{cr2} = \frac{P_{cr1} * B_2 * L_1^2}{B_1 * L_2^2} \quad (11)$$

3.6.2. CARGA LATERAL ADMISIBLE

La rigidez lateral de un tablero estructural compuesto tipo sándwich se define como la capacidad del mismo para resistir la aplicación de cargas laterales sin presentar deformación (Terradillos López, 2018). Este parámetro se calculó en base a la modelación del tablero propuesto en el programa SAP2000®, determinando la carga necesaria para producir 1 cm de deformación horizontal (rigidez lateral). Al obtener la rigidez lateral del prototipo se realiza la derivación matemática de la Ley de Hooke (ver ecuación 1) y el esfuerzo mecánico de un material (ver ecuación 12) para obtener la carga lateral admisible (ver ecuación 13),

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (12)$$

$$F_{lat_adm} = \frac{k_{lat} * \sigma_L * L}{MOE_L} \quad (13)$$

donde, σ_L es el esfuerzo lateral aplicado en MPa, MOE_L es el módulo de elasticidad en dirección longitudinal en MPa, ϵ es la deformación unitaria, F_{lat_adm} es la carga lateral admisible en N, A es el área perpendicular a la aplicación de la carga en mm², k_{lat} es la rigidez lateral del tablero en N/mm, y L es la longitud en la dirección axial del tablero de dimensión estándar en mm. Los resultados del análisis estructural de los tableros compuestos tipo sándwich propuestos fueron la base para determinar las potenciales aplicaciones de los mismos en proyectos de construcción no-convencional en zonas de alto riesgo sísmico.

4. RESULTADOS

4.1. MODO MECÁNICO DE COMPRESIÓN

Los resultados promedio de las muestras ensayadas a compresión en dirección paralela al plano longitudinal – radial (L-R) se presentan en la tabla 1 y la figura 9.

Tabla 1.

Resultados promedio de ensayos de compresión en muestras extraídas de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich

Prototipo	No. de muestras	Avg. Peso muestra	CoV	Avg. Densidad al 11% de C.H.	CoV	Avg. MOEL	CoV	Avg. MORL	CoV
		[kg]		[kg/m ³]		[MPa]		[MPa]	
PB1	5	0,68	0,05	413,97	0,02	15407,60	0,02	39,58	0,05
PB2	5	2,37	0,02	298,63	0,02	9597,16	0,06	36,37	0,03

Según los valores presentados en la tabla 1, se desprende que el prototipo PB2 tiene las mejores características de flexibilidad; mientras que en términos de resistencia a esfuerzos, ambos prototipos se encuentran dentro del mismo rango de valores. Además los resultados evidencian coeficientes de variación mínimos ($\leq 0,06$) lo cual refleja un porcentaje mínimo de error en los valores obtenidos en laboratorio, y por consiguiente, una baja dispersión de resultados en relación al valor promedio de todas las muestras ensayadas.

La figura 9 grafica el esfuerzo de compresión (σ_L) versus la deformación unitaria (ϵ) en el plano (L-R) de las muestras ensayadas. Se puede observar que el comportamiento mecánico tanto en el rango lineal elástico como en el plástico es similar para todas las muestras ensayadas; además, los resultados evidencian un alto comportamiento dúctil [capacidad del material y sus componentes para soportar una deformación plástica antes de llegar al fallo mecánico] ante la aplicación de carga axial progresiva.

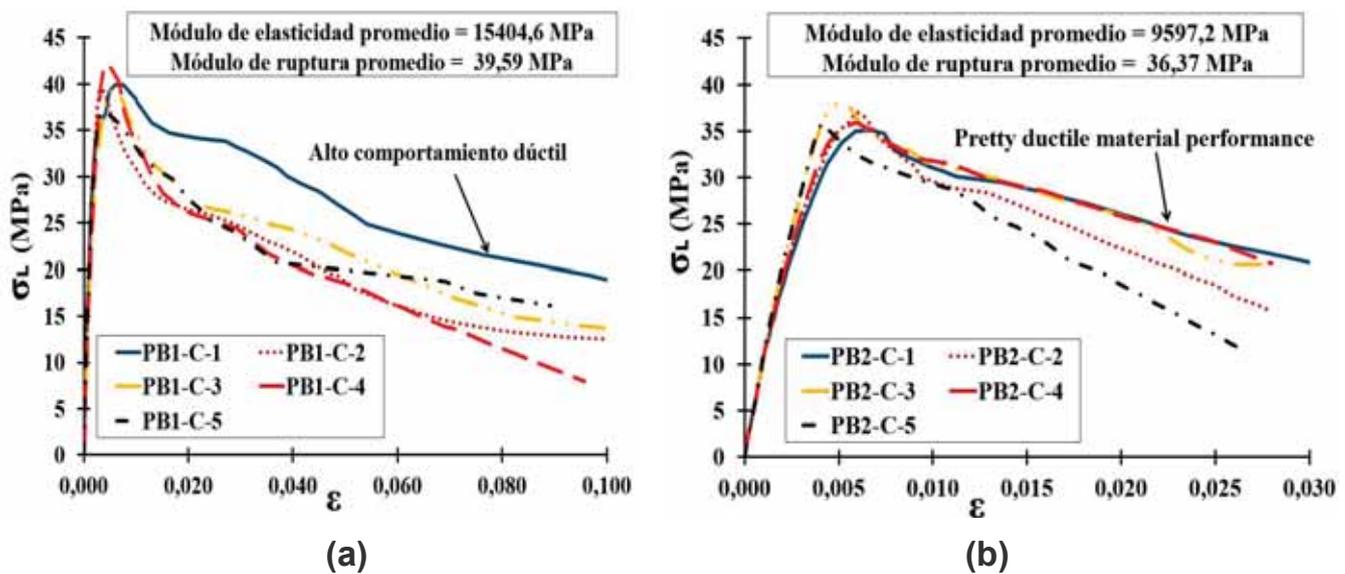


Figura 9. Esfuerzo de compresión – deformación unitaria en dirección paralela a la aplicación de carga (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2.

Las muestras ensayadas bajo el modo mecánico de compresión evidenciaron una falla por aplastamiento de los paneles externos, ya que al presentar mayor rigidez, estos absorben las mayores solicitaciones de carga en este modo mecánico (ver figura 13).

4.2. MODO MECÁNICO DE FLEXIÓN

Los resultados de las muestras ensayadas a flexión en el plano radial transversal (R-T) se presentan en la tabla 2 y la figura 10.

Tabla 2.

Resultados promedio de ensayos de flexión en muestras extraídas de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich

Prototipo	No. De muestras	Avg. Peso muestra	CoV	Avg. Densidad al 11% de C.H.	CoV	Avg. MOR _{flexión}	CoV	Avg. τ_{max}	CoV
		[kg]		[kg/m ³]		[MPa]		[MPa]	
PB1	5	1,18	0,06	353,98	0,05	13,02	0,05	2,34	0,05
PB2	5	4,81	0,03	314,88	0,03	13,27	0,2	1,56	0,2

Los resultados denotan que los dos prototipos presentan valores muy similares de resistencia ante la progresión de cargas de flexión; esto se debe a que la diferencia entre espesores de los paneles externos de los dos prototipos es de tan solo 2 mm. En términos de resistencia a esfuerzos de corte, la diferencia se produjo debido a que el tablero PB2 poseía un núcleo de balsa 50 mm mayor que el prototipo PB1 lo cual impidió la correcta transferencia de corte entre elementos. Los coeficientes de variación obtenidos en base a los resultados de la tabla 2 presentaron un valor máximo de 0.20, el cual denota una leve dispersión de resultados producto de la gran deformación que sufren las muestras en el modo mecánico de flexión, lo cual no sucede en el modo mecánico de compresión debido a que las deformaciones son muchísimo menores.

La figura 10 grafica la fuerza de flexión versus el desplazamiento experimentado en cada muestra; el comportamiento mecánico (tanto en el rango lineal elástico como en el plástico) de las muestras extraídas de los prototipos PB1 y PB2 fue uniforme ante la aplicación de cargas de flexión, presentando alta ductilidad después de llegar al máximo valor de resistencia, de modo que no existió falla total del prototipo durante el ensayo.

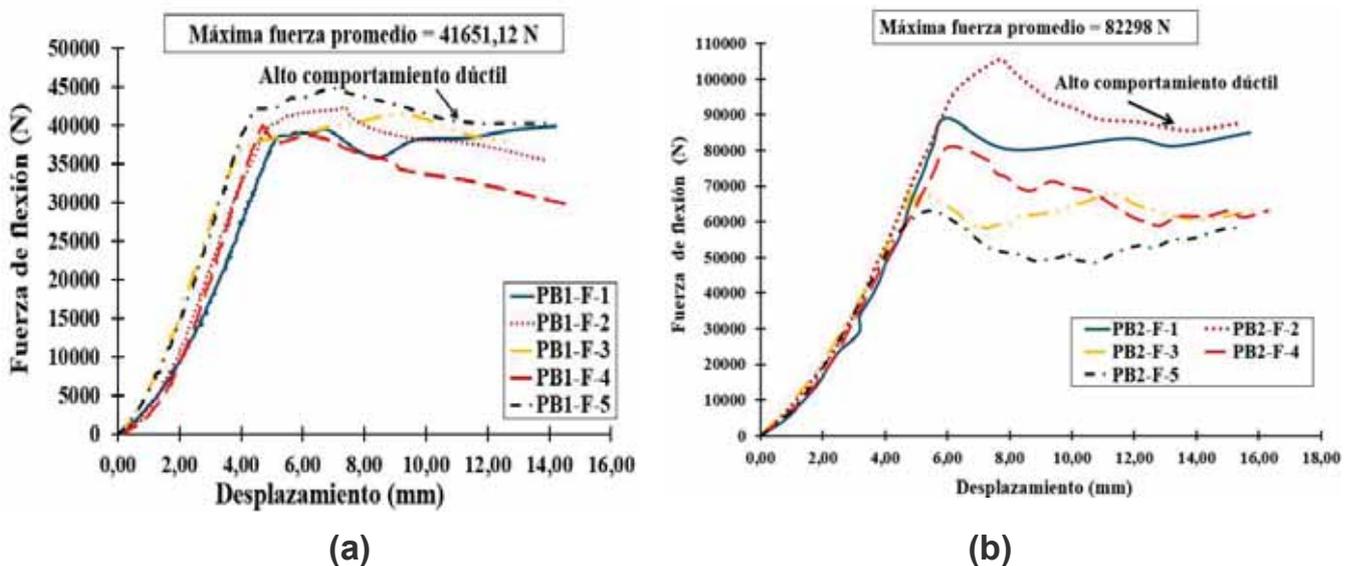


Figura 10. Fuerza de flexión – desplazamiento en dirección perpendicular al plano de los paneles externos (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2.

La falla predominante en el modo mecánico de flexión fue por cizalla en el núcleo, para después evolucionar hacia una falla por ligante entre paneles externos y panel de núcleo (ver figura 14).

4.3. MODO MECÁNICO DE TRACCIÓN

Los resultados promedio de módulo de ruptura a tracción ($MOR_{tracción}$) calculados para las muestras ensayadas de los prototipos PB1 y PB2, en dirección perpendicular al plano longitudinal – radial (L-R) se presentan en la tabla 3 y la figura 11.

Tabla 3.

Resultados promedio de ensayos de tracción en muestras extraídas de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich

Prototipo	No. De muestras	Avg. Peso muestra	CoV	Avg. Densidad al 11% de C.H.	CoV	Avg. MOR _{tracción}	CoV
		[kg]		[kg/m ³]		[MPa]	
PB1	5	0,07	0,04	379,88	0,04	2,62	0,09
PB2	5	0,09	0,02	291,01	0,02	2,03	0,06

La figura 11 indica que la tendencia de comportamiento mecánico de las muestras ensayadas a tracción es uniforme, asimismo se puede apreciar que existe una falla frágil total al momento que las muestras alcanzan su máxima capacidad de resistencia a cargas de tracción. Las totalidad de las muestras ensayadas evidenciaron una falla recurrente por tracción de los paneles externos, la cual se debe a que el ligante utilizado en su elaboración (resina vinil acrílica) no proporcionó una resistencia óptima ante este tipo de progresión de esfuerzos.

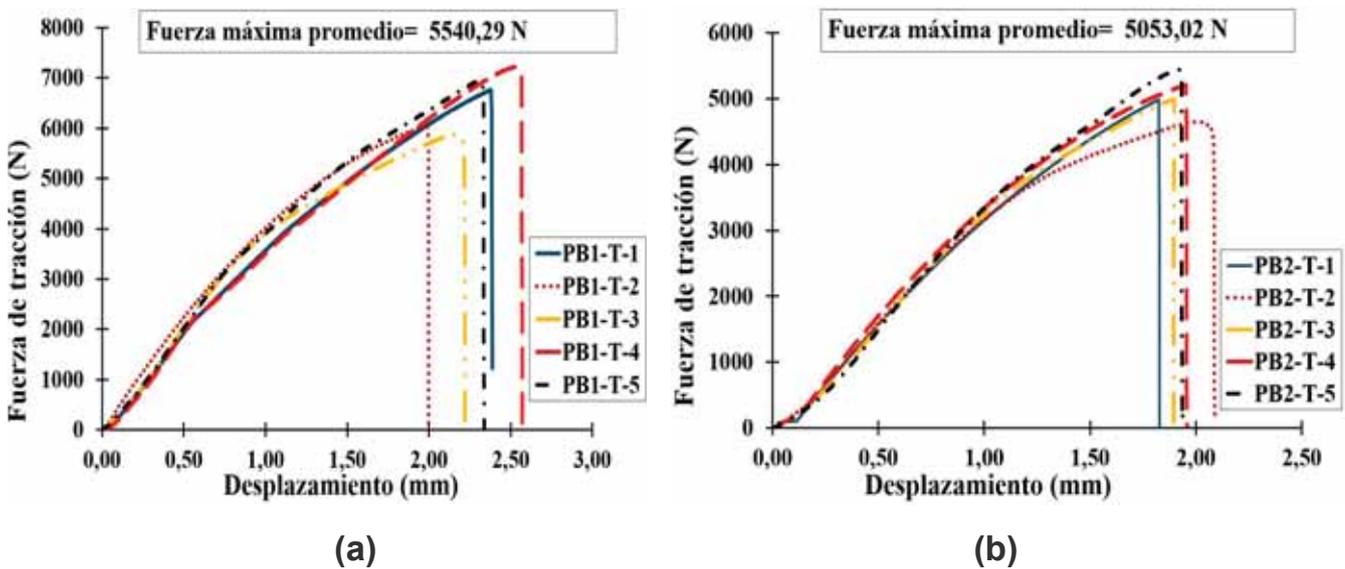


Figura 11. Fuerza de tracción – desplazamiento en dirección perpendicular al plano de los paneles externos (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2.

4.4. MODO MECÁNICO DE CORTE

Los resultados promedio de esfuerzo de corte (τ_{max}) y módulo de corte (G) calculados para las muestras ensayadas de los prototipos PB1 y PB2, se presentan en la tabla 4 y figura 12.

Tabla 4.

Resultados promedio de ensayos de corte en muestras extraídas de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich

Prototipo	No. de muestras	Avg. Peso muestra	CoV	Avg. Densidad al 11% de C.H.	CoV	Avg. τ_{max}	CoV	Avg. G	CoV
		[kg]		[kg/m ³]		[MPa]		[MPa]	
PB1	5	0,56	0,03	400,29	0,07	1,52	0,07	172,10	0,11
PB2	5	0,77	0,05	326,26	0,05	1,48	0,10	141,95	0,26

Los resultados indican que el prototipo PB1 presenta las mejores características en este modo mecánico, con un módulo de corte que refleja mayor rigidez y un valor de resistencia a esfuerzo máximo de corte muy semejante al de PB2.

La figura 12 presenta una tendencia de comportamiento mecánico similar en todas las muestras ensayadas; asimismo, se puede apreciar que existe un rango elástico inicial acompañado de una deformación plástica “tipo plateau” que posteriormente desemboca en una falla total del elemento, lo cual implica que ante un esfuerzo de corte (esto es, por cargas de viento y sismo) los tableros estructurales tipo sándwich se comportarían de forma óptima, permitiendo así el desalojo de las estructuras previo a un colapso total.

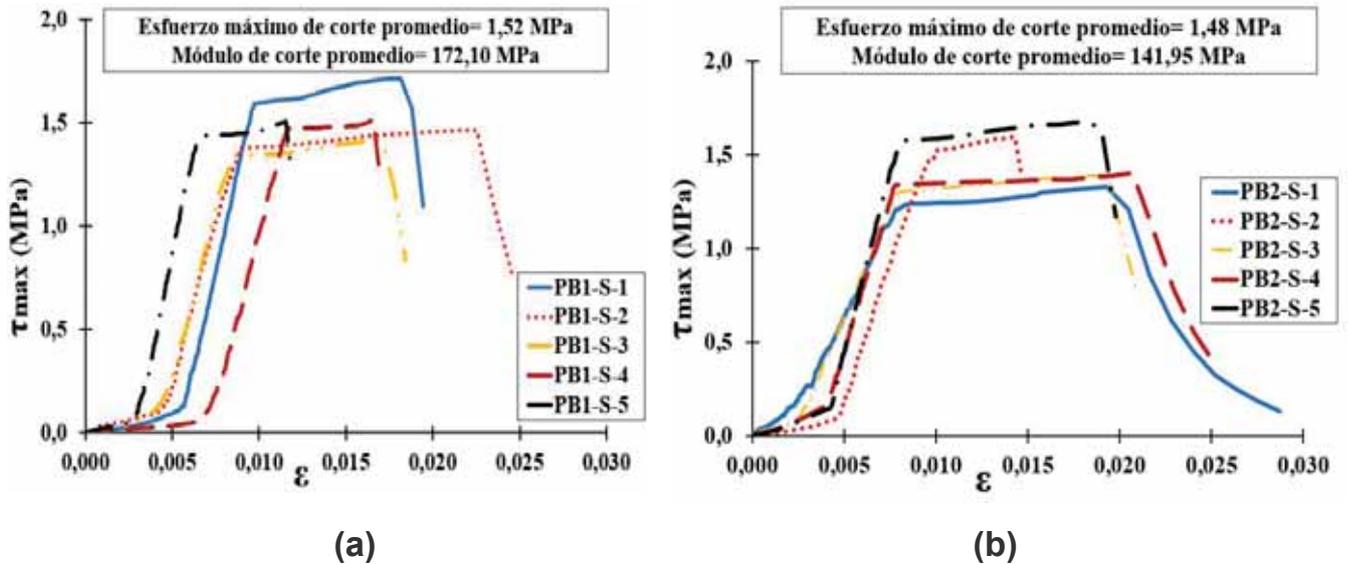


Figura 12. Esfuerzo máximo de corte - deformación unitaria (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2.

Todas las muestras ensayadas bajo este modo mecánico presentaron falla por corte del núcleo de balsa, misma que se produce debido a la diferencia de rigideces entre los materiales que componen el prototipo de tablero estructural tipo sándwich.

4.5. MODELAMIENTO DE ELEMENTOS FINITOS

En base a los resultados máximos promedio de la caracterización mecánica se identifica como modo mecánico preponderante al de compresión, debido a que es 2,74, 17,92 y 24,57 veces superior a los modos mecánicos de flexión, tracción y corte, respectivamente. Por consiguiente, los resultados de esta sección se enmarcan a los modos mecánicos de compresión y flexión.

De la validación de resultados en base al FEA de cada muestra ensayada bajo el modo mecánico de compresión, se llegó a determinar factores de compensación de 1,08 y 1,04 para PB1 y PB2, respectivamente. De manera similar en el modo mecánico de flexión, se determinaron FC de 1,02 y 1,12 para PB1 y PB2, respectivamente. Los valores de MOR_L y MOR_{flex} compensados se pueden observar en las tablas 1 y 2, respectivamente. Se debe resaltar también que se determinó un valor máximo de 12% de dispersión entre los resultados de FEA y los correspondientes a laboratorio, lo cual denota que los datos experimentales fueron obtenidos de manera muy precisa.

Los FEA permitieron también observar de manera gráfica y en 3D la progresión de esfuerzos y dispersión de los mismos dentro de cada FEM (ver figura 13 y figura 14) lo cual permitió entender de manera lógica el comportamiento mecánico de los elementos propuestos ante las sollicitaciones en estudio.

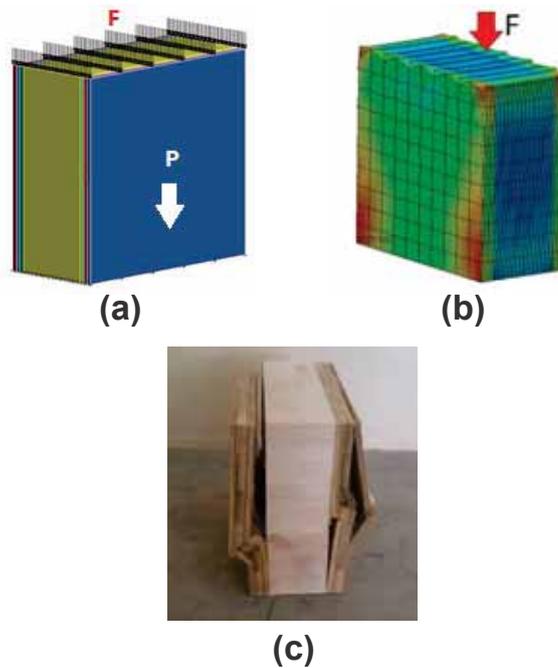


Figura 13. Análisis de elementos finitos modo mecánico de compresión (a) FEM previo a la aplicación de carga (b) progresión de esfuerzos en el FEM y (c) falla por aplastamiento de paneles externos.

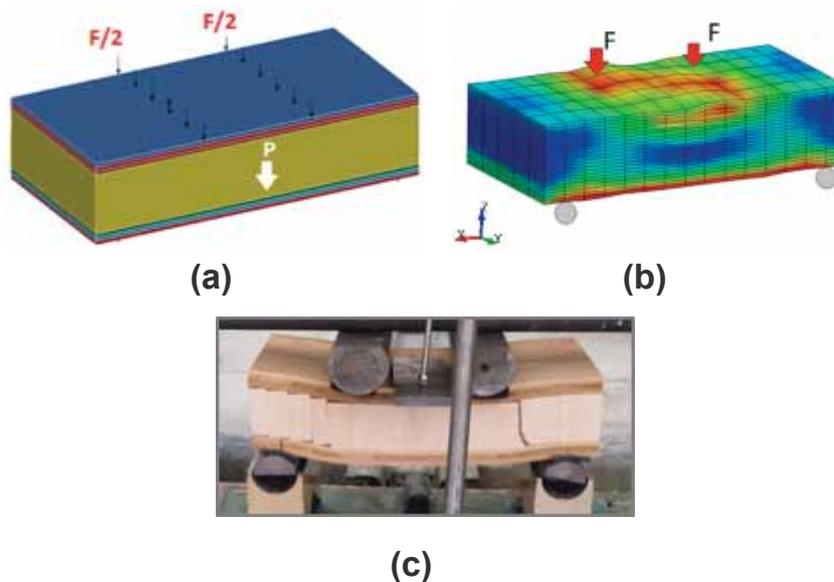


Figura 14. Análisis de elementos finitos modo mecánico de flexión (a) FEM previo a la aplicación de carga (b) progresión de esfuerzos en el FEM y (c) falla por cizalla en el panel de núcleo.

4.6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

La tabla 5 presenta una proyección de 14 propuestas de tableros estructurales compuestos tipo sándwich de diferentes espesores, derivada de los resultados de carga axial admisible, rigidez lateral y carga lateral admisible de los prototipos PB1 y PB2. En estas propuestas, se varía únicamente el espesor del panel de núcleo de balsa, para así incrementar progresivamente su flexibilidad sin un aumento excesivo de peso.

Los resultados presentados en la tabla 5 proyectan la elección y utilización de tableros estructurales compuestos tipo sándwich dependiendo de los esfuerzos admisibles a los cuales se verán abocados al momento de su implementación en la construcción.

Tabla 5.

Proyección de características estructurales en tableros compuestos tipo sándwich elaborados de bambú y balsa

PROTOTIPO PB1 (PANELES EXTERNOS DE BAMBÚ DE 1,5 CM)					
Espesor núcleo	Espesor total	Carga axial admisible	Rigidez Lateral	Carga lateral admisible	Peso
cm	cm	kg/m	kg/cm/m	kg/m	kg/m
2,54	5,54	328,92	1928,57	277,42	55,78
3,81	6,81	458,51	2285,00	377,40	68,57
4,40 (PB1)	7,40	524,95	2450,58	427,30	74,51
5,08	8,08	606,36	2641,43	488,09	81,36
6,35	9,35	772,39	2997,85	611,74	94,15
7,62	10,62	956,64	3354,28	750,60	106,93
8,90	11,90	1160,76	3750,00	908,99	119,82
PROTOTIPO PB2 (PANELES EXTERNOS DE BAMBÚ DE 1,7 CM)					
Espesor núcleo	Espesor total	Carga axial admisible	Rigidez Lateral	Carga lateral admisible	Peso
cm	cm	kg/m	kg/cm/m	Kg/m	kg/m
2,54	5,94	453,16	1802,63	319,28	59,81
3,81	7,21	615,02	2331,20	402,36	72,60
4,40	7,80	696,46	2575,75	444,67	78,54
5,08	8,48	795,15	2858,40	496,74	85,39
6,35	9,75	993,45	3386,28	604,88	98,17
7,62	11,02	1209,96	3914,17	730,03	110,96
8,90 (PB2)	12,43	1446,61	4446,20	886,43	125,16

*Los valores resaltados corresponden a los prototipos PB1 y PB2 estudiados en esta investigación.

5. DISCUSIÓN

Los prototipos estudiados se enmarcan en un rango de densidad promedio que va de 291,01 a 413,97 kg/m³, por lo que según Heiko & Barbu (2010) se los clasifica dentro del rango de materiales compuestos ligeros ($d \leq 500$ kg/m³). De los resultados obtenidos y en base a los estudios relacionados de González (2016), González (2018), se puede inferir que existe una relación directa entre la densidad y las propiedades mecánicas de los biotableros investigados en este estudio. Los resultados denotan que el ligante utilizado para unir los paneles externos con el panel de núcleo presentó un excelente comportamiento de modo que la delaminación producida entre elementos fue limitada y controlada.

Según los resultados presentados en la tabla 1 se observa una considerable diferencia entre el prototipo PB1 y PB2 en términos de rigidez, siendo el prototipo PB1 1.60 veces más rígido que el prototipo PB2; lo cual refleja una capacidad a flexión superior de PB2 debido a que el espesor del núcleo de balsa (46 mm > PB1) le otorga mayor performance de deformación ante la acción de solicitaciones de carga externa e interna. Asimismo, en términos de resistencia mecánica, los resultados de PB1 y PB2 se enmarcan en valores similares en todos los modos mecánicos analizados; esto debido a que los espesores de los paneles externos de bambú difieren únicamente en 2 mm uno respecto de otro. Por consiguiente, los biotableros propuestos alcanzan un equilibrio adecuado entre flexibilidad y resistencia mecánica, siendo los paneles externos bidireccionales de bambú los que brindan

alta resistencia a esfuerzos mientras que el panel de núcleo de balsa le otorga flexibilidad e incrementa su inercia [capacidad de los cuerpos para resistir un cambio en el estado físico de los mismos (deformaciones y giros)] reduciendo el efecto de volcamiento producido por elementos de mampostería tradicional, y por consiguiente, disminuyendo el riesgo de fatalidades durante terremotos.

De la caracterización mecánica de los prototipos PB1 y PB2, se desprende que los biotableros propuestos trabajan en todos los modos mecánicos, lo cual es un plus en comparación con elementos convencionales para pared, ya que en su mayoría son diseñados para compresión. A esto hay que añadir que, la resistencia de los biotableros propuestos bajo los modos mecánicos de compresión y flexión presentan una gran ductilidad en el rango plástico del material compuesto, lo cual es esencial en materiales y elementos a ser utilizados en zonas propensas a eventos telúricos de alta magnitud y duración. Específicamente, de todas las opciones presentadas en la tabla 5, el prototipo PB2, con un espesor total de 12,43 cm [panel de núcleo de balsa = 8,90 cm y espesor de paneles externos= 1,7 cm c/u] presenta los valores más altos respecto de todos los parámetros analizados; por lo tanto, se recomienda su uso como pared portante externa en construcciones expuestas a velocidades críticas de viento ($v > 17,4$ m/s) en zonas de alto riesgo sísmico. No obstante, todas las opciones presentadas en la tabla 5 son aptas para su uso en la construcción.

Es necesario resaltar que el módulo de ruptura promedio a compresión para el prototipo PB2 ($MOR_L = 36.37$ MPa) es 2.63 y 1.45 veces superior al de materiales tradicionales como los bloques huecos de hormigón clase A ($\sigma_{adm} = 13.8$ MPa) y ladrillo macizo tipo A ($\sigma_{adm} = 25$ MPa), respectivamente. Mientras que el módulo de ruptura a flexión del prototipo PB2 ($MOR_{flex} = 13.27$ MPa) es 3.31 veces superior al del ladrillo macizo tipo A ($\sigma_{adm_flex} = 4$ MPa); en este caso el ladrillo es el único material de mampostería que se puede comparar ya que el bloque de hormigón hueco no trabaja bajo el modo mecánico de flexión. Por otra parte luego de haber realizado la respectiva modelación de elementos finitos se puede asegurar que en los biotableros estructurales tipo sándwich no se presentaron fallas dentro o fuera del plano bajo las cargas aplicadas; la falla fuera del plano no se presentó debido a que los paneles externos de bambú le dieron la rigidez necesaria al sistema; a su vez, tampoco se presentaron fallas en el plano por corte o aplastamiento, ya que los tableros externos al ser bidireccionales disipan la fuerza de corte y el núcleo de balsa permite la transferencia de la fuerza hacia los dos paneles sin necesidad de deformarse.

6. CONCLUSIÓN

Los hallazgos de esta investigación demuestran que los prototipos de tableros estructurales compuestos tipo sándwich satisfacen plenamente requisitos de ingeniería para su uso estructural en edificaciones debido a su bajo peso, alta resistencia a esfuerzos internos y externos, gran flexibilidad y ductilidad, producción sostenible, facilidad de transporte y sobre todo bajo impacto ambiental.

Pese a que los resultados del presente estudio cumplen con el alcance de la investigación propuesta, es necesario complementarlo con pruebas de (i) amortiguamiento y vibración (ASTM E576), (ii) resistencia a la fatiga (ASTM C393, 2011) que presentan los prototipos ante cargas dinámicas, (iii) respuesta ante la acción del fuego (Normativa chilena, NCh 395), (iv) absorción de sonido (ASTM E1050, 2012), y (v) conductividad térmica (ASTM C177, 2019).

7. BIBLIOGRAFÍA

Hibsch C., Alvarado A., Yepes H., Sebrier M. & Pérez H., (1996) "Falla Activa de Quito y Fuentes Sismogenéticas Regionales: Un estudio del Riesgo Sísmico de Quito con el Análisis de los sedimentos cuaternarios", *Bulletin de l'Institut Francais d'Études Andines*, ISSN: 2076-5827.

- Rivadeneira F., Segovia M., Alvarado A., Egred J., Troncoso L., Vaca S. & Yepes H.,(2007)."*Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*". C. E. Nacional, ISBN: 978-9978-84-460-1.
- Stein S. & Wysession M.,(2009)."*An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*". ISBN: 978-0-86542-078-6.
- Secretaria de Gestion de Riesgos.(2016)."*Informe de Situación. In: RIESGOS, S.D.G.D. (ed)*".
- Páez D.,(2016) "Influencia de muros de mampostería en el comportamiento de edificios de Manta durante el terremoto de 16 de abril del 2016, Pedernales-Ecuador", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, (Volumen 3), ISSN: 1390-0315.
- Ministerio del Ambiente.(2014)."*Sistema de Contabilidad Ambiental Nacional Exploración Inicial*". ISBN: 978-9942-07-828-5.
- Lippke B., Wilson J., Meil J. & Taylor A.,(2010) "Characterizing the importance of carbon stored in wood products", *Wood and Fiber Science*, (Volumen 42), ISSN: 0735-6161, 5-14 pp.
- McKeever D.B.,(1997)."*Engineered wood products: a response to the changing timber resource*". 15.
- Salazar V.H.,(2014)."*Vivienda con estructura de madera en la ciudad de guayaquil*". "
- ASTM C364.(2016)."*Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*".
- Ugural A.C.,(2008)."*Mechanics of materials*". United States: New jersey Institute of Technology, ISBN: 9780471721154, 716 pp.
- ASTM C297.(2004)."*Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*".
- ASTM C273.(2000)."*Standard Test Method For Shear Properties of Sandwich Core Materials*".
- Carrillo J.C.J. & González G.,(2007) "Modelación inelástica de pórticos de concreto con mampostería no reforzada", *Dyna*, (Volumen 74), ISSN: 2346-2183, 229-239 pp.
- Varela-Rivera J.L., Chan-Esquivel S., Fernández-Baqueiro L.E. & Moreno-Herrera J.A.,(2015) "Comportamiento de muros de mampostería confinada con aberturas sujetos a cargas fuera del plano", *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, (Volumen 7), ISSN: 2007-3011, 52-65 pp.
- Garbin E., Galati N., Nanni A., Modena C. & Valluzzi M.R.,(2007)."*Provisional design guidelines for the strengthening of masonry structures subject to in-plane loading*". 3-5 pp.
- Davies J.,(1987) "Design criteria for structural sandwich panels", *Structural Engineer. Part A*, (Volumen 65), ISSN: 0151-9462, 435 pp.
- Ross R.J.,(2010)."*Wood handbook: wood as an engineering material*".
- Hull D. & Clyne T.W.,(1996)."*An introduction to composite materials*". ISBN: 0521388554.
- Allen H.G.,(2013)."*Analysis and design of structural sandwich panels: the commonwealth and international library: structures and solid body mechanics division*". First Edition, ISBN: 978-0-08-012870-2.
- Terradillos López A.,(2018)."*Diseño y fabricación de una barra flexible para un dispositivo de rehabilitación de torso*".

Heiko J. & Barbu M.,(2010)."*Light Weight Panels: Summary of a New Development in Europe*". Taipei-China.

González O.,(2016) "Influence of density distribution on the mechanical efficiency of coconut stem green tissues".

González O.,(2018)."*The Ingenious Tree of Life - A biomechanical Approach to Cocowood Science*". ISBN: 9786139870004.

ASTM E576.(2014)."*Standard Test Method for Frost/Dew Point of Sealed Insulating Glass Units in the Vertical Position*".

ASTM C393.(2011)."*Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*".

ASTM E1050.(2012)."*Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System*".

ASTM C177.(2019)."*Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*".



Sistema modular en bambú guadua con conexiones metálicas de fácil armado para vivienda rural

Modular system in guadua bamboo with easy to be assembled metal connections for rural housing

Kevin Andrés Casallas Benitez ⁽¹⁾
Juan Camilo Sánchez Gutiérrez ⁽¹⁾
Caori Patricia Takeuchi ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Nacional de Colombia
sede Bogotá.
kacasallasb@unal.edu.co
juacsanchezgut@unal.edu.co
cptakeuchit@unal.edu.co

Recibido: 16 de Julio, 2019
Aceptado: 10 de Diciembre, 2019

Doi: <http://dx.doi.org/10.24133/ciencia.v22i1.1303>

“THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED.”

RESUMEN

En respuesta a la coyuntura que vive Colombia debido a la implementación del acuerdo de paz firmado entre el gobierno y la guerrilla FARC-EP, se hace necesaria una solución habitacional para los nuevos pobladores de las regiones donde se desarrollaba el conflicto armado, que no puede estar fuera del contexto social, ecológico y económico. Es por esto que el bambú *Guadua* al ser un recurso natural, de fácil acceso y mínimo impacto se convierte en material viable para responder a este problema. Con el uso de conexiones metálicas prefabricadas se agiliza la construcción de viviendas rurales con elementos en guadua, además permitiendo a la estructura cambiar su configuración espacial, aumentando el número de módulos y así la cantidad de espacios habitacionales, según lo permitan las condiciones económicas de sus habitantes, realizando así una construcción progresiva.

En el presente documento se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de módulos cúbicos de guadua con conexiones en cubos metálicos y su aplicabilidad para la construcción de viviendas de 1 y 2 pisos.

Palabras Claves:

Bambú, Guadua, Estructuras en bambú, conexión viga-columna, bambú estructural.

ABSTRACT

In response to the situation that Colombia is experiencing due to the implementation of the peace agreement signed between the government and the FARC-EP guerrillas, a housing solution is necessary for the new inhabitants of the regions where the armed conflict was taking place, which cannot be out of social, ecological and economic context. This is why Guadua bamboo, being a natural resource, easily accessible and minimal impact, becomes a viable

material to respond to this problem. With the use of prefabricated metal connections, the construction of rural houses with elements in guadua is expedited, also allowing the structure to change its spatial configuration, increasing the number of modules and thus the amount of residential spaces, as permitted by the economic conditions of its inhabitants, thus carrying out a progressive construction.

This document shows the results obtained in the test of cubic modules of guadua with connections in metal cubes and its applicability for the construction of houses of 1 and 2 floors.

Keywords:

Bamboo, Guadua, Bamboo structures, Beam and column joints, structural bamboo

1. INTRODUCCIÓN

Para dar una solución al problema que se avecina con la firma de un “acuerdo de paz”, de dar vivienda digna y económica a miles de familias que volverán al campo, es necesario realizar viviendas con estructuras de fácil construcción y con materiales que se encuentren en las regiones, además, de garantizar que sean ecológicamente sustentables. La guadua ha demostrado su versatilidad en el uso como elemento estructural (Herrera & Takeuchi, 2009), de allí la necesidad de aprovechar este recurso.

La *Guadua angustifolia* Kunth (en adelante Guadua) es la especie de bambú más popular en Colombia, la que más se ha estudiado y la que mejor resultados tiene en pruebas de carga para uso como elemento estructural (Luna, Lozano, & Takeuchi, 2014), este se usa con popularidad en la región Cafetera y el Valle del Cauca (Colombia), principalmente para las estructuras agropecuarias y viviendas de 1 piso (Osorio et al., 2010).

Las conexiones entre elementos de guadua son objeto de estudio habitual debido a las múltiples formas en las que se pueden realizar las uniones, pero también a lo difíciles que pueden llegar a ser. Varios investigadores (Lamus, Plazas, & Luna, 2015; Takeuchi, 2004) han realizado ensayos de uniones con perno pasante en elementos de guadua, identificando que, las tensiones perpendiculares a las fibras, son uno de los grandes problemas, ya que la guadua es un material anisótropo con baja resistencia a la tracción perpendicular a las fibras (Takeuchi, 2004).

Los arquitectos Barnet y Jabrane (2019) implementaron una unión para los elementos en bambú, el cual se conecta desde la parte interna del culmo con un elemento tipo cono prefabricado, el cual elimina las perforaciones en la pared o aplicar cemento en los canutos, este tipo de unión de acuerdo a los datos ilustrados llega a una tensión máxima de 1750 kg.

Widyowijatnoko (2012) ha desarrollado una conexión que no utiliza mortero dentro del culmo, sino que usa un elemento flexible tipo cable que lo abraza, mientras atraviesa un perno que es sometido a tensión desde el interior, solucionando así el problema de las tensiones perpendiculares a las fibras y permitiendo una conexión de fácil y rápido armado. Este tipo de conexión es la más fácil de realizar, pues todos los elementos necesarios son de fácil adquisición.

2. CONEXIONES

Con el fin de desarrollar un tipo de conexión de fácil armado y que permita la reconfiguración de los módulos para las viviendas, se partió de la investigación de Andry Widyowijatnoko (2012), quien ha realizado numerosos ensayos en diferentes tipos de conexiones donde se pasa un cable de acero dentro de la guadua y un perno de ojo cerrado, para transmitir las cargas del perno a la guadua y viceversa.

2.1. ENSAYO DE CONEXIONES

Se realizaron ensayos de las conexiones de los elementos en guadua como las utilizo en su tesis doctoral Widyowijatnoko (2012), para validar cuales eran las mejores formas de amarre y los elementos más óptimos que se pueden encontrar en el mercado colombiano.

En este ensayo se usaron pernos de ojo de 1/2" que se encuentran en el mercado cerrando el ojo con soldadura MIG (ver figura 1) para garantizar que no se abriera frente a cargas de tensión, este perno fue enhebrado con cable de acero de diámetro 1/4" y se utilizó la configuración de amarre propuesta por Widyowijatnoko (2012) que se observa en la figura 2.



Figura 1. Cierre ojo perno.

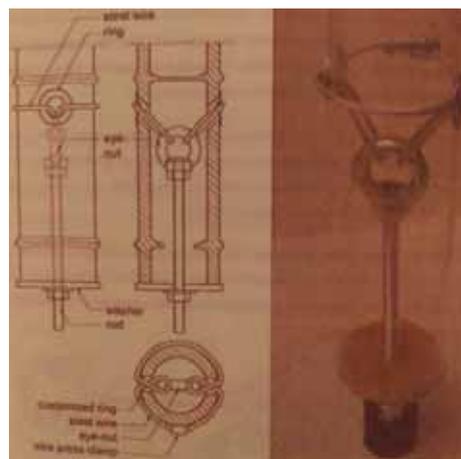


Figura 2. Amarre propuesto por (Widyowijatnoko, 2012)

En las conexiones se amarraron los cables de acero con cuatro pernos, teniendo en cuenta lo que indica la norma NTP 155: cables de acero (Sabate, 1998), además se colocaron ojales metálicos en las perforaciones de la guadua (ver figura 3) para distribuir los esfuerzos en las paredes internas de la perforación.



Figura 3. Acabado amarre nudo guadua.

Se ensayaron 3 probetas (ver figura 4) con una longitud de 40 cm, diámetros y espesores como lo muestra la tabla 1, estas probetas fueron ensayadas a tensión, sujetando los pernos y separándolos a una velocidad de 5mm/min.



Figura 4. Probetas ensayo conexión sencilla.

Tabla 1.
Dimensiones de probetas.

Probeta	Nudo	Diámetro promedio (mm)	Espesor promedio (mm)	Carga ultima (kg)
1	A	91.7	14.5	2826.9
	B	92.9	13.5	
2	A	93.1	9.9	1133.0
	B	90.7	9.7	
3	A	90.4	15.2	3625.9
	B	91.7	21.2	

Las tres probetas presentaron resultados distintos, pero se muestra una pendiente similar en la ilustración carga vs desplazamiento de los tres especímenes, al llegar a la carga máxima no sufre una rotura final, sino que recibe un poco de carga más allá del desplazamiento de rotura.

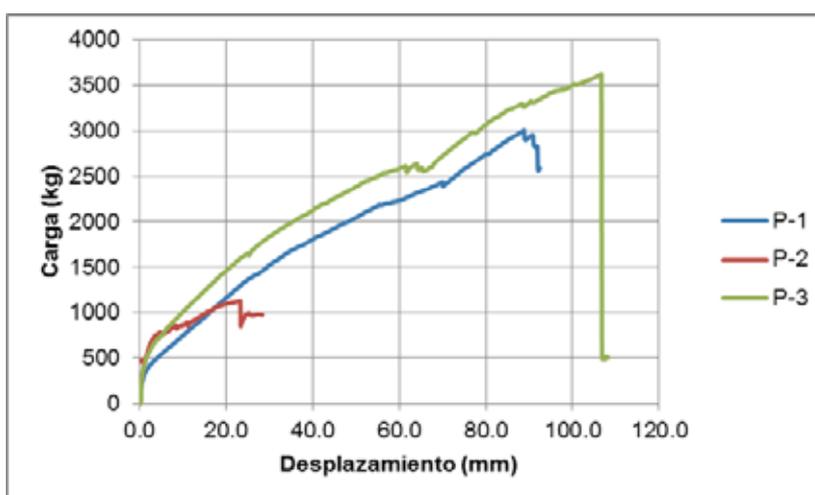


Figura 4. Grafica- Carga vs Desplazamiento.

En las fallas de las probetas 1 y 2 se observa una falla tipo bloque de cortante como la que se presenta en las conexiones metálicas (ver figura 5), lo que indica que el cable de acero realiza una presión sobre la pared superior de la perforación del culmo mientras en resto del cable lo estrangula.



Figura 5. Falla tipo bloque de cortante.

La probeta número 3 presentó una falla por tensión paralela a las fibras del culmo (ver figura 6), lo que la llevó a desarrollar mayor capacidad a la tensión (3625.9 kg).



Figura 6. Falla tensión paralela a las fibras.

2.2. DISEÑO DE NUDO METÁLICO

El nudo metálico donde se conectan los elementos se diseñó con la carga máxima que se obtuvo en el ensayo de conexiones, teniendo en cuenta los esfuerzos generados a cortante, axial y la perforación realizada en el nudo metálico (ver figura 7), este nudo está compuesto con láminas planas de calidad ASTM- A572 Gr50 con espesor de 3/16”.

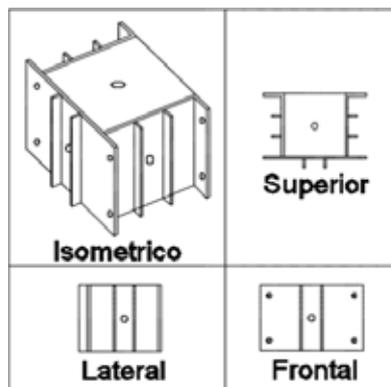


Figura 7. Esquema nudo metálico.



Figura 8. Fotografía nudo metálico.

Los elementos que llegaran al nudo metálico son dos vigas, una columna y una diagonal, como se muestra en la figura 8, y se unirá entre ellos a través de pernos pasantes de ½” como se observa en la figura 9.

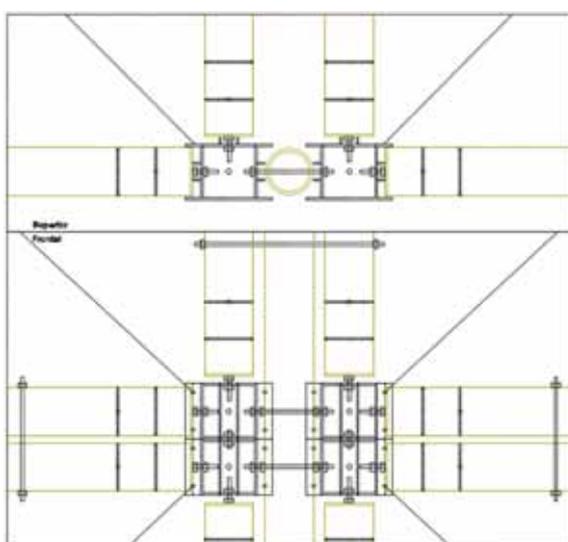


Figura 9. Nudo metálico con elementos.

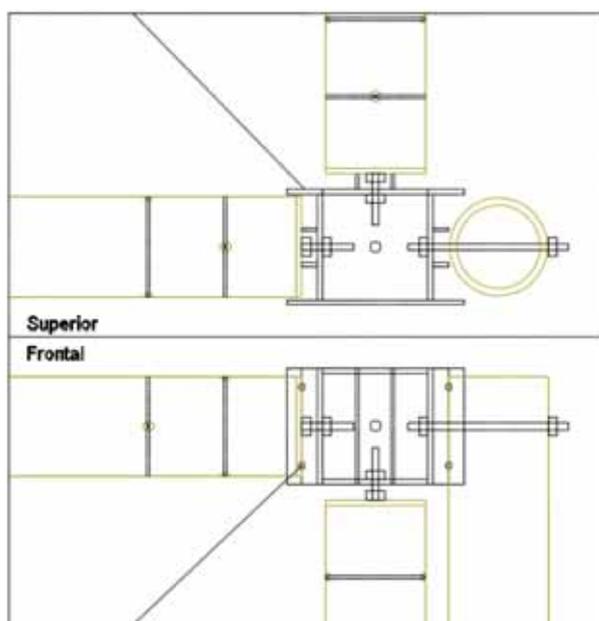


Figura 10. Unión entre módulos y nudos.

3. MÓDULOS ESPACIALES

La aplicación de las conexiones descritas en el capítulo anterior será en los módulos tridimensionales de guadua rolliza, estos módulos se describen a continuación.

3.1. CONCEPCIÓN Y DISEÑO

Para lograr un diseño de fácil armado, económico y rápida ampliación se tomó el concepto de juegos armables para niños, donde se pueden conectar elementos ortogonales (viga y columna) a través de una conexión típica usando el concepto de tornillo para los elementos y tuerca para el nudo, la capacidad máxima de los nodos es aquella que se obtuvo de los ensayos a tensión de la conexión de los elementos en guadua.

La rigidez de cada pórtico se logra mediante cuatro tensores verticales en diagonal, uno en cada sentido y repitiendo esto en ambas caras del nudo metálico, estos tensores diagonales se ubicarán en la estructura con el mismo concepto de muros de mampostería, esto con el fin de evitar la torsión de la estructura y soportar las cargas horizontales, de igual manera la estructura tiene un diafragma rígido el cual se logra mediante tensores horizontales que unen las cuatro esquinas del módulo.



Figura 11. Módulo espacial de dos pisos.

3.2. CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES

Para la construcción del módulo se usaron materiales naturales y procesados por el hombre, a continuación, se describe el tipo de material, en que elemento se usa y sus características:

Tabla 2.
Características guadua.

Material	Guadua
Elementos	Columnas y vigas
Dimensiones	Diámetro externo 130 mm Espesor de paredes 10 mm
Módulo de elasticidad	15183 Mpa ¹

¹ (Castillo, 2017) Datos de material del mismo proveedor y en condiciones ambientales similares.

Tabla 3.

Tabla de Características cable de acero.

Material	Cable acero 6x19
Elementos	Tensores diagonales
Dimensiones	1/4"
Capacidad	2400 kg

Tabla 4.

Características nudo metálico.

Material	Nudo metálico A572 Gr50
Elementos	Nudo metálico
Dimensiones	Espesor: 3/16" Alto: 200 mm Ancho: 200 mm Fondo: 200 mm
Capacidad	5000 kg

A continuación, se describe el paso a paso del armado del módulo de prueba:

1. Se armo dos (2) cuadrantes horizontales, uno de piso segundo nivel y otro de techo primer nivel, los cuales están compuestos por cuatro (4) elementos tipo viga y cuatro (4) elementos tipo nudo.



Figura 12. Unión Viga-nudo.

2. Los cuadrantes se rigidizan utilizando los tensores para generar ángulos internos de 90° entre los elementos, así garantizar un diafragma horizontal.



Figura 13. Diafragma de módulo.

3. Se arma cuadrante de piso primer nivel, se izan columnas cortas y se conectan los cuadrantes armados en el paso 1.



Figura 14. Diafragma de módulo.

4. Las columnas largas son izadas y se conectan a las columnas cortas del módulo de primer nivel.



Figura 15. Verticalidad de nivel 1 y columnas de unión.

5. Se izan las columnas cortas del módulo superior y se une el techo del segundo nivel, se une las columnas largas con las columnas cortas del módulo superior.
6. Los cables de acero se conectan a los nodos y se inicia a dar verticalidad a la estructura por medio de estos cables.



Figura 16. Verticalidad de estructura.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Se realizaron dos ejercicios, el primero aplicando la carga directamente sobre la viga superior del módulo del segundo nivel y la segunda aplicando la carga horizontal en la parte superior del módulo por medio de un elemento en acero rígido, para aplicar la carga en la parte superior de las columnas con el fin de medir el desplazamiento y concluir la capacidad de este ante cargas sísmicas, el ensayo fue realizado en el laboratorio de estructuras de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

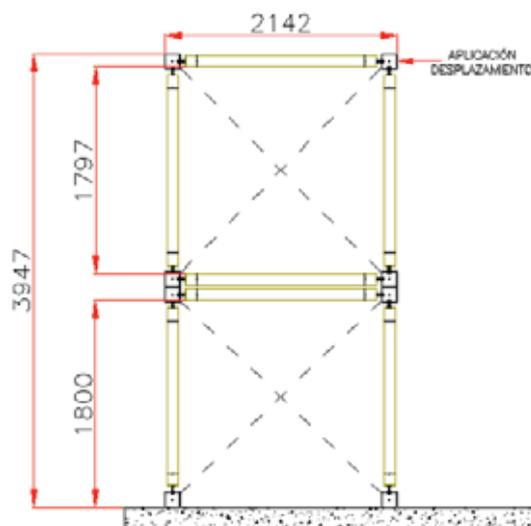


Figura 17. Esquema módulo de prueba.

El equipo usado es el actuador horizontal con desplazamiento máximo de 70 cm y carga de 30 toneladas con un sensor de desplazamiento Panasonic FPXC30R.



Figura 18. Imagen de prueba de laboratorio.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se observan en la figura 19, con una carga máxima de 1162.47 kg y un desplazamiento de 400 mm para la carga aplicada sobre la viga de guadua, y una carga de 2296 kg y desplazamiento de 74 mm para la carga aplicada sobre el extremo superior de las columnas; En ambos casos la falla se presentó en las diagonales que trabajaban a tensión (figura 20).

Tabla 5.
Aplicación de carga y resultados.

Modo de aplicación de carga	Carga Máxima (kg)	Desplazamiento máximo (mm)
Sobre viga de guadua segundo nivel	1162	400
Con elemento rígido de acero sobre parte superior columnas	2296	74

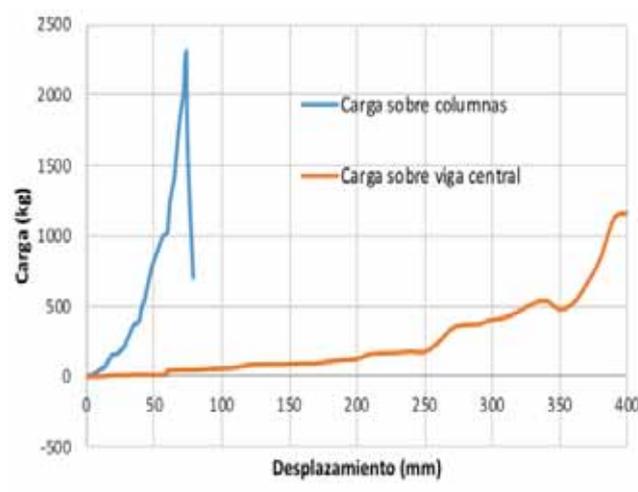


Figura 19. Gráfica- Carga vs Desplazamiento en módulo.

Se observa que los primeros desplazamientos son excesivos para una carga tan baja, esto debido a que la estructura al momento de recibir carga comienza a acomodarse, tanto los tensores como las conexiones viga nodo, por ello se observa un cambio de pendiente en la curva (carga – desplazamiento).



Figura 20. Fotografía del módulo después del fallo.

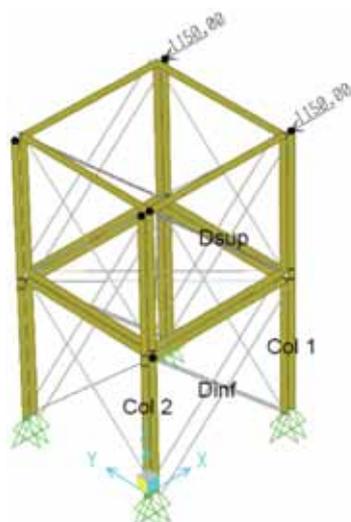
4.1. MODELO NUMÉRICO DEL MÓDULO ESPACIAL

Se realizó la modelación en el programa computacional SAP2000 (figura 14) para revisar las cargas que actúan sobre los elementos en el ensayo al módulo, de esta modelación se encontraron las siguientes cargas:

Tabla 6.
Dimensiones de probetas.

Elemento	Carga (kg)
Dinf	1553.66
Dsup	1551.42
Col 1	977.10
Col 2	2107.40

Figura 21. Esquema de modelación en SAP 2000.



4.2. APLICABILIDAD

Los módulos espaciales pueden ser usados para vivienda rural de dos pisos o casas de emergencia, que dada la precariedad en algunas regiones terminan por convertirse en soluciones permanentes, a continuación, se ilustra un espacio habitacional de dos niveles usando la configuración de módulos espaciales.

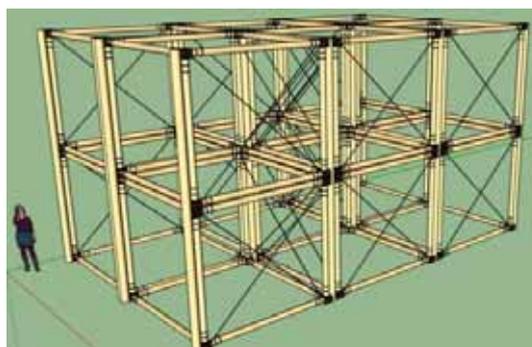


Figura 22. Isométrico estructura vivienda.

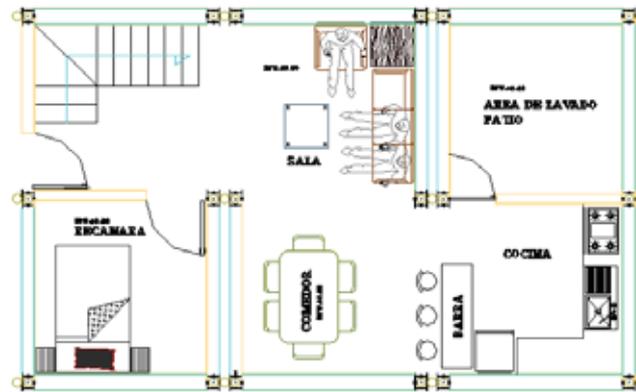


Figura 23. Planta arquitectónica primer nivel.

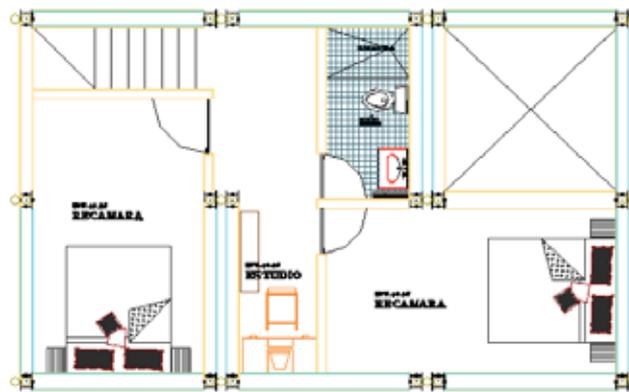


Figura 24. Planta arquitectónica segundo nivel.

5. CONCLUSIONES

El sistema presenta una rápida y limpia construcción, lo que facilita su uso para viviendas de emergencia y para la ampliación de estructuras existentes, el módulo de prueba se construyó en 4 días con 4 personas sin experiencia en construcción, lo que es una muestra de su facilidad.

De la modelación matemática y el ensayo realizado se identifica que los elementos que resisten la carga horizontal son los cables diagonales, como la falla se presentó en el gancho que conecta el cable con el nudo, la capacidad de la estructura se puede aumentar si se elimina el gancho del tensor y se reemplaza por un ojo cerrado.

Es necesario aplicar la carga directamente sobre los extremos de las columnas, realizar una deformación previa y ajuste de los elementos, para eliminar los pequeños desplazamientos que se realizan en los elementos de la estructura por el ajuste de los cables de acero.

Para un mejor desempeño de la estructura es necesario utilizar elementos no estructurales muy ligeros, para disminuir la masa que actúa con la carga sísmica.

6. REFERENCIAS

Castaño, F., & Moreno, R. D. (2004). Guadua para todos: Cultivo y aprovechamiento. *Proyecto Manejo Sostenible de Bosques de Colombia*.

- Echandía, C. (2000). El conflicto armado colombiano en los años noventa: cambios en las estrategias y efectos económicos. *Colombia Internacional*, 5.
- Herrera, J., & Takeuchi, caori. (2009). Comportamiento de pórticos en *Guadua angustifolia*, rigidizados mediante paneles prefabricados en bahareque. *Ingeniería E Investigación*, 29.
- Lamus, F., Plazas, M., & Luna, P. (2015). Resistencia de una conexión empernada solicitada a cizalladura doble paralela a la fibra para estructuras de *Guadua angustifolia* TT - Bolted join strength under parallel to grain double shear in *Guadua angustifolia* structures. *Tecnura*, 19(43), 52–62. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a03>
- Londono, X. (1990). *Aspectos sobre la distribución y la ecología de los bambues de Colombia*. Caldesia, 16, 139–153.
- Luna, P., Lozano, J., & Takeuchi, C. (2014). Determinación experimental de valores característicos de resistencia para *Guadua angustifolia*. *Maderas, Cinecia y Tecnología*, 16, 77–92.
- Osorio, J., González, E., & Cortés, E. (2010). *La Guadua: Fundamentos para el diseño de estructuras agropecuarias* (1st ed.). Medellín.
- Robledo, J., Muñoz, J., & Duque, G. (1999). Al Bahareque le fue muy bien - The Bahareque * made it very well.
- Sabate, P. (1998). NTP 155: Cables de acero.
- Takeuchi, caori. (2004). Comportamiento estructural de la *Guadua angustifolia*. Uniones en guadua. *Ingeniería E Investigación*, 55, 3–7.
- Widyowijatnoko, A. (2012). *Traditional and Innovative Joints in Bamboo Construction* (1st ed.).
- Barnet, Y., & Jabrane, F. (2019). Conectores de extremidades de bambú para estructuras exploracion de un sistema de incrustación en la pared intena del tallo. *Campus V*. XXIV. 53-66.
- Castillo, C. (2017). *Comportamiento del sistema estructural de proticos de columnas y paneles prefabricados (PCPP) en Guadua angustifolia ante cargas horizontales*. Universidad Nacional de Colombia.

Título del Artículo en español (no más de 18 palabras)

Article's title (no more than 18 words)

**Nombre Apellido⁽¹⁾,
Nombre Apellido⁽²⁾, ...,
Nombre Apellido⁽³⁾**

(indicar el nombre y apellido de cada autor. El superíndice se utiliza para identificar la afiliación institucional del autor)

⁽¹⁾ Afiliación institucional autor 1

Dirección autor 1

Correo electrónico autor 1

⁽²⁾ Afiliación institucional 2

Dirección autor 2

Correo electrónico autor 2

⁽³⁾ Afiliación institucional 3

Dirección autor 3

Correo electrónico autor 3

Recibido: mes, año

Aceptado: mes, año

<https://doi.org/10.XXXX/xx-xxxx>

"THIS IS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE TERMS OF THE CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION LICENSE, WHICH PERMITS USE, DISTRIBUTION AND REPRODUCTION IN ANY MEDIUM, PROVIDED THE ORIGINAL WORK IS PROPERLY CITED."

RESUMEN

En esta sección, se debe describir claramente y en forma sintetizada la naturaleza y objetivo del trabajo, el método utilizado, los resultados obtenidos, y las principales conclusiones e implicaciones del estudio. El resumen puede ser escrito en un máximo de 200 palabras.

En esta sección, se debe describir claramente y en forma sintetizada la naturaleza y objetivo del trabajo, el método utilizado.

Palabras claves:

Deben ser incluidas en orden alfabético y separadas por comas. Se debe incluir un máximo de ocho palabras claves.

ABSTRACT

This section describes the nature and goals of the study, the methodologic approach, the main results, conclusions, and the main implications. The abstract must be clearly and concisely detailed. The abstract has a maximum of 200 words.

This section describes the nature and goals of the study, the methodologic approach, the main results, conclusions, and the main implications.

Keywords:

The keywords must be sorted alphabetically and separated by commas. A maximum of eight keywords is allowed.

1. INTRODUCCIÓN

Escriba su texto en Arial de 10 Pts, espacio simple. No utilice el doble espaciado. Todos los párrafos deberán iniciar con una sangría de 1.25 cm en el primer renglón y justificados. Por favor deje un espacio en blanco entre párrafos. Se describen los fundamentos del estudio, y principalmente, el estado del arte del tema tratado. Se mencionan los estudios previos pertinentes que se hayan realizado utilizando citas en el texto.

Es importante que se indiquen las razones que han motivado la investigación y los objetivos que se pretende alcanzar con el tema.

1.1. SUBAPARTADOS

Todas las referencias bibliográficas deben ser citadas dentro del artículo. Se utiliza el formato (Apellido, año de publicación); por ejemplo: “Para realizar la caracterización reológica de la mezcla asfalto-polvo de llanta se utilizó los parámetros descritos en (Villacís, 2013)”.

2. METODOLOGÍA

Este apartado puede cambiar su título, lo cual dependerá de la investigación que se haya desarrollado.

En caso de que el estudio posea una metodología de experimentación, o pasos que se hayan seguido para llegar a los resultados, serán detallados en esta sección. Se debe incluir los instrumentos de investigación empleados, los datos que fueron tratados y cómo fueron analizados.

El lenguaje de este y los consiguientes apartados debe ser técnico - científico, de acuerdo a la particularidad del trabajo.

En el texto del artículo se debe hacer referencia a las figuras, tablas y ecuaciones, como se indica en las secciones 2.1, 2.2, y 2.3.

Si las figuras o tablas no son inéditas, es obligatorio indicar su fuente.

2.1. REFERENCIA A FIGURAS

Cada figura debe estar mencionada en el texto; por ejemplo: “En la Figura 1 se presenta la microscopía de las fibras desarrolladas con la técnica de electrohilado”.

Las figuras deben ser claras y legibles, independientemente de que la impresión se realice en blanco y negro. Además, deben tener su respectiva leyenda y numeración arábica secuencial en la parte inferior, y estar centradas en el texto. Deberán estar incorporados en el texto de forma ordenada. En el caso de figuras (imágenes, fotografías y gráficos) deberán ser integrados en el texto en formato JPEG o TIFF, mínimo 1024x758 pixeles o 4 Megabytes (MB), numerados según el orden de aparición en el texto.

2.2. REFERENCIA A TABLAS

La numeración de las tablas sigue las mismas directrices que la numeración de las figuras, con la diferencia que la leyenda se coloca en la parte superior de la tabla. No se debe dividir ni cortar la tabla en diferentes páginas. Se debe hacer referencia a la tabla en el texto; por ejemplo: La Tabla 1 muestra las características del equipo utilizado para los ensayos reológicos.

Los títulos de la figura y de las tablas deben ser en Arial de 10 Pts. Use mayúsculas sólo en la primer palabra de cada título de las Figuras y de las Tablas.

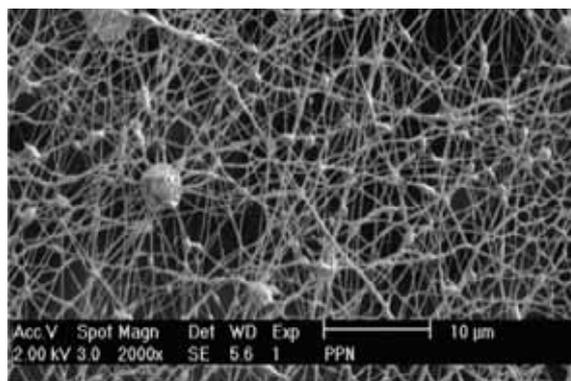


Figura 1. Microscopía de las fibras de polipirrol/óxido de polietileno/nylon 6 (Olvera, Aguilar, & Kryshtab, 2013).

Tabla 1.
Características del Reómetro Discovery HR-2

<i>Elemento</i>	<i>Características</i>
Tipo de rodamiento	Magnético
Diseño del motor	Copa de arrastre
Torque mínimo	2 nN.m
Torque máximo	200 mN.m
Frecuencia máxima	100 Hz

2.3. REFERENCIA A ECUACIONES

Todas las variables de una tabla o ecuación deben ser descritas en el texto. Las ecuaciones se escriben en la mitad del texto, con el editor de ecuaciones y van numeradas a la derecha entre paréntesis. No debe ir espacio entre la abertura del paréntesis y el número de identificación de la ecuación. Ejemplo: La ecuación (1) describe el fenómeno de continuidad (Mott, 1996).

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Donde \mathbf{u} es el vector velocidad.

2.4. RECOMENDACIONES GENERALES

El texto debe redactarse en tercera persona, no utilizar lenguaje informal, procurando escribir con palabras sencillas y claras. Para palabras en otro idioma, se debe utilizar letra itálica; por ejemplo: El fluido tiene un comportamiento pseudoplástico o *shear-thickening*.

Cuando se definan siglas, es importante, la primera vez que aparecen en el texto, colocar la definición y luego del paréntesis las siglas. Ejemplo: *American Society of Mechanical Engineers* (ASME). Después de ello, se recomienda utilizar únicamente las siglas.

Es mandatorio utilizar magnitudes del Sistema Internacional de Unidades de Medida.

3. RESULTADOS

En la sección resultados, se establecen las relaciones entre los datos obtenidos, el problema de investigación, el método y el soporte teórico de la revisión de la literatura. Los resultados deben presentarse siguiendo la secuencia lógica de presentación de la información. Se presentan únicamente los resultados relevantes de forma sintetizada en tablas, figuras, etc.

4. DISCUSIÓN

Se presenta la interpretación de los resultados en un contexto más amplio y en relación de la literatura existente del estudio específico. Por ejemplo, hacer referencia a los objetivos inicialmente planteados, así como a su eventual aplicación y los trabajos futuros que se podría realizar.

5. CONCLUSIONES

Este último párrafo presenta las conclusiones más significativas. Las conclusiones son generalizaciones derivadas de los resultados y discusión. Responden a los objetivos del estudio y están justificadas por los datos presentados.

6. AGRADECIMIENTOS

Se hace mención a las contribuciones del estudio, tales como soporte técnico, contribución crítica al manuscrito. Se coloca las fuentes de financiamiento del estudio.

7. REFERENCIAS

Las referencias deben colocarse en orden alfabético, siguiendo las normas APA. Se tienen dos casos, el primero que hacer referencia a libros y el segundo a artículos.

Para libros, primero se escribe el apellido y la primera letra del nombre con un punto y luego una coma, después entre paréntesis se coloca el año de publicación y con letra cursiva el título del libro. Después separado por un punto se indica, con letra normal sin cursiva, el lugar donde se publicó, nombre de editorial, la edición, el número de página y el lugar. Si el libro se halla en internet se escribirá: disponible en: dirección electrónica.

Para el artículo luego de la identificación de los autores en forma similar a la de libros: Apellido e inicial del nombre, se escribe el año de publicación entre paréntesis. Después entre comillas se escribe con letra normal el título del artículo, se cierra comillas y con letra cursiva se indica el nombre de la revista o congreso, el volumen se escribe con negrillas y entre paréntesis y con negrillas el número de la revista, luego sin negrillas se indica la página inicial una raya intermedia y la página final, el lugar donde fue publicado. Si está en internet de deberá indicar, disponible en: dirección de internet.

Olvera, M., Aguilar, J., & Kryshtab, T. (2013). "Procesamiento de micro y nanofibras de polipirrol/óxido de polietileno/nylon-6 por la técnica de electrohilado". *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, (**Volumen 14**) 575-581. Disponible en: <http://www.elsevier.es/es-revista-ingenieria-investigacion-tecnologia-104-articulo-procesamiento-micro-nanofibras-polipirrol-oxido-polietileno-nylon-6-S1405774313722674>

Villacís, N., (2013). *Estudio reológico de la mezcla SRFCC*. Quito. ESPE. Segunda Edición. 50 pp.

Olvera, M., Aguilar, J., & Kryshtab, T. (2013). "Procesamiento de micro y nanofibras de polipirrol/óxido de polietileno/nylon-6 por la técnica de electrohilado". *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, (**Volumen 14**) 575-581. Disponible en: <http://www.elsevier.es/es-revista-ingenieria-investigacion-tecnologia-104-articulo-procesamiento-micro-nanofibras-polipirrol-oxido-polietileno-nylon-6-S1405774313722674>

REVISTA
Ciencia 

ISSN 1390-1117



© Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sangolquí, Ecuador.
CIENCIA - QUITO, Volumen 22, No. 1, Enero 2020
ISSN: 1390-1117, ISSN E: 2697-343X.
Revista Trimestral- 50 ejemplares



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

 @ESPEU  Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE