

Bamboo as an alternative construction material for building enclosures

Karla María Carranza Zúniga¹; Julio César López Zerón¹; Karla Uclés Brevé¹

¹Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Tegucigalpa, Honduras;
10911006@unitec.edu, jclopezeron@unitec.edu, karla_ucles@unitec.edu

Abstract— This work assesses Honduran *Guadua angustifolia* as a lightweight wall and roof material for sustainable buildings. Six-year-old culms harvested from Cerro Juana Láinez Park (Tegucigalpa, Municipality of the Central District of Honduras) were tested: ten cylinders in compression (ASTM D695) and ten beams in three-point bending (ASTM D790). Mean strengths reached 29.9 MPa in compression and 18.5 MPa in bending—values that exceed those of Caribbean pine boards commonly used in low-rise housing. Multiple-linear regression yielded predictive models for compressive strength $\sigma_c = -150A + 702H + 41,444p - 2492$ ($R^2 = 0.74$) and flexion $\sigma_f = 7,135t + 299H + 68,640p - 13,872$ ($R^2 = 0.96$), where A (in²), H (in), t (in) and p (lb/in³) represent cross-sectional area, length, wall-thickness and density, respectively. Wall thickness accounts for 91 % of bending variability, whereas density and area dominate compression behavior. Compared with six Latin-American studies, strengths are 35–40 % lower due to site conditions and lack of post-harvest treatments yet remain adequate for non-load-bearing envelopes. Future research should enlarge the sample size, include tension and shear tests, and examine preservative treatments to enhance durability. Honduran bamboo thus emerges as a viable, low-carbon alternative that alleviates pressure on pine forests while meeting basic structural requirements.

Keywords— Bamboo, *Guadua angustifolia*, building envelopes, mechanical strength, compression, bending, sustainable construction.

El Bambú como Material de Construcción Alternativo para Cerramientos en Edificaciones

Karla María Carranza Zúniga¹; Julio César López Zerón¹; Karla Uclés Brevé¹

¹Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Tegucigalpa, Honduras;
10911006@unitec.edu, jclopezeron@unitec.edu, karla_ucles@unitec.edu

Resumen— Este estudio evalúa el potencial estructural del *Guadua angustifolia* como material de cerramiento ligero en edificaciones. Se recolectaron culmos de seis años en el Parque “Cerro Juana Lainez” (Tegucigalpa, Municipio del Distrito Central de Honduras) y se ensayaron diez probetas a compresión (ASTM D695) y diez vigas a flexión (ASTM D790). A partir de los valores experimentales se obtuvieron resistencias medias de 29.9 MPa en compresión y 18.5 MPa en flexión, suficientes para sustituir tableros de pino caribeño en muros y cubiertas. Mediante regresión múltiple se generaron expresiones predictivas para resistencia a compresión $\sigma_c = -150A + 702H + 41,444p - 2492$ ($R^2 = 0.74$) y flexión $\sigma_f = 7,135t + 299H + 68,640p - 13,872$ ($R^2 = 0.96$); donde σ_c , σ_f (psi), A (pulg²), H (pulg), t (pulg) y p (lb/in³) describen la geometría y densidad del culmo. El espesor de pared explica el 91 % de la variabilidad en flexión, mientras que densidad y área gobiernan la compresión. La comparación con seis estudios latino-americanos revela resistencias entre 35 % y 40 % menores, atribuibles a condiciones edafoclimáticas y ausencia de tratamientos postcosecha; no obstante, el desempeño cumple las exigencias de viviendas de baja altura. Se recomienda ampliar el muestreo, incluir ensayos de tracción y cortante, y evaluar preservantes para mejorar durabilidad. El bambú hondureño se perfila, así como alternativa sostenible que reduce la presión sobre los bosques de pino y la huella de carbono en la construcción.

Palabras clave— Bambú, *Guadua angustifolia*, cerramientos, resistencia mecánica, compresión, flexión, construcción sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

El bambú se está convirtiendo en un material constructivo capaz de equilibrar la actividad humana con la naturaleza y de disminuir la tala de bosques de pino, siempre que se conozcan y sea controlado el conjunto de sus propiedades físicas, mecánicas y estructurales [1]. Gracias a estas características, puede proponerse como alternativa para edificaciones de uso residencial.

Honduras reúne las condiciones, tanto climáticas como de suelo, idóneas para el cultivo de *Guadua angustifolia* [2]. Esta especie, de rápido crecimiento y propagación, ofrece rendimientos anuales que superan con creces a los de la madera de pino. Las plantaciones existentes en la zona norte del país podrían ampliarse, siguiendo el referente de Costa Rica, donde se reportan superficies superiores a 1,000 Ha dedicadas a la *Guadua* [3].

En esta investigación se trabaja esencialmente sobre la base de una especie tropical de Bambú (*Guadua angustifolia*), cultivada en la ciudad de Tegucigalpa, municipio del Distrito Central en Honduras. Asimismo, se evalúan las resistencias a

compresión y flexión conforme a la norma ISO 22157-1 [4], con el fin de determinar los sistemas constructivos en los que el bambú pueda sustituir de forma viable a la madera de pino.

El estudio representa un punto de partida para explorar mecánicamente este material, porque existen otros puntos relevantes, tales como ser la preservación, la cual mitiga los efectos negativos de ciclos humedad y secado, así como ataques biológicos (factores que limitan la competitividad del bambú frente a otros materiales) [5]. Y dicho tópico posee un impacto significativo durante la vida útil de las edificaciones.

Países latinoamericanos han avanzado en la regulación estructural del bambú: Colombia incorpora el título G de la NSR-10 [6]; Perú cuenta con la Norma Técnica E-100 Bambú [7]; y México incluye lineamientos en su Manual de Construcción Sustentable [8]. No obstante, la ausencia de reglamentación específica en Honduras y la variabilidad climática regional justifican el desarrollo de estudios locales que validen la idoneidad de la *Guadua* hondureña y establezcan criterios de diseño acordes a la realidad nacional.

En síntesis, analizar las propiedades físicas y mecánicas del bambú hondureño, junto con su desempeño frente a la exposición ambiental, permitirá fundamentar su uso en paredes y cubiertas de viviendas. Los resultados aportarán evidencia científica para impulsar lineamientos normativos y estrategias de cultivo que posicionen al bambú como un recurso sostenible y competitivo dentro del sector construcción del país.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. Precedentes del Problema

Durante las últimas cuatro décadas Honduras ha perdido aproximadamente 1.7 millones ha de cobertura forestal (una superficie equivalente al departamento de Gracias a Dios), según las evaluaciones de la FAO y el Instituto de Conservación Forestal (ICF) [9], [10]. La Fig. 1, elaborada con dichos registros, muestra la gravedad espacial de la deforestación (verde = bajo, amarillo = moderado, rojo = alto).

Este ritmo de pérdida, asociado en gran parte al consumo intensivo de madera para construcción, exige la adopción de materiales alternativos que reduzcan la tala de bosques de pino. Entre ellos destaca el bambú, cuya disponibilidad y rápida regeneración pueden contribuir a frenar la degradación ambiental [11].



Fig. 1 Mapa de deforestación de Honduras.

2. Definición del Problema

La explotación desmedida de la madera de pino como insumo constructivo provoca impactos irreversibles en los ecosistemas, particularmente sobre las cuencas hidrográficas nacionales. Frente a este escenario, investigar el potencial de *Guadua angustifolia* como sustituto se vuelve imperativo para el sector construcción. El bambú alcanza la madurez en 4–6 años (tres veces más rápido que los pinos caribeños más utilizados) y puede cosecharse de forma selectiva sin talar el culmo completo [12]. Por tanto, validar su desempeño mecánico y viabilidad productiva establece un paso estratégico significativo hacia la construcción sostenible en el país.

3. Justificación

Honduras presenta un índice de pobreza del 52.6 % (2017) [13]; promover una cadena de valor basada en bambú generaría empleo rural y reduciría el costo de la vivienda social. La experiencia de China y Costa Rica demuestra que el bambú puede abastecer mercados maderables a menor precio y con menores tiempos de renovación [14]. Además, la dureza Janka del bambú laminado (aprox. 6,400 N) supera la del roble (6,000 N) y es muy superior a la del pino caribeño (3,500 N) y del abeto (2,400 N) [15], lo que refuerza su competitividad técnica. La Fig.2 ilustra una vivienda cuyos cerramientos emplean bambú tratado.



Fig. 2 Ejemplo de vivienda con cerramiento de bambú.

La Fig.3 muestra la sección transversal anular típica ($\varnothing \approx 100$ mm), y la Fig.4 presenta detalles constructivos de su uso en paredes y acabados.



Fig. 3 Sección transversal anular de una pieza de bambú.



Fig. 4 Detalle del bambú en estructuras y cerramientos.

Las pruebas desarrolladas en laboratorio y/o campo han revelado resistencias a compresión y flexión compatibles con exigencias de sistemas de cerramiento convencionales [11]. Sumado a su flexibilidad geométrica, que posibilita diseños arquitectónicos complejos, el bambú podría representar una solución socioambiental para las comunidades de Honduras. Su rápida propagación, menor huella de carbono y potencial de generación de ingresos rurales sostienen la urgencia de profundizar en su caracterización y estandarización normativa.

III. METODOLOGÍA

A. Enfoque Experimental Cuantitativo

La investigación se estructuró bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental, donde se recopilan y analizan datos numéricos para contrastar hipótesis y establecer pautas de comportamiento [16].

El diseño experimental se centra en determinar, mediante ensayos normalizados, las resistencias a compresión y flexión de *Guadua angustifolia*, controlando rigurosamente las condiciones de laboratorio y variabilidad morfo-geométrica de las muestras.

Las pruebas de laboratorio se realizaron conforme a norma ISO 22157-1 [4], que garantiza trazabilidad y capacidad de comparación internacional de los resultados. Las variables independientes se manipularon dentro de rangos estrictos,

mientras que las respuestas/propiedades mecánicas (variables dependientes) se registraron y analizaron con estadística inferencial para verificar diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

B. Variables de la Investigación

Para esta investigación son aplicables los experimentos de laboratorio, donde los efectos de las variables independientes que influyen en el problema de investigación siguen una metodología establecida. En este caso las propiedades mecánicas de compresión y flexión del bambú son propósitos de la investigación estableciendo las siguientes variables.

1. Variables Dependientes (respuestas mecánicas):

Las principales características evaluadas en los ensayos de laboratorio fueron las siguientes:

- ✓ *Resistencia a compresión paralela a la fibra:* esfuerzo máximo que soporta el culmo antes del aplastamiento (σ_c , MPa) [4].
- ✓ *Resistencia a flexión estática:* momento flector último sobre la sección transversal (σ_f , MPa) ante una carga perpendicular al eje longitudinal [4].

2. Variables Independientes (explicativas):

Las características geométricas y de masa del bambú que potencialmente influyen en las resistencias fueron definidas en dos grupos:

2.1. Para la compresión;

- ✓ Área de contacto (A): 1,300 – 3,200 mm² (2 – 5 in²)
- ✓ Diámetro externo (D_e): 50 – 125 mm (2 – 5 in)
- ✓ Altura de probeta (h_c): 180 – 210 mm (7 – 8 in)
- ✓ Masa (m_c): 0.40 – 0.73 kg (0.9 – 1.6 lb)

2.2. Para la flexión;

- ✓ Espesor de pared (t): 15 – 38 mm (0.6 – 1.5 in)
- ✓ Luz de ensayo (L): 580 – 610 mm (23 – 24 in)
- ✓ Masa (m_f): 0.9 – 1.8 kg (2 – 4 lb)

Todas las muestras se acondicionaron a 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % HR hasta alcanzar una humedad de equilibrio del 12 ± 1 %, en concordancia con la norma ISO 22157-1 [4].

Cada combinación de niveles independientes se ensayó con replicación $n=10$, permitiendo modelar la influencia individual y la interacción de las variables mediante análisis de varianza multifactorial (ANOVA) y regresión múltiple.

C. Técnicas e Instrumentos Aplicados

La resistencia a compresión paralela a la fibra se determinó mediante el procedimiento de la norma ASTM D695-22, que describe el ensayo uniaxial sobre probetas cilíndricas cortas de materiales no metálicos [17].

Cada muestra (culmo seccionado y a tope) fue colocado entre platos rígidos de una máquina universal (con capacidad de 300 kN y célula de carga calibrada a ± 0.5 %). La carga se aplicó a velocidad controlada de 0.5 mm/min hasta la

falla, y la resistencia se obtuvo dividiendo la carga máxima por el área transversal inicial de la probeta.

Para materiales que no se fracturan de forma frágil bajo compresión, la resistencia se reporta como el esfuerzo necesario para alcanzar una deformación unitaria arbitraria (usualmente 10 % de la altura inicial) [17]. La medición de desplazamiento axial fue realizada a través de extensómetro lineal (precisión = 0.01 mm).

La resistencia a flexión estática se evaluó con el método de viga simplemente apoyada descrito en la normativa ASTM D790-23 [18]. Se empleó un montaje de tres puntos con luz efectiva de 600 mm y rodillos de apoyo de 12.5 mm de diámetro. La carga se incrementó a 5 mm/min hasta la rotura; y el esfuerzo máximo de flexión se calculó con la ecuación $\sigma_f = 3PL / 2bd^2$.

Los resultados brutos se procesaron en Minitab 21, software estadístico orientado a control de calidad y análisis multifactorial [19]. Se aplicaron:

- ✓ Estadística descriptiva y box-plots para detectar atípicos.
- ✓ Intervalos de confianza del 95 % para las medias de σ_c y σ_f .
- ✓ ANOVA de dos factores ($\alpha = 0.05$) para cuantificar la influencia de las variables independientes y sus interacciones.
- ✓ Regresión múltiple para obtener modelos predictivos de σ_c y σ_f en función de D_e , t y masa.

D. Materiales

Bambú (*Guadua Angustifolia*): Muestras de bambú *Guadua Angustifolia*, obtenidas del Parque “Cerro Juana Laínez” de la ciudad de Tegucigalpa. Las probetas se prepararon con las geometrías requeridas por las normas; y por tal razón, los culmos de bambú fueron conformados con dimensiones longitudinales de 7–8 pulgadas (compresión, σ_c) y 23–24 pulgadas (flexión, σ_f) y diámetro de 2 – 5 pulgadas.

Es importante mencionar que los culmos se secaron al 12 ± 1 % de humedad en cámara climática (20 °C, 65 % HR) antes de ser mecanizados.

E. Población y Muestra

La obtención de un censo forestal total implicaría costos logísticos y económicos elevados; en inventarios de bambú no existe una población perfecta debido a la diversidad interna en la cobertura vegetal y dinámica de rebrote [20].

Por ello se adoptó un muestreo no probabilístico dirigido; se seleccionaron diez (10) culmos homogéneos para cada ensayo ($n=10$ para compresión y $n=10$ para flexión), garantizando de esa forma una representatividad de los rangos geométricos definidos en las variables independientes.

Esta cantidad cumple las exigencias de réplica mínima recomendadas para análisis factorial y permite detectar diferencias de al menos 15 % en resistencia con un poder estadístico ≥ 0.80 .

F. Metodología de Estudio

Hipótesis:

El bambú *Guadua angustifolia* constituye una alternativa técnica y ambientalmente viable a la madera de pino en cerramientos (paredes y cubiertas) de edificaciones, ya que sus propiedades físico-mecánicas cumplen requisitos estructurales contemplados en normas internacionales [4], [21].

Fases Metodológicas:

Fase	Descripción	Productos
1. Viabilidad y delimitación	(a) Levantamiento bibliográfico sobre presencia de <i>G. angustifolia</i> en Honduras, clima y suelos aptos, y experiencias de aplicación en Latinoamérica [6], [8], [21] (b) Definición de alcance: uso en cerramientos; variables mecánicas clave (σ_c , σ_f).	Estado del arte y justificación del estudio.
2. Diseño experimental	(a) Selección del sitio de muestreo (Parque “Cerro Juana Laínez”) (b) Criterios de inclusión de culmos: edad 4-5 años, diámetro 50-125 mm, humedad inicial $\leq 25\%$. (c) Plan de muestreo dirigido: $n = 10$ probetas compresión + $n = 10$ probetas flexión.	Plan de ensayos y logística de colecta.
3. Preparación de muestras	(a) Corte y sellado de extremos (b) Secado en cámara (20°C , 65% HR) hasta $12 \pm 1\%$ de humedad (c) Maquinado según ISO 22157-1 [4].	Probetas normalizadas y trazables.
4. Ensayos de laboratorio	(a) Compresión (ASTM D695-22) [17] (b) Flexión (ASTM D790-23) [18]. (c) Registro de carga-deformación en máquina universal (precisión $\pm 0.5\%$).	Bases de datos σ_c y σ_f .
5. Análisis estadístico	a) Estadística descriptiva y detección de atípicos (b) ANOVA multifactorial y regresión múltiple (Minitab 21) [19]. (c) Intervalos de confianza 95 % para medias.	Modelos predictivos y significancia de variables.
6. Interpretación y validación	a) Comparación de σ_c y σ_f con requisitos de cerramientos de madera de pino [22], [23] (b) Evaluación de factibilidad económica preliminar.	Discusión de resultados.
7. Conclusiones y recomendaciones	a) Síntesis de hallazgos respecto a la hipótesis (b) Lineamientos para uso de bambú en paredes y cubiertas (tratamientos, uniones, protección). (c) Agenda de investigación futura (durabilidad, conexiones, diseño sísmico).	Documento final y propuesta normativa.

IV. RESULTADOS

En este capítulo se documenta la generación, tabulación y análisis de los datos obtenidos al evaluar, mediante ensayos de laboratorio, las propiedades mecánicas de la especie *Guadua Angustifolia*.

Las variables geométricas y de masa definidas en la metodología se midieron para cada probeta, y los resultados se contrastaron con los requisitos normativos aplicables. A continuación, se presenta la secuencia de trabajo con la integración de las Figuras 5–7 y las Tablas I–III.

A. Ensayos de Laboratorio

Las muestras rollizas de bambú, procedentes del Parque “Cerro Juana Laínez” (Tegucigalpa), se extrajeron de culmos con edad de 6 años, adecuado para estudios estructurales [10].

La ubicación del sitio de corte se ilustra en la Fig. 5, mientras que la preparación de probetas para compresión se muestra en la Fig. 6.



Fig. 5 Ubicación de extracción de muestras de bambú.



Fig. 6 Muestras de bambú para ensayo a compresión.

B. Ensayo a Compresión

Se cortaron diez (10) segmentos de 8 ± 0.1 in de altura. Los diámetros, externo (D_e) e interno (D_i) se midieron con pie de rey digital (precisión = 0.01 in) y el peso con balanza (precisión = 0.01 lb). Las Tablas I y II recogen los datos geométricos y las propiedades derivadas (área, volumen y densidad media de 0.04 lb/in^3).

TABLA I
DATOS GEOMÉTRICOS DE MUESTRAS PARA COMPRESIÓN.

Muestra	D_{e1} pulg.	D_{e2} pulg.	D_{e-prom} pulg.	D_{i1} pulg.	D_{i2} pulg.	D_{i-prom} pulg.
1	2.99	2.87	2.93	1.54	1.73	1.63
2	2.83	2.83	2.83	2.32	2.32	2.32
3	2.99	2.99	2.99	2.24	2.17	2.20
4	2.87	2.91	2.89	2.09	2.09	2.09
5	2.83	2.87	2.85	2.05	1.97	2.01
6	2.95	2.83	2.89	1.89	1.97	1.93
7	2.99	3.23	3.11	2.17	2.17	2.17
8	2.91	3.03	2.97	2.20	2.32	2.26
9	2.99	3.07	3.03	2.48	2.48	2.48
10	2.91	2.99	2.95	1.81	1.85	1.83
Promedio			2.95			2.09

TABLA II
PROPIEDADES DERIVADAS DE LAS MISMAS PROBETAS

Muestra	A pulg ²	H pulg.	W lb	V pulg ³	ρ lb/pulg ³
1	4.66	7.68	1.59	35.78	0.04
2	2.07	7.88	0.98	16.34	0.06
3	3.21	7.80	0.93	25.05	0.04
4	3.16	7.87	1.07	24.86	0.04
5	3.23	8.07	1.14	26.09	0.04
6	3.65	8.03	1.20	29.34	0.04
7	3.92	7.87	0.98	30.83	0.03
8	2.91	7.80	1.05	22.72	0.05
9	2.39	7.95	0.88	18.98	0.05
10	4.22	8.07	1.36	34.02	0.04
Promedio	3.34	7.90	1.12	26.72	0.04

El ensayo de compresión se realizó en máquina universal según ASTM D695 [17] (rapidez 0.5 mm/min). La instalación del culmo entre platos de acero se observa en la Fig. 7.



Fig. 7 Ensayo a compresión de las muestras bambú para estudio.

La Tabla III resume el área de sección (A), la carga máxima (P) y la resistencia a compresión (σ_c). El esfuerzo medio fue 4,337 psi (≈ 29.9 MPa), con desviación estándar de 518 psi y coeficiente de variación de 12 %. Estos valores sitúan a la Guadua hondureña dentro del rango reportado por Janssen [11] y superior al pino caribeño utilizado en cerramientos ligeros ($\approx 3,200$ psi) [22].

TABLA III
RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

	Área (A)	Carga Aplicada (P)	Resistencia a Compresión (σ_c)
Muestra	(pulg ²)	(lb)	(psi)
1	4.66	17,350	3,731
2	2.07	10,940	5,285
3	3.21	14,520	4,523
4	3.16	12,240	3,873
5	3.23	14,700	4,551
6	3.65	16,220	4,444
7	3.92	14,210	3,625
8	2.91	14,160	4,866
9	2.39	10,410	4,356
10	4.22	17,350	4,111
Media	3.34	14,210	4,337

La dispersión observada se relaciona con la variabilidad del espesor de pared (t) y del diámetro externo (D_e), factores que se analizarán en la sección de discusión estadística.

C. Estadística Descriptiva del Ensayo a Compresión

Tras registrar la carga máxima de cada una de las diez probetas cilíndricas de Guadua angustifolia, los datos de resistencia a compresión (σ_c) se procesan en Minitab 21 [19]. Los estadísticos principales se presentan en la Tabla IV, y permiten dimensionar la dispersión natural del material:

TABLA IV
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL BAMBÚ

Estadístico	Valor (psi)	Comentario
Media	4,337	Punto central de las mediciones (≈ 29.9 MPa)
Mediana	4,400	Distribución simétrica (media $\approx$ mediana)
Mínimo	3,625	Muestra #7, culmo de pared gruesa deformado localmente
Máximo	5,285	Muestra #2, culmo de diámetro pequeño y alta densidad
Rango	1,660	—
Suma	43,365	Verificación de consistencia de cómputo

Para cuantificar la influencia de la geometría (área de contacto A, altura H) y la densidad ρ en la resistencia, se ajustó una regresión lineal múltiple. El modelo, con coeficiente de determinación $R^2 = 0.677$ ($p < 0.05$), se expresa en (1):

$$\sigma_c [\text{psi}] = -150A + 702H + 41444\rho - 2492 \quad (1)$$

Donde:

A = área de la sección transversal (in²);

H = altura de la probeta (in);

ρ = densidad (lb/in³).

El signo negativo de A refleja el efecto de paredes delgadas a igualdad de diámetro externo, mientras que los coeficientes positivos de H y ρ evidencian la contribución de culmos más altos (relación esbeltez) y de mayor densidad a la capacidad portante. El valor de R^2 indica que cerca del 68 % de la variación de σ_c se explica por estos parámetros, resultado coherente con estudios previos sobre bambú colombiano [21].

D. Ensayo a Flexión del Bambú

Se confeccionaron 10 vigas de 24 ± 0.1 in de longitud (luz), con diámetros externos comprendidos entre 2.66 in y 3.35 in., generando las diez piezas de Guadua Angustifolia (ver Fig. 8).



Fig. 8 Muestras de bambú para ensayo a flexión.

La Tabla V recopila todos los datos geométricos (D_e : diámetro exterior, D_i : diámetro interior y altura H), de peso (W) y densidad (ρ), necesarios para la posterior interpretación estadística:

TABLA V
DATOS DE LAS MUESTRAS DE BAMBÚ PARA ENSAYO A FLEXIÓN

Muestra	D_{eprom} pulg.	D_{iprom} pulg.	e pulg.	H pulg.	W lb	V pulg ³	ρ lb/pulg ³
1	2.97	1.61	1.36	24.21	4.24	118.47	0.04
2	2.68	1.75	0.93	24.02	2.94	77.29	0.04
3	3.35	2.64	0.71	24.13	3.04	80.38	0.04
4	3.27	1.77	1.50	24.02	3.82	142.20	0.03
5	3.25	2.60	0.65	24.41	3.28	72.81	0.05
6	3.21	2.36	0.85	23.82	2.35	88.21	0.03
7	3.11	2.32	0.79	24.02	3.56	80.69	0.04
8	3.33	2.62	0.71	23.94	2.95	79.20	0.04
9	2.76	1.69	1.06	23.82	3.55	88.47	0.04
10	2.66	1.75	0.91	24.25	2.48	76.05	0.03
Promedio	3.06	2.11	0.94	24.06	3.22	92.31	0.03

El montaje de tres puntos (rodillos $\varnothing = 12.5$ mm, luz efectiva = 24 in) se instaló en la máquina universal (Fig. 9), donde cada viga se cargó a 5 mm/min hasta la rotura



Fig. 9 Ensayo a flexión de piezas de bambú con máquina universal de compresión debidamente adaptada.

La Tabla VI muestra la carga puntual máxima (P) y el módulo de rotura (σ_f).

TABLA VI
RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO A FLEXIÓN DEL BAMBÚ

Muestra	Carga Puntual máxima aplicada (libra)	Resistencia a la flexión (σ) (psi)
1	4,560.00	5,752.10
2	2,730.00	3,443.70
3	1,410.00	913.10
4	3,190.00	5,801.20
5	1,640.00	1,166.20
6	1,230.00	885.80
7	2,180.00	1,740.10
8	1,730.00	1,121.60
9	3,260.00	3,693.40
10	1,850.00	2,357.90
Media	2,378.00	2,687.50

El módulo de rotura (σ_f) fue calculado mediante (2);

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

Donde:

- ✓ L = luz (in),
- ✓ b = ancho (in) y
- ✓ d = diámetro externo (in).

El valor medio obtenido fue 2,688 psi (18.5 MPa), con un máximo de 5,801 psi en la Muestra #4 (pared gruesa) y un mínimo de 886 psi en la Muestra #3 (pared delgada + nudos cercanos al plano neutro).

E. Estadística Descriptiva del Ensayo a Flexión

Utilizando como base de cálculo el conjunto de resultados obtenidos por el ensayo a flexión en vigas, con la ayuda del programa computacional estadístico “Minitab” se realizó un análisis descriptivo general que se muestra en la tabla VII.

TABLA VII
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL BAMBÚ

Estadístico	Valor (psi)	Observaciones
Media	2,688	Valor base para diseño preliminar
Mediana	2,049	Asimetría positiva (influencia de 2 muestras de pared gruesa)
Mínimo	886	Muestra #6, pared delgada, fisura en nudo
Máximo	5,801	Muestra #4, pared gruesa, densidad baja (0.03 lb/in ³)
Rango	4,915	—

Se ajustó una regresión lineal múltiple con espesor de pared (t), luz (H) y densidad (ρ) como predictores. El modelo, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.942$ ($p < 0.01$), ha quedado conformado de la siguiente manera acorde a (3):

$$\sigma_f [\text{psi}] = 7\,135t + 299H + 68\,640\rho - 13\,872 \quad (3)$$

El alto valor de R^2 confirma que la sección transversal gobierna el comportamiento a flexión, en línea con la teoría de vigas delgadas. Además, la influencia positiva de ρ evidencia la correlación existente entre una alta capacidad portante como consecuencia de tener mayor densidad.

En resumen:

- Los coeficientes de variación de σ_c (12 %) y σ_f (≈ 40 %) se encuentran dentro de los rangos documentados para “bamboo culms” sin laminado [21], destacando la necesidad de clasificar el material según pared y densidad para aplicaciones estructurales.
- Los valores medios obtenidos superan los requisitos de cerramientos ligeros basados en pino caribeño ($\sigma_c \approx 3,200$ psi, $\sigma_f \approx 1,800$ psi) [22], lo cual sustenta la hipótesis de sustitución planteada.
- (1) y (3) podrían servir como expresiones de diseño preliminares, siempre que se apliquen coeficientes de seguridad acorde a dispersión observada y se incorporen los resultados de durabilidad en investigaciones futuras.

V. DISCUSIÓN

Los datos experimentales permitieron conformar y ajustar dos expresiones predictivas:

$$\sigma_c [\text{psi}] = -150A + 702H + 41444\rho - 2492 \quad (1)$$

$$\sigma_f [\text{psi}] = 7135t + 299H + 68640\rho - 13872 \quad (3)$$

Donde:

A = área de contacto (in²)

H = altura de probeta (compresión) o luz de viga (flexión) (in)

ρ = densidad básica (lb/in³)

t = espesor de pared (in).

Estas ecuaciones (obtenidas con Minitab 21 mediante regresión múltiple con intercepto) alcanzan un coeficiente de determinación $R^2 = 74.3\%$ para esfuerzo de compresión y $R^2 = 96.2\%$ para esfuerzo de flexión. Las Tablas VIII y IX presentan los resultados de calcular residuos (diferencia entre medición y predicción), esto con el apoyo de (1) y (3), donde es posible observar que la diferencia es relativamente leve.

TABLA VIII

RESISTENCIA A COMPRESIÓN: MEDICIÓN, VALOR AJUSTADO (1) Y RESIDUO.

Muestra	σ_c medida (psi)	σ_c ajustada (psi)	Residuo (psi)
1	3 731	3 858.12	-127.12
2	5 285	5 215.90	69.10
3	4 523	4 159.86	363.14
4	3 873	4 216.50	-343.50
5	4 551	4 346.40	204.6
6	4 444	4 255.32	188.68
7	3 625	3 688.06	-63.06
8	4 866	4 619.30	246.7
9	4 356	4 802.60	-446.60
10	4 111	4 197.90	-86.90

TABLA IX

RESISTENCIA A FLEXIÓN: MEDICIÓN, VALOR AJUSTADO (3) Y RESIDUO.

Muestra	σ_f medida (psi)	σ_f ajustada (psi)	Residuo (psi)
1	5 752.1	5 815.99	-63.89
2	3 443.7	2 691.13	752.57
3	913.1	1 154.32	-241.22
4	5 801.2	6 071.68	-270.48
5	1 166.2	1 496.34	-330.14
6	885.8	1 374.13	-488.33
7	1 740.1	1 692.23	47.87
8	1 121.6	1 097.51	24.09
9	3 693.4	3 558.88	134.52
10	2 357.9	1 930.80	427.1

Con las ecuaciones de regresión, (1) para compresión y (3) para flexión, se evaluó la relevancia estadística de cada predictor (área de contacto A, altura/luz H y densidad ρ para compresión; espesor t, altura/luz H y densidad ρ para flexión).

La Tabla X y la Tabla XI presentan los p-valores y la R^2 parcial (porcentaje de la varianza explicada por cada variable de forma individual) calculados con los diez registros completos.

TABLA X

SIGNIFICANCIA DE LOS PREDICTORES EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN (1)

Variable	p-valor	R^2 parcial
Área de contacto (A)	0.511	56.62 %
Altura (H)	0.448	2.32 %
Densidad (ρ)	0.093	67.78 %

TABLA XI

SIGNIFICANCIA DE LOS PREDICTORES EN LA RESISTENCIA A FLEXIÓN (3)

Variable	p-valor	R^2 parcial
Espesor (t)	0.000	91.46 %
Altura/Luz (H)	0.749	0.00 %
Densidad (ρ)	0.059	5.30 %

A. ¿Qué podemos establecer sobre la resistencia del bambú? Resistencia a Compresión (R^2 global = 74.3 %)

- ❖ Densidad y área de contacto son los predictores más influyentes, explicando juntos $\approx 68\%$ y 57% de la variabilidad, respectivamente.
- ❖ Ninguno alcanza significancia al 95 % ($p < 0.05$); sin embargo, el p-valor de la densidad (0.093) sugiere una posible tendencia que podría confirmarse con una muestra más amplia.
- ❖ La altura de la probeta aporta poca información ($R^2 \approx 2\%$), lo cual indica que dentro del rango 7.7-8.1 in, su influencia estructural es secundaria.

Resistencia a Flexión (R^2 global = 96.2 %)

- ❖ El espesor de la pared es el factor que más influye en el comportamiento a flexión, con una correlación muy alta ($R^2 \approx 91\%$, $p \approx 0$). Esto confirma que la rigidez frente a la flexión aumenta rápidamente con el espesor, ya que dicha rigidez (representada por el momento de inercia I) es proporcional al cubo del espesor de la pared ($I \propto t^3$).
- ❖ La densidad muestra una influencia moderada ($R^2 \approx 5\%$, $p \approx 0.06$) y podría volverse significativa con más casos.
- ❖ La luz de ensayo no resulta explicativa ($p \approx 0.75$), coherente con el hecho que todas las vigas se ensayaron con una luz prácticamente constante (≈ 24 in).

B. Alcance Predictivo y Recomendaciones

- El coeficiente de determinación global confirma que el modelo de compresión explica tres cuartas partes de la variación observada, mientras que el modelo de flexión describe prácticamente toda la dispersión experimental.
- Para mejorar la predicción en compresión, se sugiere incorporar variables adicionales, p. ej.: esbeltez (H/D_c), distancia entre nudos y contenido de humedad exacto.
- En flexión, el foco debe estar centrado en refinar la clasificación por espesor y densidad, ampliando el rango de espesores (≤ 0.5 in y ≥ 1.8 in) y aumentando el número de vigas para validar extrapolaciones.

En síntesis, los p-valores y R^2 parciales confirman que la densidad y el espesor de pared son los parámetros clave para dimensionar cerramientos de bambú Guadua angustifolia, mientras que la altura de probeta o luz de viga, dentro de los

rangos ensayados, tiene un efecto marginal sobre la capacidad resistente.

Es importante subrayar, como está señalado por [23], que el coeficiente de determinación R^2 expresa únicamente la proporción de variación de la respuesta explicada por un modelo lineal. Cuanto mayor es R^2 , más estrecho parece el ajuste; sin embargo, el índice no revela sesgos en los coeficientes ni garantiza la idoneidad global del modelo.

Por ello, un R^2 bajo puede corresponder a un modelo válido (si la respuesta es intrínsecamente dispersa) y un R^2 alto puede ocultar problemas de especificación. La buena práctica exige, además de R^2 , revisar gráficas de residuos, estadísticos de contraste y, sobre todo, el conocimiento mecánico del fenómeno.

C. Evaluación de las Variables Predictoras

❖ Compresión.

En la Tabla X se observa que ninguno de los predictores supera el umbral de significancia ($p < 0.05$). Aun así, área de contacto y, sobre todo, densidad explican individualmente un 56.6 % y un 67.8 % de la varianza, respectivamente, mientras que la altura aporta apenas un 2.3 %.

El R^2 global del modelo es 74.3 %, valor moderado que indica que las variables consideradas capturan cerca de tres cuartas partes de la respuesta, pero también deja una fracción importante sin explicar.

En consecuencia, el área, la altura y la densidad (tal como se midieron) no son suficientes para describir con solidez el comportamiento a compresión del bambú; resulta pertinente investigar factores adicionales (distancia entre nudos, esbeltez H/D_e , humedad exacta).

❖ Flexión.

Para la resistencia a flexión (Tabla XI), los resultados muestran un contraste claro: el espesor de pared presenta un p-valor prácticamente nulo y domina el ajuste con un R^2 parcial de 91.5 %.

La densidad tiene un $p \approx 0.06$ y explica un 5.3 %, mientras que la luz no exhibe influencia ($p \approx 0.75$, $R^2 \approx 0$ %). El R^2 global alcanza el 96.2 %, lo que confirma que la ecuación reproduce con alta fidelidad la variabilidad experimental.

Mecánicamente, este resultado es coherente: el momento de inercia de un culmo hueco depende del cubo del espesor, de modo que ligeras variaciones en t impactan fuertemente la rigidez y la carga de rotura.

D. Implicaciones

- ✓ R^2 y validez del modelo: Un modelo con $R^2 = 74$ % (para compresión) puede considerarse aceptable si los errores (residuos) del modelo se distribuyen de manera uniforme y no presentan patrones visibles. En caso contrario, será necesario agregar nuevas variables explicativas o transformar las existentes para mejorar el ajuste.
- ✓ Selección de variables: Para compresión, la densidad aparece como la candidata más prometedora (aunque aún

no significativa al 95 %), mientras que en flexión el espesor se ratifica como variable crítica para dimensionar elementos tipo viga.

- ✓ *Próximos pasos:* Complementar análisis complementarios con gráficos de residuos, pruebas de normalidad y, de ser posible, duplicar el tamaño muestral para disminuir la incertidumbre de los coeficientes y consolidar la significancia estadística.

De esta forma, los resultados estadísticos sirven como herramienta para alinear la evidencia numérica con la lógica estructural del material, ofreciendo una base más robusta para futuras recomendaciones de diseño con *Guadua angustifolia*.

E. Comparación con la Literatura e Impacto y Alcance de los Resultados

La Tabla XII sintetiza las resistencias promedio (σ) y mínimas ($\sigma_{\min}$) reportadas por seis investigaciones sobre *Guadua angustifolia* en Colombia y Alemania, realizando un contraste con los valores obtenidos en este estudio.

Se observa que las resistencias medias (≈ 29.9 MPa en compresión y 18.5 MPa en flexión) obtenidas en la presente investigación, se encuentran entre 35 % y 40 % por debajo del promedio de la bibliografía consultada (46.8 MPa y 30.0 MPa, respectivamente).

La brecha se amplía en los valores mínimos, donde la flexión cae hasta 6.1 MPa frente a 17.5 MPa de referencia.

TABLA XII
RESUMEN COMPARATIVO DE RESISTENCIA TOMANDO COMO REFERENCIA
OTROS ESTUDIOS REALIZADOS AL BAMBÚ (*GUADUA ANGUSTIFOLIA*)

Fuente	σ_c (MPa)	$\sigma_{\min-c}$ (MPa)	σ_f (MPa)	$\sigma_{\min-f}$ (MPa)
Martin, Mateus & Hidalgo (1981)	49	35	—	—
García Martínez (1991)	38	34.3	30	17.5
Trujillo & López (2000)	46.5	28	—	—
FMPA-ZERI (1999)	41.5	27	—	—
Giraldo & Sabogal (2007)	45.6	42	—	—
Univ. de Colombia (s/f)	59	52.5	—	—
Promedio referencia	46.8	36.5	30	17.5
Estudio actual (Honduras)	29.9	25	18.5	6.1

Posibles Causas de la Diferencia

1. *Condiciones de crecimiento:* Las plantaciones del Parque “Cerro Juana Lainez” de Tegucigalpa, se desarrollan en suelos volcánicos pobremente desarrollados y con pluviometría anual < 1100 mm, mientras que los estudios colombianos típicamente provienen de zonas andinas con > 2000 mm de precipitación, lo que favorece culmos de mayor densidad y espesor.
2. *Edad y tratamiento post-cosecha:* Los culmos analizados tienen una edad de 6 años y no recibieron tratamiento de preservación; varios autores de referencia incluyen procesos de curado (inmersión en agua, secado controlado, soluciones ácido bórico) que incrementan la densidad aparente y reducen defectos por fisuración.

3. *Tamaño muestral y dispersión*: Este trabajo se basa en diez probetas por ensayo; los estudios citados emplean entre 20 y 60 unidades, lo cual disminuye el efecto de valores extremos. La mayor dispersión (especialmente en flexión) sugiere necesidad de ampliar el muestreo.

Relevancia Práctica

Aun con valores menores, la resistencia promedio a compresión (~30 MPa) supera los requisitos para cerramientos de madera de pino caribeño (~22 MPa) y la flexión media (~18 MPa) satisface la demanda de tableros estructurales ligeros.

Ello avala el uso del bambú hondureño en viviendas de baja altura, siempre que se adopten factores de seguridad ajustados a la variabilidad y se apliquen tratamientos de preservación para mitigar la degradación natural.

Recomendaciones para Futuras Investigaciones

- ✓ Ampliar el universo muestral a ≥ 30 culmos por ensayo, incorporando plantaciones de la costa norte y corredor seco para evaluar la influencia climática.
- ✓ Incluir tratamientos térmicos y químicos postcosecha para medir su impacto en resistencia mecánica y durabilidad.
- ✓ Caracterizar nudos y gradiente de densidad longitudinal para refinar los modelos predictivos, especialmente en flexión donde la dispersión es alta.
- ✓ Estudiar el comportamiento a fatiga y a largo plazo (creep) en función de humedad cíclica, dado el clima tropical de Honduras.

En síntesis, si bien es cierto que el desempeño del bambú hondureño es inferior a la referencia de ejemplares cultivados en otras latitudes, los valores promedio de resistencias alcanzadas son suficientes para aplicaciones estructurales livianas y se encuentran dentro del rango de mejora mediante repoblación forestal adecuada y procesos de tratamiento.

VI. CONCLUSIÓN

Esta investigación técnica y experimental confirma que la *Guadua angustifolia* cultivada en Honduras, posee el potencial técnico para ser empleada como material de construcción en sistemas complementarios de cierre y elementos secundarios (pisos, cubiertas ligeras), gracias a tres atributos clave:

1. Disponibilidad renovable y rápida; culmos aprovechables en 4-6 años frente a los 12-18 años de bosques de pino.
2. Propiedades mecánicas; resistencia media a compresión de 30 MPa y flexión de 18 MPa, valores que superan los requerimientos de paneles de pino para vivienda social.
3. Baja huella ambiental; ciclo de vida con emisiones de CO₂ un 60 % menores respecto a madera industrializada.

Sin embargo, las pruebas también revelan variabilidad significativa, particularmente en flexión, hecho atribuible a

diferencias de espesor, densidad y posición de nudos. Para convertir el bambú hondureño en una alternativa estructural plenamente confiable se requieren programas de investigación con mayor alcance que atiendan los siguientes frentes:

- ❖ *Caracterización mecánica integral*; Incorporar ensayos de tracción paralela y perpendicular, cortante y torsión, así como pruebas dinámicas (fatiga y creep), para generar un marco de propiedades completo que permita diseñar con factores de seguridad basados en estadísticas robustas.
- ❖ *Profundización en compresión y flexión*; Ampliar el tamaño muestral (≥ 30 culmos por ensayo), estratificar por clases de espesor y densidad, y evaluar el efecto de la relación esbeltez y la distancia entre nudos sobre la resistencia.
- ❖ *Tratamiento y preservación*; Analizar el impacto de curado en agua, secado controlado y preservantes bórax - ácido bórico en la durabilidad y estabilidad dimensional, especialmente bajo ciclos de humedad y secado propios del clima tropical.
- ❖ *Cobertura geográfica*; Extender muestreo a plantaciones de la costa norte, corredor seco y zonas de altura intermedia; ello permitirá identificar zonas de alto rendimiento y ajustar los modelos predictivos a la variabilidad de clima y suelo del país.
- ❖ *Normalización y diseño*; Desarrollar especificaciones nacionales inspiradas, p. ej. en la NSR-10 (Colombia) y la Norma E-100 (Perú), incorporando expresiones de cálculo con base en ecuaciones de regresión actualizadas.

Como reflexión final, el bambú hondureño ya cumple con los requisitos mínimos para sistemas de cerramiento y ofrece ventajas ambientales y sociales evidentes. No obstante, para su adopción masiva en la construcción es indispensable fortalecer la base científica y normativa, lo que implica ensayos adicionales, estandarización silvícola, tratamiento postcosecha y clasificación estructural.

La continuación de esta línea de investigación no solo mejorará la competitividad del material, sino que contribuirá a la conservación forestal, reducción de costos de vivienda e impulso de una economía rural sostenible en Honduras.

REFERENCIAS

- [1] D. Trujillo, "Bamboo as a sustainable construction material," *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 20-32, 2016.
- [2] L. Martínez, *Potencial agroclimático de la Guadua en Honduras*. Tegucigalpa, Honduras: Universidad Zamorano, 2022.
- [3] A. Rojas, J. Vargas y M. Calvo, "Estado del cultivo de bambú en Costa Rica," *Revista Forestal*, vol. 12, n.º 1, pp. 45-56, 2023.
- [4] International Organization for Standardization, *ISO 22157-1:2019, Bamboo — Determination of Physical and Mechanical Properties — Part 1: Requirements*, Ginebra, 2019.
- [5] J. Correal, I. López y F. Montoya, "Efecto de preservantes a base de boro en la durabilidad y resistencia del bambú *Guadua*," *Revista I+D Tecnológico*, vol. 15, pp. 29-38, 2019.
- [6] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-Resistente NSR-10, Título G: Construcciones en Madera y Bambú*. Bogotá, 2017.

- [7] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Norma Técnica Peruana E-100-2019: Diseño y Construcción con Bambú. Lima, 2019.
- [8] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Manual para la Construcción Sustentable. Ciudad de México, 2019.
- [9] FAO, Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Informe nacional: Honduras, Roma, 2021.
- [10] Instituto de Conservación Forestal, Inventario Forestal Nacional 2022, Tegucigalpa, 2023.
- [11] J. Janssen, Building with Bamboo, 2nd ed. London: Intermediate Technology, 2000.
- [12] P. van der Lugt, "Growth dynamics and harvesting cycles of Guadua spp.," J. Bamboo Sci., vol. 8, pp. 15 24, 2022.
- [13] Banco Mundial, "Honduras – Panorama de la pobreza," 2019.
- [14] A. Rojas et al., "Industria del bambú en Costa Rica: oportunidades y retos," Rev. Forestal, vol. 12, pp. 45 56, 2024.
- [15] Wood Database, "Janka Hardness Ratings for Wood Species," 2023.
- [16] R. Hernández Sampieri, C. Fernández y P. Baptista, Metodología de la investigación, 7.^a ed. Ciudad de México: McGraw Hill, 2018.
- [17] ASTM International, ASTM D695 22: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, West Conshohocken, PA, 2022.
- [18] ASTM International, ASTM D790 23: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, West Conshohocken, PA, 2023.
- [19] Minitab LLC, Minitab® Statistical Software – Release 21 – User Guide, State College, PA, 2023.
- [20] G. Ávila, "Metodologías de muestreo en inventarios de bambú," Rev. Latinoam. Recursos Forestales, vol. 6, pp. 55 64, 2021.
- [21] D. Trujillo, "Design of Guadua bamboo structures for housing applications," Engineering Structures, vol. 99, pp. 296 305, 2015.
- [22] J. Ramírez M. y M. Lozano, "Mechanical performance of Honduran pine in traditional wall systems," Rev. Ing. Civil, vol. 44, pp. 17 25, 2022.
- [23] M. B. Editor, «Análisis de Regresión: ¿Cómo Puedo Interpretar el R-cuadrado y Evaluar la Bondad de Ajuste?», Minitab, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://blog.minitab.com/es/analisis-de-regresion-como-puedo-interpretar-el-r-cuadrado-y-evaluar-la-bondad-de-ajuste>.