

Diseño de panelería prefabricada en bambú para paredes en Costa Rica: Caracterización mecánica preliminar

Design of Prefabricated Bamboo Wall Panels in Costa Rica: Preliminary Mechanical Characterization

Kendy Sevilla Flores¹
Viviana Paniagua Hernández²

¹ Universidad de Costa Rica, Escuela de Arquitectura, San José, Costa Rica. kendy.sevilla@ucr.ac.cr. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4711-5635>¹

² Universidad de Costa Rica, Escuela de Arquitectura, San José, Costa Rica. viviana.paniaguahernandez@ucr.ac.cr. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3959-5318>²

Artículo. Recibido: 2023/07/13 | **Aprobado:** 2023/10/28

Resumen: El objetivo de esta investigación fue diseñar un sistema de panelería prefabricada en bambú para paredes, partiendo de los beneficios medioambientales y socioeconómicos que se obtienen con el uso de este material. Para la validación del diseño se analizaron diversos aspectos constructivos, estructurales y socioeconómicos asociados. La metodología elegida consistió en generar matrices comparativas con indicadores, definiendo criterios para evaluar las posibilidades y parámetros de diseño y funcionamiento, valorando las implicaciones de la modulación, las articulaciones, los cerramientos y buscando optimizar la competitividad de la propuesta. Como resultados obtenidos, el sistema de paneles desarrollado es liviano, desarmable, flexible, permite diversas posibilidades de uso, es abierto a la combinación de cerramientos fijos y móviles. El agrupamiento de paneles a partir de sencillas adaptaciones en sus extremos posibilita distintas configuraciones para generar infraestructura, espacios educativos y de vivienda. Con la caracterización mecánica preliminar, realizada a partir de prototipos a escala construidos con la especie *Plyllostachys aurea*, se obtuvo resultados positivos que permiten confirmar la competitividad estructural y buen rendimiento del sistema. Se concluye que este trabajo no solo documenta los beneficios asociados a la toma de decisiones en diseño y a las especificaciones para la construcción, sino que se muestra la necesidad de continuar la investigación y desarrollo (I+D) ¹ del sistema prefabricado de paneles en bambú.

Palabras clave: bambú; sistema prefabricado de panelería de paredes; sostenibilidad.

Abstract: This research aimed to design a prefabricated bamboo wall system, considering the environmental and socioeconomic benefits obtained by using bamboo. The design decisions were optimized, considering constructive solutions and structural parameters. The chosen methodology consisted of proposing comparative matrices and indicators and defining criteria to evaluate every design decision. Considering the modulation, joints, and enclosures implications and controlling the competitiveness of the proposal. As obtained results, the developed wall system is light, disassembly, and flexible since it allows the combination of fixed and mobile enclosures. The grouping of panels based on simple joint adjustments allows different configurations suitable for educational and residential spaces. From a preliminary mechanical characterization, carried out with real-scale prototypes built with *Plyllostachys aurea*, positive results were obtained. The structural competitiveness and good mechanical performance of the system were confirmed. In conclusion, this research documents the benefits of decision-making in the system design and construction specifications process. The need to continue this bamboo panel system research and development (R&D) was shown.

Keywords: bamboo; prefabricated wall paneling system; sustainability.

¹ Licenciada en arquitectura de la Universidad de Costa Rica y Técnico en administración de empresas del Tecnológico de Costa Rica. Actualmente ocupo el cargo de coordinadora de diseño en bambú en Bambuksa Desarrollo Ecológico en proyectos residenciales y turísticos.

² Candidata a Doctorado Académico en Ingeniería, Universidad de Costa Rica (UCR). Magíster en Construcción en Madera Universidad del Bio Bio, Chile, Licenciada en Arquitectura UCR. Docente Investigadora Escuela de Arquitectura UCR.

Introducción

Actualmente la industria de la construcción genera aproximadamente un 40% de la contaminación mundial por residuos sólidos y los materiales de construcción generan altas emisiones de carbono CO₂ (Wadel, Avellaneda y Cuchí, 2010). Ante esta realidad, en Costa Rica, se busca tomar acciones y llegar a ser carbono neutral para el año 2050.

Una acción puntual busca incorporar al menos un 10% de materiales naturales como bambú, madera u otros con bajo impacto ambiental. Aunado al desarrollo de edificaciones bajo estándares de alta eficiencia en sostenibilidad y procesos de bajas emisiones Plan de descarbonización, Dirección de Cambio climático (Ministerio de Ambiente y Energía Gobierno de Costa Rica, 2019).

Debido a lo anterior, existe la necesidad de investigación en el uso de materiales locales, específicamente el bambú ya que las plantaciones pueden funcionar como sumideros de CO₂; la capacidad de fijación de carbono depende de la edad de la plantación y se ha reportado que pueden fijar hasta 149,9 TCO₂/ha en sus primeros 7 años de crecimiento (Camargo García, Rodríguez y Arango Arango, 2010).

En Costa Rica las características climáticas y geológicas son óptimas para su desarrollo; en el país se cuenta con plantaciones de bambú documentadas desde 1970, principalmente la zona Atlántica donde existen 131 hectáreas en el cantón de Pococí bajo la gestión del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Principalmente las especies *Guadua angustifolia kunth* y *Bambusa vulgaris*, siendo la primera apta para la construcción y la segunda elegida para otros usos tradicionales, como el anclaje de plantaciones de banano, esto según los reportes de la Fundación Nacional de Bambú (FUNDEBAMBÚ) citados por Córdoba Alvarado (2021).

Según esta misma organización pese a que el bambú es uno de los materiales que históricamente se han empleado en la construcción, en Costa Rica no se cuenta con la suficiente investigación e información técnica para aprovechar su potencial e incrementar su utilización en la construcción y arquitectura nacional. De forma paralela, se debe considerar que el bambú permite el acceso a múltiples beneficios sociales y económicos (Córdoba Alvarado, 2021). Es uno de los materiales estructurales con mejor resistencia con relación a su bajo peso, posee una buena capacidad estructural (sismo-resistencia) (Silva, de Paiva,

Tamashiro, de Almeida, de Maria, de Oliveira, Kinoshita, Silva, de Paiva, Tamashiro, et al., 2023).

Las propiedades mecánicas del bambú son similares a las de algunas maderas coníferas, por lo que es ideal para sistemas constructivos que a la vez consideran que la prefabricación aporta la facilidad constructiva y tiene implicaciones directas en los costos, transporte y capacidad de inserción en el mercado. Además, el uso de este material permite obtener beneficios sociales asociados al cultivo del material, al empleo de mano de obra local y al impulso de organizaciones comunitarias.

Por otro lado, dentro de los principales antecedentes de panelería prefabricada en bambú, destacan propuestas realizadas en Ecuador y Colombia, tales como "The GAK-GPP" (*Guadua angustifolia Kunth* glued and pressed panels) (Ramírez, Torres, Peña, Duque-Rivera, et al., 2014), "Uso de la caña guadúa en la vivienda modular" (Mendoza Castro y Rosales Salcedo, 2014), "Obtención de las propiedades mecánicas y estructurales de la caña *Guadua Angustifolia Kunth*" (Córdova Alcívar, 2014), "Metodología de diseño de estructuras en *Guadua angustifolia* como material estructural por el método de esfuerzos admisibles" (Luna, Takeuchi, Granados, Lamus, Lozano, et al., 2011). Estos estudios corroboran la competitividad medioambiental, económica y estructural del bambú en diversos sistemas de paneles para paredes.

Como antecedentes locales, en Costa Rica en la década de 1990, se realizó el proyecto nacional del bambú (PNB), con el que se construyeron un sin número de viviendas sociales con paneles prefabricados (González, 2017).

Posteriormente, se analizaron los paneles utilizados en dicho proyecto y se realizó el diseño estructural de paneles de pared de plybamboo para vivienda Comportamiento Estructural de Paneles de Bambú (González-Beltrán, 2003), esta investigación es un punto de partida de los estudios con respecto al uso de bambú para vivienda. Su autor reporta que el material tiene suficiente resistencia a los esfuerzos y una óptima deformación unitaria producto de la aplicación longitudinal de carga; estabilidad geométrica, rigidez; y que el diseño investigado podría ser implementado en regiones propensas a terremotos y vientos de magnitud considerable.

Pese a lo anterior, actualmente para realizar el diseño estructural de elementos en bambú a nivel nacional no se dispone de la normativa técnica. Recientemente se está gestionando la norma *PN INTE C521:2022 CP Requisitos preservación de bambú*, por parte del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), como uno de los primeros pasos para establecer el marco normativo local.

Por lo anterior, se consideraron como referentes la (*NTC 6100 Norma técnica Colombiana para productos de Guadua Criterios ambientales para productos de primer y segundo grado de transformación de Guadua Angustifolia kunth (GAK), 2014; NTC 5407 Uniones estructurales con Guadua, 2018*)), la *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) de Estructuras de Guadua Angustifolia kunth (GAK)* (Ministerio de desarrollo urbano y vivienda de Ecuador, 2015), y la *Norma Técnica peruana E.100 Bambú*, (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009), así como las normas de la Organización Internacional de Normalización, International Organization for Standardization (ISO) por sus siglas en inglés, ISO 22156, 22157-1 y 22157-2 sobre *Propiedades físicas y mecánicas del bambú*, (ISO, 2004b, 2004c, 2004a).

Por otro lado, dado que para diseñar un sistema de panelería prefabricada en bambú se debe considerar tanto los aspectos constructivos y estructurales, así como los aspectos operativos, socioeconómicos y ambientales, esta investigación busca responder a las interrogantes y delimitación de dichas necesidades.

Por lo anterior el objetivo de esta investigación es definir y aplicarlas a desarrollar un sistema constructivo de panelería prefabricada en bambú para paredes que permita espacios flexibles, confort y concientización sobre sostenibilidad.

La estructura de este artículo consta de la definición de las consideraciones técnicas de uniones, cerramiento y modulación del panel, la definición de pautas de diseño y materiales a utilizar, articulaciones, cerramientos, la construcción de prototipos a escala y ejecución de pruebas de resistencia preliminares.

Metodología

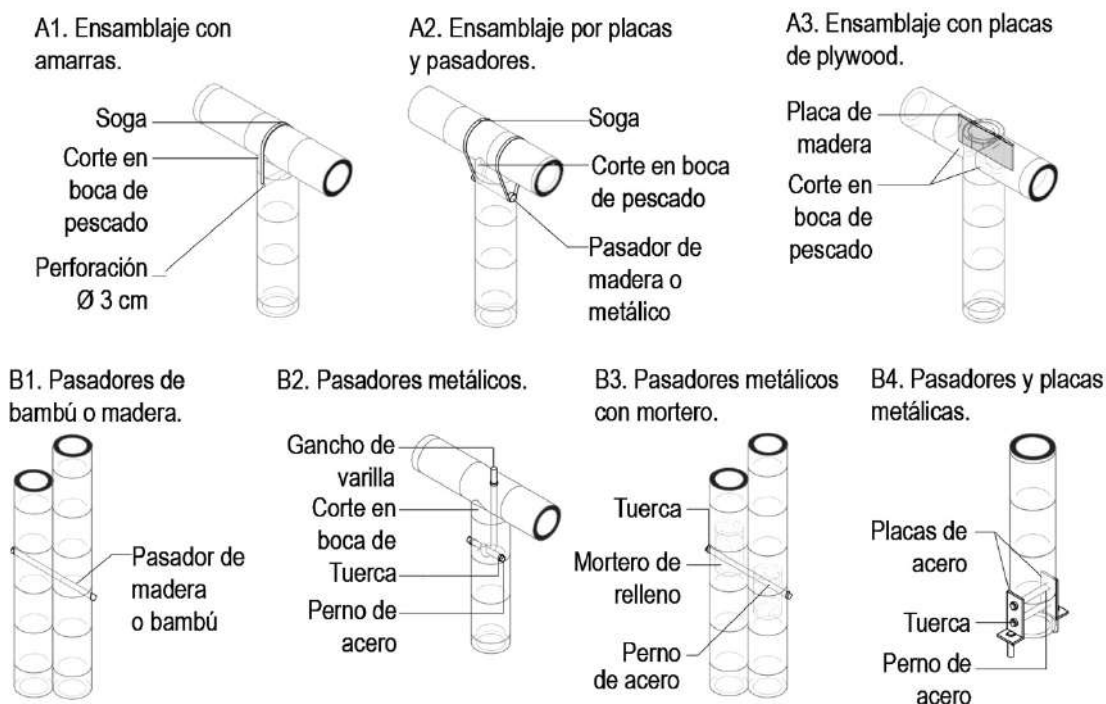
Para el desarrollo del diseño del sistema se definieron cinco etapas. En primer lugar, se consideraron los aspectos técnicos del diseño de tipos de uniones, cerramientos y modulación del panel. En segundo lugar, se definieron las pautas específicas para el diseño. En tercer lugar, se definieron los materiales y componentes a utilizar. En cuarto lugar, se construyeron prototipos a escala real para la realización de pruebas de resistencia de compresión y flexión, como una aproximación para determinar la capacidad estructural del sistema. Finalmente, se realizaron mediciones en distintos aspectos de operatividad en la prefabricación del sistema.

Consideraciones técnicas de uniones cerramiento y modulación del panel

Para desarrollar la selección de uniones y cerramientos se establecieron criterios e indicadores considerando la facilidad de instalación, conocimiento en construcción de nivel básico, medio o avanzado, así como los costos dependiendo de la cantidad de elementos por unión (placas, pernos, pasadores, tuercas, amarras) necesarios para el correcto funcionamiento de la unión o el cerramiento.

En cuanto a la versatilidad, se consideró los tipos de configuración en relación con las distintas disposiciones vertical, perpendicular o diagonal, entre dos o más culmos. Se analizaron dos tipos de uniones a partir de las categorías establecidas por Guzmán-Yara, J.; y Hernández-Bustos, (2021), Hidalgo López (1981) y Morán-Ubidia (2015), las cuales, como se muestra en la Figura 1 corresponden a entalladura "t" y ensamblaje (A), uniones con pasadores (B). Se contabilizó la puntuación en los distintos criterios mencionados para seleccionar los sistemas a emplear en el diseño.

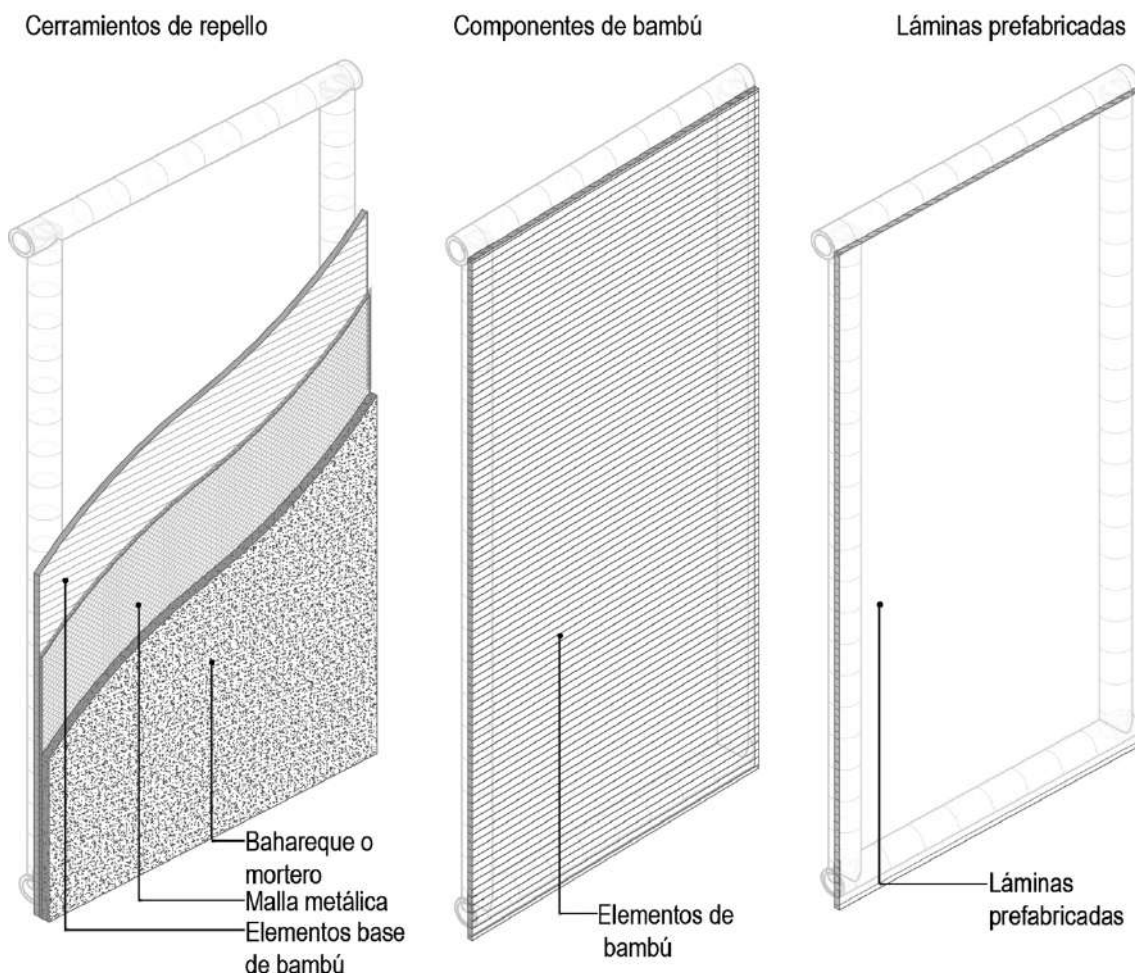
Figura 1. Consideraciones técnicas - uniones del sistema de panelería



Nota: Elaboración propia.

Para la selección de cerramientos se establecieron tres categorías, las cuales corresponden a cerramientos con repello, componentes derivados del bambú y láminas prefabricadas correspondientes a las disponibles comercialmente en el mercado nacional (Figura 2).

Figura 2. Selección de cerramientos del sistema de panelería en bambú



Nota: Elaboración propia.

En cuanto a la modulación de los paneles del sistema, se tomó en cuenta los diferentes procesos del material desde su corte hasta la construcción, con el fin de generar un producto de fácil procesamiento, por su repercusión en su costo y viabilidad. También se consideró la compatibilidad con otros materiales, para generar un sistema versátil y adaptable; se tomaron en cuenta las medidas de otros sistemas prefabricados y de las láminas de cerramientos disponibles en el mercado local.

Pautas de diseño

El diseño se centró en la búsqueda de una propuesta “adaptable”, con distintas posibilidades de cerramientos, que permitieran armar y desarmar los paneles, considerando los aspectos climáticos propios de la arquitectura tropical y el aprovechamiento los recursos naturales locales. Con el objetivo de disminuir el impacto ambiental y el consumo energético de las edificaciones. Se consideró la “protección del bambú por diseño”, ya que el bambú por su origen natural, aunque se someta a procesos químicos para su preservación, necesita ser resguardado de los agentes climáticos como la lluvia, el sol y la humedad, que aceleran su deterioro. Por tanto, el diseño arquitectónico deberá estar en función de proveer dicha protección para poder garantizar su durabilidad (Jayanetti y Follett, 2008). Esto plantea la necesidad de aleros protectores, techos con pendientes pronunciadas, permitiendo el diseño de aperturas superiores para la ventilación y flujo de aire, y el aislamiento del suelo permite una ventilación en la parte inferior y evita afectaciones por humedad a la edificación.

Selección de materiales

A partir de la información de las etapas previas se determina:

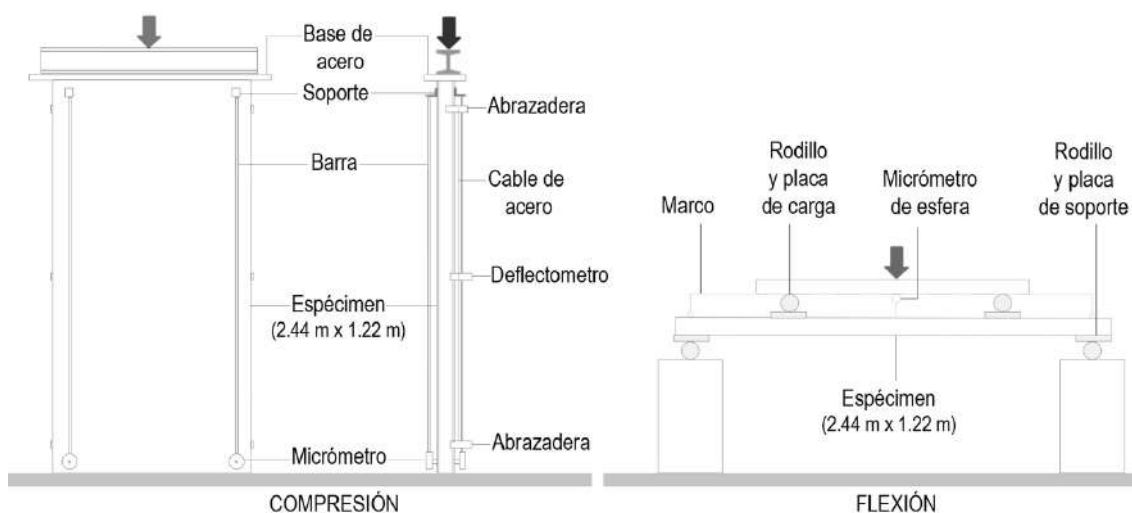
- Selección de bambú: para la facilidad de elaboración, instalación y transporte se elige trabajar con un espesor de bambú de $\varnothing 2''$, se determina que la especie *Phyllostachys aurea* presenta este espesor en la mayor parte de su longitud, y además establece la necesidad de contemplar columnas y vigas compuestas por dos culmos de bambú.
- Materiales complementarios: en función de no comprometer las columnas de bambú a perforaciones continuas, se establece el uso de reglas de madera de pino de $2'' \times 1''$ internas fijadas a lo largo de la columna para la colocación de los cerramientos, así como la colocación de refuerzos en la composición de las columnas de madera de pino de $2'' \times 2''$.
- Materiales de conexiones: se consideraron barras roscadas de $\varnothing 3/8''$, para realizar las conexiones de viga columna. En el caso de la unión entre el bambú y la madera se realiza a través de tornillos para madera.

- Materiales de cerramientos: a partir de la de selección de cerramientos (Figura 2), se establece el uso de cerramientos permeables a partir de cañas de bambú de $\varnothing 1''$, también se consideró el uso de caña brava del mismo espesor. En cuanto a los cerramientos de lámina, se determina el uso de esterilla de bambú, lámina de madera contrachapada y láminas de cartón-yeso, al considerarse los más económicos, accesibles y de fácil instalación.

Prototipos a escala y pruebas de resistencia

Para la realización de las pruebas de resistencia a compresión y flexión, los ensayos fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LANAMME-UCR), siguiendo el procedimiento descrito en la norma para paneles prefabricados, de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, American Society for Testing Materials (ASTM), por sus siglas en inglés (ASTM E72, 2015), cuyo montaje se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Esquema de montaje ensayos de compresión y flexión, adaptado de la norma *Standard Test Methods of Conducting Strength Test of Panels for Buildings Construction* ((ASTM)., 2015)



Nota: Elaboración propia.

El esquema experimental se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de la fase experimental del sistema, por tipo de ensayos

Compresión	Soporte	COMPRESÓMETRO: Se coloca en el extremo superior apoyado en una viga de metal. Graduación del dispositivo: 0,025 mm o menos. DEFLECTÓMETRO: Se coloca un alambre fino a una abrazadera al extremo superior del espécimen. Graduación del dispositivo: 2,5 mm
	Procedimiento	CARGA: Aplicar cargas de compresión, sobre la placa de acero en la parte superior del espécimen. La velocidad de la carga suficiente es de 0,8 mm/min DEFLEXIÓN LATERAL: Dos deflectómetros a los bordes del espécimen DEFORMACIÓN: Cuatro deflectómetros en las caras laterales del espécimen (Dos en cada una).
Flexión	Soporte	MONTAJE: Dos rodillos con una placa de acero entre cada rodillo de soporte y la muestra MEDIDOR DE FLEXIÓN Se coloca un marco en la cara superior de la muestra, el cual descansará sobre tres bolas de acero endurecido, cada una soportada por un bloque de acero en la cara de la muestra. Se deben colocar dos dispositivos de medición de deflexión. Los dispositivos se graduarán a 0,025 mm o menos.
	Procedimiento	CARGA: Aplicar una carga de "dos puntos" para las pruebas de carga transversal. Aplicar dos cargas iguales, cada una a una distancia de un cuarto del tramo desde los soportes, hacia la mitad del tramo. La carga utilizada será uniformemente distribuida.

Nota: Elaboración propia.

Mediciones de operatividad

Con el fin de tomar en cuenta algunos aspectos sobre el desarrollo de la construcción del sistema y su posible implementación, además de conocer su capacidad estructural, se consideró importante analizar aspectos operativos sobre los siguientes aspectos: peso de los paneles, tiempo de construcción (a partir de las mediciones de tiempo durante la construcción de los prototipos a escala real), transporte de los prototipos del taller de construcción al laboratorio LANAMME-UCR, almacenaje: considerado según la experiencia con los prototipos a escala real y proyecciones según información teórica y de experiencia de otros profesionales, y aprovechamiento de desperdicios.

Resultados y discusión

Para los resultados de los sistemas de uniones a utilizar, en función de los criterios e indicadores, se estableció que las uniones con pasadores descritos en la Tabla 2 y Tabla 3 son las uniones que cumplen de mejor manera con los criterios de selección.

Cabe resaltar, que, en el caso de impacto ambiental, al ser materiales como acero o mortero, no cuentan con una huella de carbono neutro.

Sin embargo, se considera las ventajas en los demás indicadores principalmente versatilidad y facilidad de instalación. El diseño del sistema toma en cuenta la posibilidad de combinar sistemas de pasadores de madera o bambú, y para las uniones que requieren mayor resistencia, el uso de elementos metálicos.

Tabla 2. Tabla de indicadores para análisis comparativo de sistemas de uniones

Resumen de los criterios de selección definidos							
Criterio	Entalladura y ensamblaje			Pasadores			
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4
Facilidad de instalación	2	1	3	5	5	4	4
Bajo Costo	3	2	4	5	4	3	1
Obtención de materiales	5	5	5	5	5	5	5
Impacto ambiental	5	4	5	5	3	3	3
Versatilidad	1	1	3	2	5	5	5
Puntaje total	16	13	13	22	22	20	18

Nota: Elaboración propia.

Tabla 3. Tabla complementaria de indicadores para análisis comparativo de sistemas de uniones

Desglose criterios para puntuación escala del 1 al 5	
Facilidad de instalación	
1	Más de 7 pasos de construcción y Conocimiento avanzado
2	Entre 4 y 6 pasos de construcción y conocimiento avanzado
3	Entre 7 y 8 pasos de construcción y conocimiento medio
4	Entre 5 y 6 pasos de construcción y conocimiento medio
5	Máximo 4 pasos de construcción y conocimiento básico
Bajo costo	
1	6 o más elementos en la unión y puntuación obtenida en el primer criterio.
2	5 elementos por unión y puntuación obtenida en el primer criterio
3	4 elementos por unión y puntuación obtenida en el primer criterio
4	3 elementos por unión y puntuación obtenida en el primer criterio
5	2 elementos por unión y puntuación obtenida en el primer criterio.
Obtención de materiales	
1	No hay empresas que provean el material en el país y es un material poco común.
2	Existe al menos una empresa en el país y es un material poco común.
3	Existe al menos una empresa en un radio de 150 km y es un material común.
4	Existe al menos dos empresas en un radio de 75 km y es un material común.
5	Existe al menos tres empresas en un radio de 10 km y es un material común.
Impacto ambiental	
1	Huella de carbono de más de 10 T CO ₂ /T
2	Huella de carbono entre 5-10 T CO ₂ /T
3	Huella de carbono entre 1-5 T CO ₂ /T.
4	Huella de carbono entre 0-1T CO ₂ /T
5	Huella negativa.
Versatilidad	
1	1 tipo de configuración entre culmos
2	2 tipo de configuración entre culmos.
3	3 tipos de configuración entre culmos
4	4 tipo de configuración entre culmos
5	5 tipo de configuración entre culmos

Nota: Elaboración propia.

En el caso de los cerramientos a implementar, dos tipos de cerramientos no cumplían con al menos tres de los criterios valorados, el sistema de repello con mortero y el sistema muro seco. Mientras que tres tipos de cerramientos cumplen con los cinco criterios de selección, estos son los cerramientos de latilla, esterilla y lámina de madera contrachapada, materiales de origen natural y de bajo procesamiento industrial según el cuadro de análisis de cerramientos (Tabla 4). Dado lo anterior, se definen los tres tipos de cerramientos óptimos según los criterios de selección.

Tabla 4. Tabla comparativa criterios de cerramientos

Comparación entre cerramientos para el sistema de panelería									
Criterios	Indicadores	Repello		Componentes de bambú			Láminas prefabricadas		
		Bahareque	Mortero	Tejidos	Latilla	Esterilla	Madera	Yeso	Muro seco
Facilidad de instalación	Entre 4 y 6 pasos. Conocimiento básico.	x	x	x	✓	✓	✓	✓	x
Bajo Costo	Máximo 4 elementos.	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	x
Obtención de materiales	Al menos 3 empresas en un radio de 3 Km	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Impacto ambiental	Huella de carbono entre 0-1 TCO ₂ /T.	✓	x	✓	✓	✓	✓	x	x
Versatilidad	Al menos 2 tipos de configuración	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nota: Elaboración propia.

Según la información del cuadro de análisis (Tabla 5) la medida longitudinal óptima para los culmos es de máximo 6m, por su naturaleza y aprovechamiento en construcción, así como su transporte y manejo en campo. Por otra parte, según las referencias de otros paneles prefabricados en bambú, así como los tradicionales del mercado cuya modulación es de 1,22m x 2,44m, se decide trabajar con dicha modulación, común y práctica dentro de la construcción, permitiendo también la compatibilidad con otros materiales de cerramientos.

Tabla 5. Tabla descripción de criterios de análisis de modulación

Descripción de criterios de análisis de modulación					
Criterios	Naturaleza del material	Manejo en campo	Compatibilidad	Transporte	Referencias
Dimensión	La capacidad estructural del bambú se encuentra en sus nudos (entre 20-25 cm), lo cual permite libertad y variedad de longitud. Por otra parte, se recomienda utilizar la sobre basa del	Los culmos de bambú guadua alcanzan una altura de hasta 25-28 m los cuales pueden ser cortados en su totalidad, y seccionados en basa sobre basa, y copa, por lo cual	En el mercado existe gran variedad de láminas prefabricadas de madera, yeso, reciclados, entre otros, los cuales regularmente tienen una medida de	Aprovechando al máximo la eficiencia de los camiones de uso común, el material debe contar con un largo de 6 m, evitando así exceder el largo	Según los datos expuestos en los estudios de caso, se cuenta con paneles prefabricados de bambú en medidas de 1,22 x 2,44 m y 0,90 x 2,44 m, estableciendo un precedente de posibilidades de

	culmo para estructuras, los cuales se estiman con una longitud de 8 m en promedio.	se manejan las medidas entre 6 - 8 m para su arrastre y traslado.	1,22 x 2,44 m.	máximo de estos vehículos.	medidas para prefabricados de bambú.	eficientes paneles de
Modulación	Longitud variable 1 - 8 m	Longitud variable 6 - 8 m	Módulo 1,22 x 2,44 m	Longitud máxima 6 m	Módulo de 1,22 x 2,44 m	

Nota: Elaboración propia.

A partir de lo anterior, se establecen las pautas de diseño, contemplando el análisis técnico constructivo del bambú, la búsqueda de adaptabilidad y flexibilidad, así como el control climático tanto para la protección y durabilidad del bambú, como para el confort en el espacio. En cuanto a aspectos técnicos constructivos se establece que el proceso de prefabricación del sistema deberá ser de fácil construcción e instalación en el sitio. Los sistemas de conexión deben tener un nivel de elaboración técnica que no requiera más que una inducción sencilla por parte de un técnico. Los tipos de cerramientos a instalar deberán ser principalmente elementos prefabricados o de fácil instalación dentro del marco estructural. Los sistemas de conexión deberán ser versátiles tanto en configuración como en compatibilidad con distintos materiales.

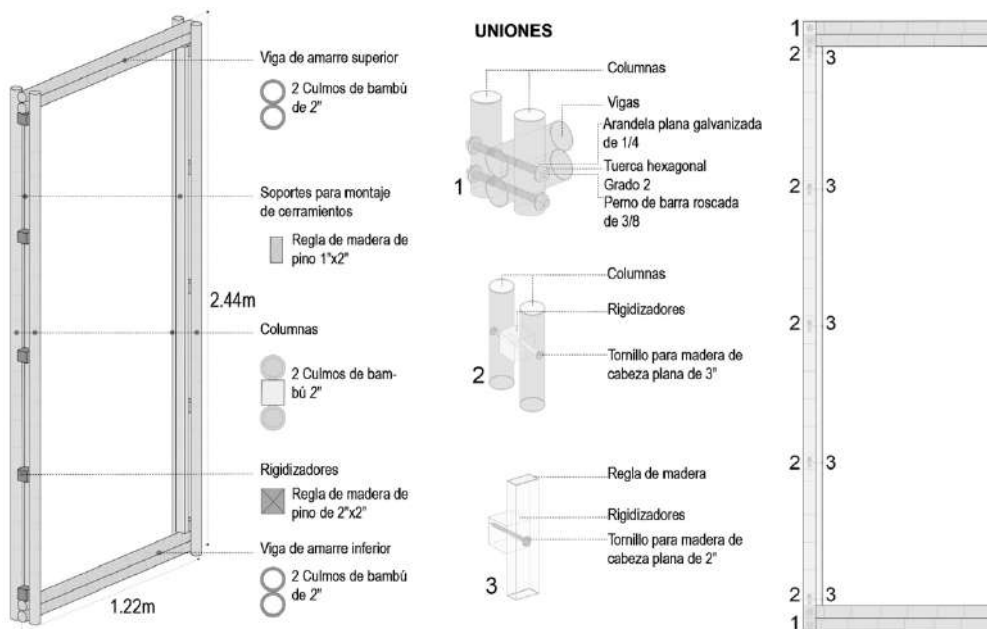
En función de la adaptabilidad y flexibilidad, los cerramientos del sistema sustituyen la idea de espacio contenido fuertemente delimitado por una relación interior exterior: Implementar el uso de bambú y complementos de madera permiten incidir en la concientización ambiental y desarrollo sostenible; los sistemas de conexiones deben responder tanto a la posibilidad de construir recintos rectangulares o con diferentes configuraciones; generar espacios que propicien e intensifiquen la participación ciudadana y la apropiación del mismo. Para lograr control y confort climático se deben considerar tipos de cerramientos perforados y texturizados, propiciar mayor altura en los espacios a partir de establecer las medidas de los paneles, propiciar la posibilidad de instalación de aislamiento térmico y acústico.

En función de las pautas de diseño y los sistemas de uniones, cerramientos y modulación determinados, se establece un diseño de panel compuesto por un marco de bambú con soportes de madera para colocar distintos tipos de cerramientos.

Tal y como se muestra en la Figura 4, el marco de bambú se compone de culmos de $\varnothing 2''$ con la finalidad de contar con piezas livianas, fáciles de trabajar y de transportar, por lo tanto, se determina la necesidad de trabajar con secciones compuestas de 2 culmos, tanto de viga como de columna. Con la finalidad de poder utilizar cortes rectos y pernos pasados, como sistema de unión de mayor facilidad de ejecución, se decide colocar las vigas en medio de cada culmo de columna, para lo cual se requiere rigidizar la sección de columna, por lo cual se

distribuyen piezas de madera de 2" x 2" en 5 puntos a lo largo de la columna, lo cual en el caso de la viga superior ayuda a evitar deslizamientos del perno de unión a través de las fibras de los culmos de las columnas.

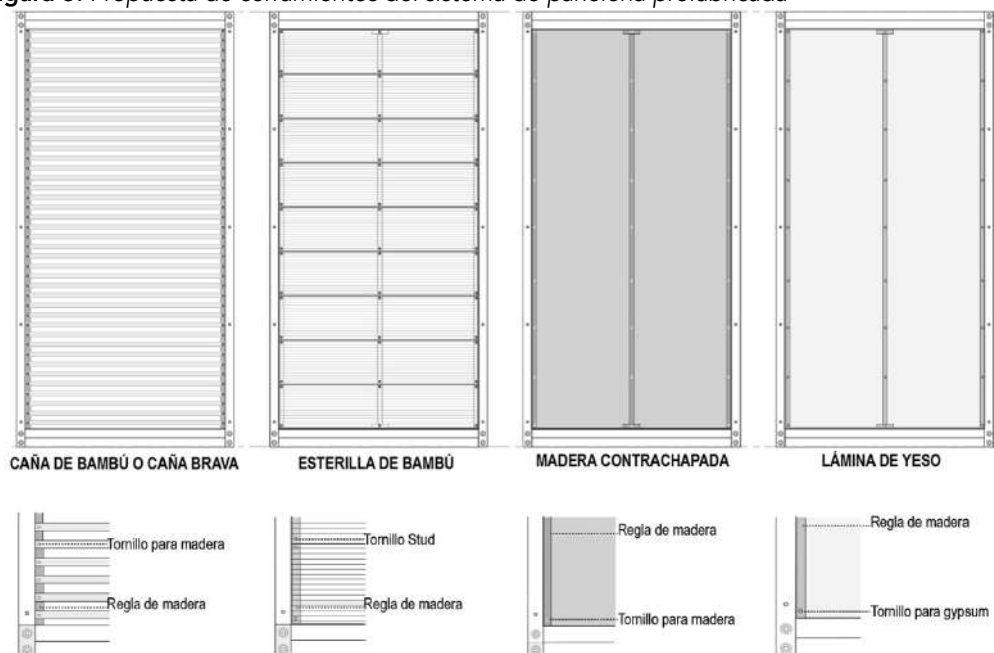
Figura 4. Propuesta del marco del panel y descripción de sus articulaciones



Nota: Elaboración propia.

En cuanto a los diferentes tipos de cerramientos elegidos, estos se colocan sobre la pieza de madera interna del marco, para lo cual, en dependencia del tipo del material, se atornillan a la regla con el tipo de tornillo correspondiente (Figura 5).

Figura 5. Propuesta de cerramientos del sistema de panelería prefabricada



Nota: Elaboración propia.

El cerramiento permeable con culmos de bambú de $\varnothing 1''$ se consideró como el óptimo según lo determinado en el cuadro de evaluación de cerramientos. No obstante, se considera también el uso de caña brava por contar con un costo más bajo que el bambú.

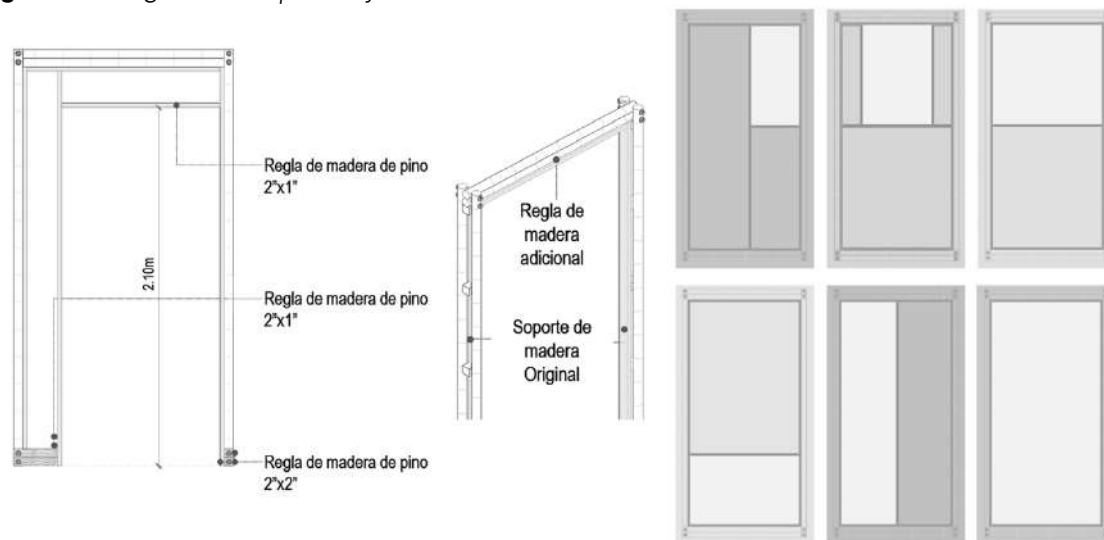
Con este tipo de cerramientos se pueden generar distintas configuraciones de diseño en las paredes.

Con respecto al cerramiento de esterilla, al ser un producto derivado del bambú, se considera la opción de menor impacto ambiental, no obstante, no del menor costo ni de mayor facilidad de instalación.

Dentro de las láminas de cerramiento disponibles en el mercado se considera la madera contrachapada como una opción de bajo impacto ambiental y fácil instalación en comparación con otras láminas prefabricadas disponibles en el mercado, por otra parte, la lámina de yeso-cartón se considera por su disponibilidad en el mercado y bajo costo, no obstante respecto a los anteriores es de mayor impacto ambiental y por tanto el menos recomendable.

En cuanto de la configuración de puertas y ventanas dentro del sistema (Figura 6) a partir de las reglas de madera integradas al marco, se colocan las reglas necesarias para conformar el diseño deseado. En cuanto a la puerta debe sustituirse la viga inferior compuesta por culmos de bambú, por reglas de madera de $2'' \times 2''$, según el ancho de la puerta a colocar.

Figura 6. Configuración de puertas y ventanas



Nota: Elaboración propia.

Se plantearon también alternativas de uso para el diseño del sistema, considerando las posibilidades de generar distintas experiencias en los espacios donde se emplee el sistema (Figura 7). Se consideró un cerramiento giratorio

con sistemas de pivote en el cual se apoya el cerramiento al pivote, y de igual manera a las reglas de madera internas sin que estas estén sujetas al marco.

Figura 7. Cerramientos móviles y paneles tipo tabiques no estructurales



Nota: Elaboración propia.

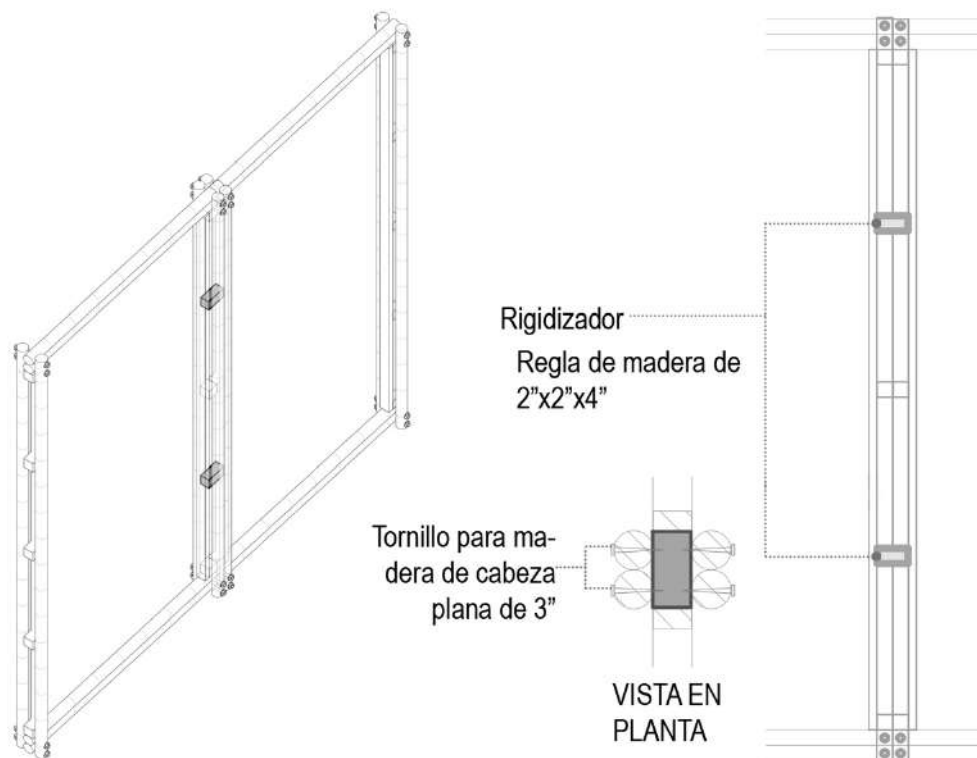
Otra opción es la implementación de ventanas abatibles por medio de bisagras colocadas en las reglas de madera. Se debe considerar que, para el empleo de estas alternativas de uso, dependerá de un diseño estructural, la cantidad de paneles a colocar con estas funciones, así como cuantos paneles continuos se podrían colocar, debido a que la rigidez que aporta la regla de madera y los cerramientos, se pierde al momento de volverse móvil.

Para el caso de requerir los paneles únicamente como tabiques, se puede simplificar su estructura, al no estar sometido a cargas estructurales y con la finalidad de disminuir su costo y elaboración, con lo cual en las vigas tanto inferior como superior se planteó utilizar únicamente un culmo para cada una, y en el caso de los rigidizadores de columna, se colocan al lado de las vigas y al medio de la longitud de la columna.

Debido a la naturaleza del uso del bambú, como elementos articulados para conformar estructuras, se considera el bambú, como un material de fácil uso para estructuras con la necesidad de armar y desarmar, y dado el diseño del sistema de panelería planteado, se considera adecuado en el uso de estructuras temporales, las cuales según sea el acaso podrían prescindir de la rigurosidad de los procesos de preservación del bambú reduciendo considerablemente el costo económico para estos casos.

Para conformar el sistema de panelería, se tienen uniones laterales y esquineras, así como uniones a entrepisos y vigas corona. En el caso de las uniones entre paneles se colocan dos rigidizadores de madera intermedios de 2" x 2" x 4" de forma que desde cada culmo de cada panel se atornille a estas piezas (Figura 8).

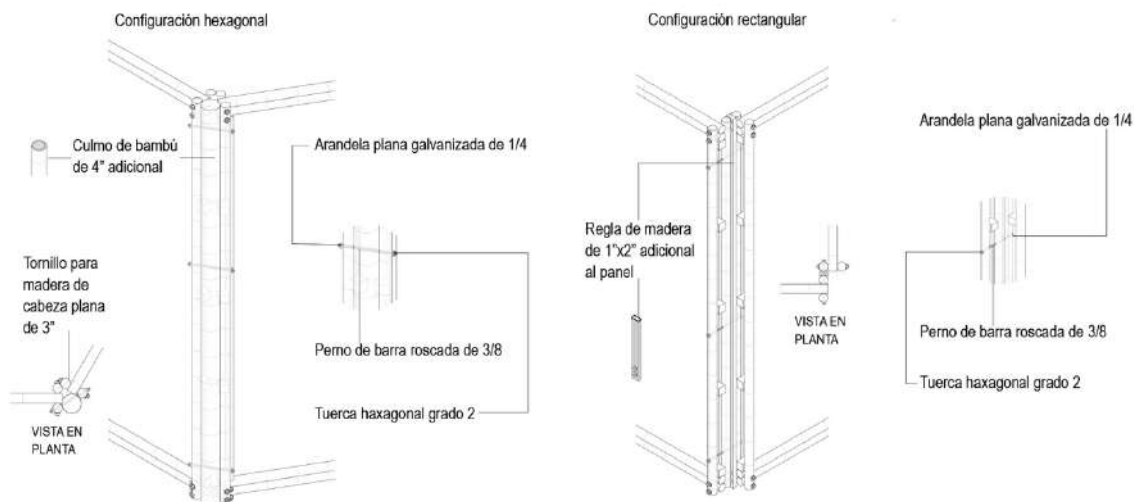
Figura 8. Planteamiento de uniones entre paneles



Nota: Elaboración propia.

En el caso de las uniones esquineras, se toman en cuenta dos geometrías, hexagonal y rectangular (Figura 9), en el primer caso la unión consiste en adicionar un culmo de bambú de 4" en la parte externa del punto de unión permitiendo el acople entre los culmos externos de la columna de cada panel, uniéndose en tres puntos distribuidos a lo largo de la columna. En el caso de los culmos internos de la columna, se atornillan entre sí en cinco puntos distribuidos a lo largo de la columna.

Figura 9. Configuración de espacios con el sistema

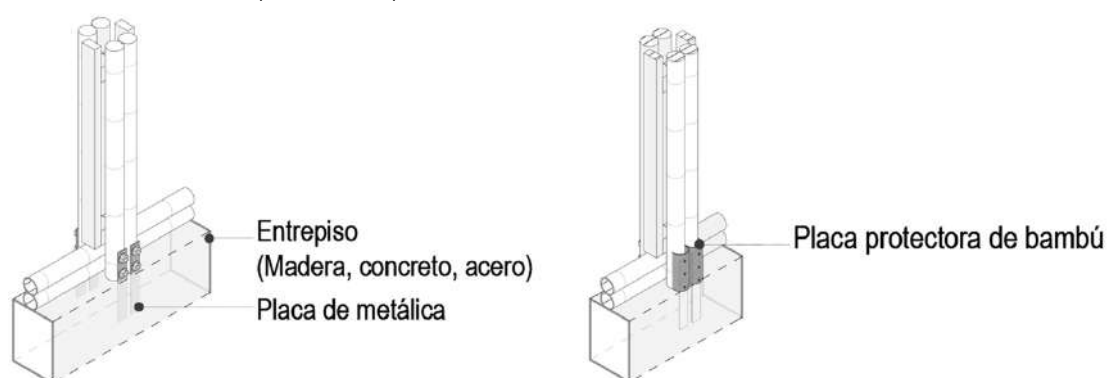


Nota: Elaboración propia.

Para la geometría rectangular, deberá colocarse una regla de madera adicional entre uno de los culmos de las columnas de cada panel con el fin de poder acoplar los pernos de las uniones viga-columna y así poder unir ambos culmos en tres puntos distribuidos a lo largo de la columna.

Al momento de unir los paneles al sistema de entrepiso (Figura 10), se sugiere el uso de una placa metálica, la cual puede funcionar embebida en concreto o bien pernada a reglas de madera o soldada a elementos de acero, bajo este mismo sistema la propuesta puede incorporarse al entrepiso de un segundo nivel siendo el primero en otro tipo de sistema constructivo.

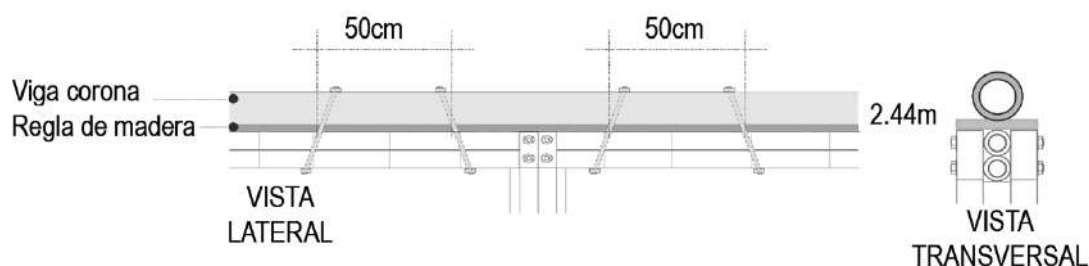
Figura 10. Detalle de apoyo de los paneles



Nota: Elaboración propia.

Por otra parte, tal y como se muestra en la Figura 11 en el caso de vigas, corona de madera o acero con pernos será suficiente para su conexión, para esto se colocan pernos de $\varnothing 3/8''$ de conexión entre la viga de amarre del panel y la viga corona del módulo, con un distanciamiento de 50 cm aproximadamente, no obstante, priorizando la proximidad de los pernos a los entrenudos del culmo. El propósito de adicionar una regla de madera de 1"x6" es unificar la sección del panel y transmitir la fuerza a las columnas.

Figura 11. Detalle de viga corona de los paneles



Nota: Elaboración propia.

Finalmente, se llevaron a cabo las pruebas de resistencia, cuyo montaje experimental se muestra en la Figura 12, y cuyos resultados se muestran en la Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16. Se debe aclarar que los especímenes

experimentales, al ser prototipos preliminares, se determinó que tenían algunas condiciones no óptimas posterior a los ensayos.

De tal manera que, para las pruebas de compresión, en el primer espécimen uno de los culmos de columnas en apariencia tenía menor maduración. En este espécimen el material se deformó dentro del rango elástico hasta una carga de 11 kN, seguidamente en el rango plástico, presentando una gran deformación con poco aumento de carga hasta los 22 kN a la cual falló. Pese a esto, la deflexión del espécimen a lo largo del ensayo fue considerable, lo cual demostró que es ideal incluir elementos adicionales que ayuden a rigidizar el marco del panel.

Figura 12. Montaje experimental de las pruebas de compresión y flexión



Nota: Elaboración propia.

En el segundo espécimen, todos los culmos estaban en óptimas condiciones, se debe aclarar que en este espécimen los extremos disponían de una mezcla de cemento y agua para embeber el perno, debido a un distanciamiento mayor a 3cm del último nudo.

La flexión se dio desde los 5mm hasta los 16mm aproximadamente, soportando un incremento de fuerza gradual desde 10 kN hasta 13 kN.

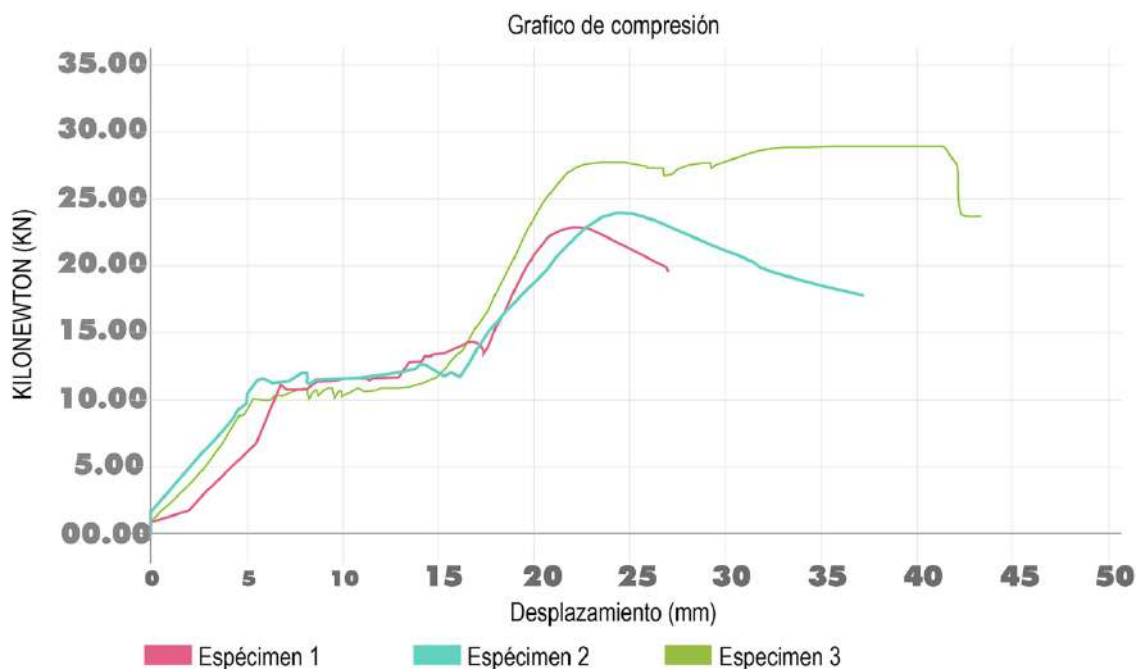
El punto máximo de soporte se obtuvo a los 24 mm con una fuerza de 24,10 kN después de ese punto la carga decreció en un 25% por lo que se detuvo la prueba.

A pesar de que la deflexión fue considerable al retirar la carga, no se observaron deformaciones visibles en los elementos de columnas.

El panel no presentó rupturas de sus componentes y quedó demostrada la flexibilidad del material.

En el tercer espécimen, en apariencia uno de los culmos estaba más seco que los demás. En las vigas, dos culmos cumplen con condiciones óptimas, y los dos restantes en apariencia estaban sobre maduros. El punto de flexión se dio de los 5 mm hasta los 15 mm, soportando una fuerza de 10 kN a 13 kN y un segundo punto de flexión entre los 22-41 min. El soporte se dio a los 42 mm con una fuerza de 29,09 kN.

Figura 13. Gráfico resumen de la resistencia de las pruebas a flexión



Nota: Elaboración propia.

Figura 14. Fotografía de las fallas a compresión de los especímenes

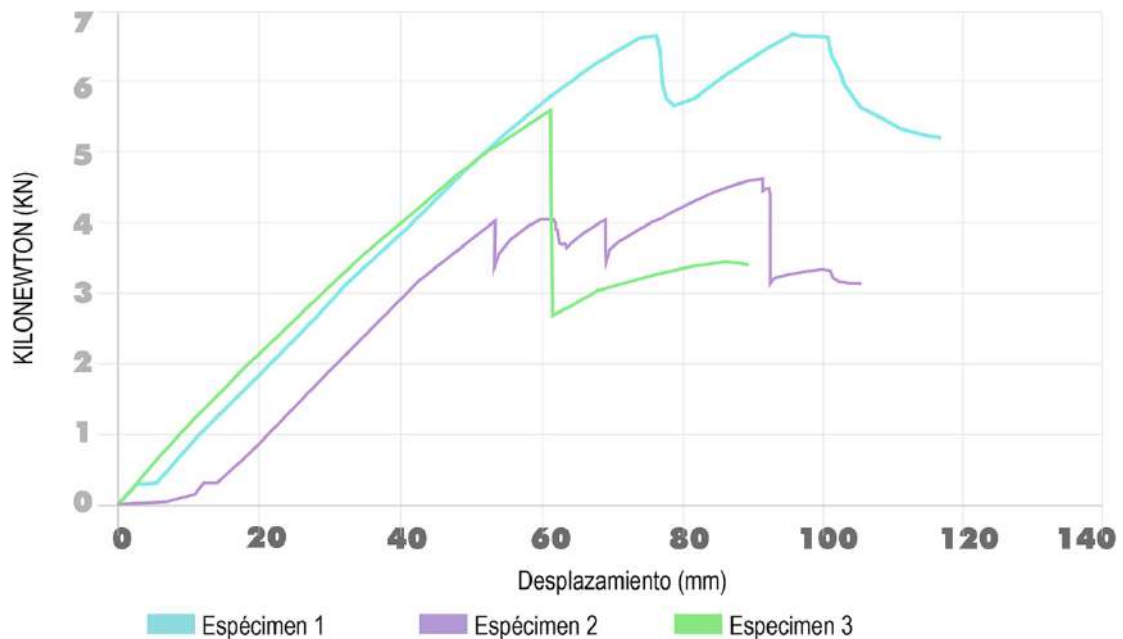


Nota: Elaboración propia.

En cuanto a las pruebas de flexión, los resultados obtenidos se resumen en la Figura 15. En el primer espécimen todos los culmos estaban en óptimas condiciones.

Los culmos de una de las vigas de amarre cuentan con una mezcla de cemento y agua para embeber el perno, por tener una distancia mayor a 3 cm con el nudo.

Figura 15. Gráfico resumen de la resistencia de las pruebas a flexión
Gráfico de flexión



Nota: Elaboración propia.

En el punto máximo de soporte se alcanzó una carga máxima de 6,79 kN y un desplazamiento máximo de 117mm.

En este ensayo se muestra el comportamiento a flexión del panel, donde se observa que dicha resistencia es menor que la resistencia obtenida en los ensayos de compresión.

Para este caso, la curva de esfuerzo-deformación tiene un claro inicio en el rango elástico, sin embargo, rápidamente falla de manera frágil.

Figura 16. Fotografía de las fallas a flexión de los especímenes



Nota: Elaboración propia.

En el segundo espécimen se detectó una fisura menor en una unión viga-columna, este alcanzó una carga máxima de 4,6 kN y un desplazamiento máximo de 105,7mm.

En esta prueba a flexión se presentó una menor resistencia con respecto a la anterior, debido a que en apariencia un culmo estaba más seco y no permitió un adecuado desempeño del panel. Lo anterior demuestra que, los elementos estructurales de bambú poseen una mejor resistencia si estos se tienen una humedad 14-16% que con una humedad menor.

En el tercer espécimen, de igual forma, un culmo estaba reseco y un perno estaba embebido en una mezcla de agua y cemento, este espécimen soportó una carga máxima de 6,2 kN y un desplazamiento máximo de 89,2 mm. En este ensayo el panel presenta una falla frágil. Se puede observar como el culmo en estado seco presentó una ruptura completa en toda su sección transversal y muestra la importancia de utilizar elementos que permitan rigidizar la estructura y ratifica la necesidad de utilizar culmos en estado óptimo de maduración.

De los resultados obtenidos en promedio en compresión fueron 22,98 kN mínimo y 29,09 kN máximo, si se comparan con los obtenidos en el sistema para vivienda (González-Beltrán, 2003), y se considera que dichos paneles 68,9 kN mínimo y 77,1 kN máximo.

Esta diferencia se puede deber a la diferencia en los materiales utilizados en la estructura, ya que las láminas de plybamboo le confieren un mayor soporte a la estructura.

Además, los prototipos de la presente investigación estaban incompletos en sus cerramientos dado que la finalidad era probar preliminarmente la resistencia del marco de los paneles.

Por otro lado, si se considera que el valor promedio para el esfuerzo de compresión de 92,23 kgF/cm² es inferior al establecido en la (Ministerio de Vivienda, 2009), que establece que el valor de esfuerzo admisible para el bambú en compresión paralela debe ser de 130 kg/cm², se debe considerar que en la presente investigación el bambú tenía altos niveles de humedad, y esto repercute en su menor capacidad de carga.

Adicionalmente, si se comparan los resultados con el estudio realizado por González (1998), *Comportamiento Estructural de Paneles de Bambú*, en el cual se obtuvo un valor de 460 kgF (kilogramos fuerza) de resistencia en el lado externo del panel para un prototipo construido de 0.90x2.40 m correspondiente a un valor de factor de seguridad para un viento de 120 Km/h, el cual se asemeja al valor mínimo obtenido en la prueba de flexión 2 de 469,07 kgF. El valor máximo obtenido en las pruebas de flexión fue de 692,39 kgF (6,79 kN), las cuales, con su valor promedio de 597,89 kgF (5,86 kN) superan en 1,3 veces el valor del estudio anterior. Se debe considerar que las dimensiones del prototipo del estudio son menores y que la composición de la estructura y sus materiales también varían.

Por otro lado, de la experiencia en la construcción de los prototipos de panel a escala real se determinó que estos pueden ser alzados y movilizadas por una sola persona sin dificultad por la ligereza del material. Dado que el bambú es un material muy liviano por su composición hueca y resistencia en sus nudos y paredes, estas características lo convierten en un material con buen comportamiento ante sismos, en reportes adicionales a este trabajo se documentó la aproximación al proceso constructivo, tiempo de ensamblaje y transporte de los paneles. Así como la aproximación preliminar del costo económico del sistema de panelería.

Aproximación al proceso constructivo y transporte de los paneles

Para estimar el tiempo aproximado de construcción de los paneles, se calculó acorde al trabajo realizado por dos personas sin habilidades técnicas de construcción, disponiendo únicamente de herramientas básicas de corte y de conocimientos teóricos. Se tardó alrededor de 13 horas en realizar 6 paneles a escala real. Por lo tanto, basado en esta referencia, el tiempo de prefabricación para poder conformar un módulo de aulas rectangular de 26 paneles es de 55 horas y para un módulo hexagonal de 24 paneles es de 50,64 horas, por lo que dos personas podrían construir los paneles en aproximadamente 7 días laborales. Con la referencia anterior se tiene que una cuadrilla de construcción podría elaborar un módulo de aula en 3,5 días laborales, correspondiente a personas con poco conocimiento en construcción, por lo que contando con personas con mejores habilidades y herramientas de corte eléctricas podría disminuir aún más el tiempo considerado. En cuanto a temas de transporte, se considera que debido al bajo peso de los paneles y en un camión de carga simple de dos ejes con un cajón de 2,6 x 4,8 x 4,4 m con una capacidad de carga de 16 ton sería posible transportar en un solo camión hasta 120 paneles (Figura 17).

Figura 17. Portabilidad del panel de bambú



Nota: Elaboración propia.

En cuanto al almacenaje de los prototipos, se colocaron tanto de manera horizontal con estibas de bambú, como de manera vertical apoyados a la pared. No obstante, de manera general para el almacenamiento de bambú u otros elementos prefabricados con este material, se recomienda un almacenaje horizontal utilizando estibas de madera o bambú entre cada elemento. Para el caso de los prototipos, se determinó que de igual manera es óptimo almacenarlos de forma horizontal para utilizar toda su extensión como apoyo evitando cualquier tipo de deformación, además de utilizar un menor espacio en el taller con la posibilidad de apilar uno sobre otro. Los 6 paneles apilados conformaron una altura de 90 cm aproximadamente, con lo que se considera que se podrían apilar hasta 12 paneles a una altura de 1,80 m con facilidad de manipulación entre dos personas.

El empleo del bambú en la construcción se considera como una producción de cero desperdicios, ya que a pesar de que de un culmo entero de bambú de aproximadamente 20m solo 14 a 16 m son aprovechables para la construcción (Stamm, 2018), a su vez al momento de seleccionar los segmentos más rectos y óptimos, quedan secciones sin utilizar. Estos materiales restantes que podrían llegar a considerarse desperdicios, en realidad pueden tomar otros destinos dentro de una misma obra de construcción, como en mueblería, lámparas o artesanías. Inclusive pequeños trozos restantes y hasta el aserrín producido durante los cortes del bambú pueden ser transformados en pellets (cápsulas comprimidas de material combustible) para sistemas de producción de energía limpia (Rusch, F., de Moraes; Lúcio, D.; & de Campos, 2020), por lo tanto, la construcción de este sistema de panelería no dejaría desperdicio alguno en su proceso de prefabricación.

Aproximación del costo económico

En cuanto al costo económico obtenido, los cerramientos se estimaron con los precios de los productos en el mercado y la mano de obra de prefabricación de los paneles con la lista de salarios mínimos del segundo semestre del 2022 del Ministerio de Hacienda y su valor por hora. Se eligió estimar el costo de tres de los cerramientos propuestos, lo cual da distintos valores con considerables diferencias como se muestra en la (Tabla 6). Estos se promediaron para obtener un valor comparativo frente al sistema tradicional prefabricado de baldosa-columna en concreto que más se emplea en Costa Rica.

Tabla 6. Costo económico de la elaboración de un panel prefabricado en bambú

Material	Costo
3 Culmos de bambú de 6 m	21,900 colones
Cerramiento 1: 30 piezas de caña brava de 3,2 m	21,000 colones
Cerramiento 2: 2 láminas de cartón-yeso	36,000 colones
Cerramiento 3: 10 láminas de esterilla de bambú	33,945 colones
2 reglas de madera de 1"x2"	5,200 colones
0.20 m de regla de madera de 2"x2"	500 colones
180 tornillos para madera de 2" 1/2"	2,700 colones
40 tornillos para madera de 3"	800 colones
2 barras roscadas de 3/8"	3,000 colones
16 tuercas de 3/8"	1,600 colones
16 arandelas de 3/8"	560 colones
Mano de obra de prefabricación	3,072 colones
Total, con cerramiento 1	53,060 colones
Total, con cerramiento 2	68,060 colones
Total, con cerramiento 3	66,005 colones
Promedio total	62,375 colones

Nota: Elaboración propia.

Para estimar el costo de un panel prefabricado en concreto de baldosa-columna (sección entre columnas con 5 baldosas de 1,25x0,50 m), se promedió el costo estimado en tres empresas en Limón y una fuera de la zona, así como el costo del mortero de pega y el repello para obtener un total de ₡49.273. Con dicha comparación se tiene que el sistema de la propuesta es un 30,74% más caro en comparación con el sistema tradicional. No obstante, según el *Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva* del Ministerio de Hacienda. Dirección General de Tributación (Ministerio de Hacienda Gobierno de Costa Rica, 2021) el costo por metro cuadrado de una construcción en bambú es de ₡130.000 mientras que para el sistema de baldosa columna es de ₡240.000 colones por lo tanto la diferencia varía a 54,16 % más económico el sistema propuesto. Esto dado a diferentes factores como la obtención del bambú haciendo uso de las plantaciones del Estado, por ser un proyecto público, así también en aspectos técnicos; por su cualidad de liviano su cimentación puede ser más sencilla, la mano de obra de instalación más rápida y menos técnica, y el transporte menos costoso, con lo cual se reduce significativamente el costo en términos globales de la obra.

Conclusiones

Basado en la experiencia de la propuesta de diseño de un sistema de panelería prefabricada en bambú, se destacan como principales hallazgos la capacidad estructural del sistema de marcos, el cual posibilita integrar distintos tipos de cerramientos de fácil manejo e instalación, por lo que aporta flexibilidad en el

uso de los paneles para las distintas necesidades de ventilación e iluminación de los espacios.

En cuanto a los principios de lenguaje arquitectónico de la propuesta, estos están relacionados con la arquitectura tropical, la arquitectura caribeña y la protección por diseño del material. A través de estos se fortalece la identidad cultural local, considerando la panelería modular como una alternativa versátil, apta para infraestructuras de tipo educativo y habitacional, así como el confort de los espacios que se generen con este sistema.

Con la construcción de prototipos a escala real, se muestra que el sistema de panelería propuesto es de fácil manipulación y no requiere mano de obra especializada, por lo que puede ser desarrollado fácilmente bajo una organización comunitaria, con una previa inducción sobre construcción con bambú, lo que ofrece empleo y nuevos conocimientos a las personas de las comunidades.

Dado que el sistema constructivo de la propuesta se puede armar y desarmar con la posibilidad de reutilizar los elementos, se considera un sistema óptimo para atender situaciones de emergencias por desastres naturales, o bien como infraestructura temporal durante el proceso de construcción de una escuela definitiva, haciéndolo ideal para proyectos educativos, como por ejemplo el de Aulas móviles del Ministerio de Educación de Costa Rica (Ministerio de Educación Pública de Costa Rica, 2022).

Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones están orientadas al seguimiento de la I+D del sistema propuesto para poder optimizarlo:

1. Realizar simulaciones de confort espacial para corroborar los aportes del sistema en la calidad espacial de los recintos.
2. Considerar el uso de sistemas de cimentación prefabricados y el empleo de mano de obra local, con el fin de reducir costos en la construcción total de los módulos.
3. Hacer uso siempre de las plantaciones más cercanas al lugar de realización de los paneles y optar por cerramientos naturales lo cual

puede implicar una disminución de costos para potenciar al máximo los beneficios del empleo del bambú.

4. Realizar pruebas o ensayos de cortante con la finalidad de completar las pruebas de resistencia a los esfuerzos básicos. Además, como aspecto técnico clave, se debe realizar la determinación rigurosa del contenido de humedad de los especímenes durante su construcción y durante las pruebas, así como la consideración de aclimatar los culmos en un cuarto climatizado con condiciones de humedad relativa y temperatura controladas (65% (± 2) y 20°C).

Conflictos de interés

Las autoras declaran no tener ningún conflicto de interés.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales del Universidad de Costa Rica (LANAMME-UCR) con la realización de ensayos. A la Fundación Nacional de Bambú (FUNDEBAMBÚ); al Sr. Luis Fallas Calderón, a Marilyn Rojas Vargas, y a la Sra. Ana Cecilia Chaves por su asesoría (y a esta última por la donación del bambú para la elaboración de los prototipos).

Referencias bibliográficas

- American standard for testing material (ASTM). (2015). *ASTM- E72-15 Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction*. West Conshohocken, PA, USA.
- Camargo García, J. C.; Rodríguez, J. A.; & Arango Arango, A. M. (2010). Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, 61, 86-94. CATIE, Turrialba (Costa Rica).
- Córdoba Alvarado, Michael. (2021). Monitoreo y reporte de captura de carbono en plantaciones de bambú *Guadua angustifolia* Kunth en Costa Rica. *Ambientico*, 278. Art 4, 24–29. Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional (UNA), Heredia, Costa Rica.

- Córdova Alcívar, P. (2014). *Obtención de las propiedades mecánicas y estructurales de la caña Guadúa Angustifolia Kunth del Ecuador*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- González-Beltrán, G. (2003). *Plybamboo wall-panels for housing: Structural design*. Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven, Netherlands.
- González, A. (2017). El desarrollo del bambú en Costa Rica. *Ambientico*, 262, 4–10. Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional (UNA), Heredia, Costa Rica.
- Guzmán-Yara, J. C. & Hernández-Bustos, Y. F (2021). Evaluación de las conexiones para estructuras en guadua: una mirada desde la bibliografía científica. *Procedia Engineering*, 145, 796–803. Elsevier, Netherlands. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.104>.
- Hidalgo López, O. (1981). *Manual de construcción con bambú*. Universidad Nacional de Colombia. Estudios Técnicos Colombianos LTDA-Editores. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (INCOTEC).(2014). *NTC 6100 Norma técnica Colombiana para productos de Guadua Criterios ambientales para productos de primer y segundo grado de transformación de Guadua Angustifolia kunth GAK* Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (INCOTEC). (2018). *NTC 5407 Uniones estructurales con Guadua*. Bogotá, Colombia.
- International standarization organization (ISO). (2004a). *ISO/TR 22157-2:2004 Bamboo — Determination of physical and mechanical properties — Part 2: Laboratory manual*. Geneva, Switzerland.
- International standarization organization (ISO). (2004b). *ISO 22156:2021 Bamboo structures - Bamboo culms -Structural design*. Geneva, Switzerland.
- International standarization organization (ISO). (2004c). *ISO 22157-1:2004 Bamboo — Determination of physical and mechanical properties — Part 1: Requirements*. Geneva, Switzerland.
- Jayanetti, D. L.; & Follett, P. R. (2008). Bamboo in construction. In L. Taylor and Francis Group (Ed.), *Modern Bamboo Structures: Proceedings of the First International Conference* (pp. 23–32) Taylor and Francis Group, London.
- Luna, P.; Takeuchi, C.; Granados, G.; Lamus, F. & Lozano, J. (2011). Metodología de diseño de estructuras en guadua angustifolia como material estructural por el método de esfuerzos admisibles. *Revista Educación En Ingeniería*, 6, no 11, 66-75, Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI), Bogotá, Colombia.
- Mendoza Castro, J., & Rosales Salcedo, J. (2014). *Uso de la caña guadua en la vivienda modular*. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
- Ministerio de Ambiente y Energía Gobierno de Costa Rica (MINAE). (2019) Plan de descarbonización Costa Rica. San José, Costa Rica.

- Ministerio de Educación Pública de Costa Rica (MEP). (2022). *Aulas-portátiles Ministerio Educación Pública Costa Rica*. Proyecto Del MEP y El BAC Lleva Aulas Nuevas a Centro Educativos Afectados Por Desastres Naturales. <https://www.mep.go.cr/palabras-clave/aulas-portatiles>. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Hacienda Gobierno de Costa Rica (MH). (2021). *Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva del Ministerio de Hacienda*. (pp. 10–238). publicado en La Gaceta N°202 alcance N°213. <https://www.hacienda.go.cr/docs/TipologiaConstructiva2021.pdf>. San José, Costa Rica.
- Ministerio de desarrollo urbano y vivienda de Ecuador (MIDUVI) (2015). *NEC Norma Ecuatoriana de la Construcción SE Estructuras de Guadua (GAK)* Quito, Ecuador.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2009). *Norma Técnica peruana E.100 Bambú*. Lima, Perú.
- Morán-Ubidia, J. M. (2015). *Construir con bambú: manual de construcción*. Universidad de San Martín de Porres. Instituto de vivienda. construcción y urbanismo. Red Internacional de Bambú y Ratán, (INBAR) (international network for bamboo and rattan). Beijing, China. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/27883>
- Ramírez, A. D.; Torres, D.; Peña, P.; & Duque-Rivera, J. (2014). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions arising from the production of glued and pressed wall panels derived from *Guadua Angustifolia Kunth* (bamboo) in Ecuador. *WIT Transactions on the Built Environment*, 142, 447-457. WIT Press, Southampton, UK.
- Rusch, F., de Moraes; Lúcio, D.; & de Campos, R. F. (2020). Potential of bamboo for energy purposes. *Research, Society and Development*, 9(7). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, Brasil <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3537>
- Silva, L. H. P.; de Paiva, F. F. G.; Tamashiro, J. R.; de Almeida, M. P. B.; de Maria, V. P. K.; de Oliveira, V. M. A. & Kinoshita, A. (2023). Bamboo as a Sustainable Building Material. In *Bamboo and Sustainable Construction* (pp. 1–8). Springer Nature, Singapore.
- Stamm, J. (2018). Diseño y sistemas constructivos para una arquitectura contemporánea en bambú. *Simposio Internacional Del Bambú*. Fundación para el Desarrollo del Bambú en Costa Rica (FUNDEBAMBÚ), Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.
- Wadel, G.; Avellaneda, J.; & Cuchí, A. (2010). La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. *Informes de La Construcción*, 62(517), 37-51. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, (IETcc). Madrid, España. <https://doi.org/10.3989/ic.09.067>