

Aprovechamiento de la arquitectura pasiva para la reducción de carga térmica por ganancia solar en un edificio de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Guayaquil.

Bismark Torres^{1,2*}, Joselyn Viñachi¹, Jhon Cusquillo¹, Carlos Pazmiño¹, Mercè Segarra²

Resumen

Para poder acondicionar térmicamente un edificio o espacio cerrado de forma eficiente es necesario conocer el flujo de energía que intercambia con el exterior ó la carga térmica. En este trabajo se presentan los resultados de los indicadores de evaluación de la carga térmica por ganancias solares y el consumo de energía eléctrica de un edificio de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Guayaquil. Se hace un análisis de la variación de los dos indicadores cuando se contemplan algunas de las posibles actuaciones que permiten reducir la carga térmica del edificio. La determinación de la carga térmica se ha realizado por medio de simulaciones con el programa DesignBuilder. Los re-

sultados de la evaluación muestran que la mayor carga térmica por ganancias solares se presenta en ventanas externas, cubiertas y muros. En consecuencia, se elabora una propuesta de intervención sostenible en la edificación para mejorar su rendimiento energético, considerando aleros en ventanas, una cubierta verde, recubrimiento de muros y fachadas ventiladas. Al evaluar la propuesta de intervención sostenible, se evidencia una reducción anual de la carga térmica del 91,00% en cubierta, 41,00% en ventanas y 6.00% en muros, lo que representó un ahorro anual de energía eléctrica del 24,56%.

Palabras clave: evaluación energética; simulación; arquitectura pasiva; protección solar; cubierta verde.

¹ Departamento de Investigación, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

² Centro DIOPMA, Departamento de Ciencia de Materiales y Química Física, Facultad de Química, Universitat de Barcelona, Barcelona, España.

*bismark.torresr@ug.edu.ec

Abstract

To be able to thermally condition a building or enclosed space efficiently, it is necessary to know the flow of energy that exchanges with the outside or the thermal load. This paper presents the results of the evaluation indicators of the thermal load for solar gains and the electric power consumption of a building of the Faculty of Architecture and Urbanism of the University of Guayaquil. An analysis of the variation of the two indicators is made when considering some of the possible actions that reduce the thermal load of the building. The determination of the thermal load has been carried out by means of simulations with the DesignBuilder program. The results of the evaluation show that the highest thermal load for solar gains occurs in external windows, roofs and walls. Consequently, a proposal for sustainable intervention in the building is made to improve its energy efficiency, considering eaves in windows, a green roof, wall covering and ventilated facades. When evaluating the proposal of sustainable intervention, an annual reduction of the thermal load of 91.00% in roof, 41.00% in windows and 6.00% in walls is evidenced, this represented an annual saving of electrical energy of 24.56 %.

Keywords: *energy evaluation; simulation; passive architecture; solar protection; green roofs; thermal load.*

1. INTRODUCCIÓN.

La Eficiencia Energética trata de realizar un aprovechamiento óptimo de la energía [1]. Los edificios representan un

40% del consumo total de energía [2]. En Ecuador, los sectores residencial, comercial y público son los responsables del 18% del consumo energético total y del 57% del consumo de energía eléctrica [3].

La práctica de diseñar y construir bajo criterios de eficiencia energética y sostenibilidad, haciendo uso de la arquitectura pasiva en Ecuador es muy limitada [4], lo que conlleva al uso excesivo de sistemas de climatización, pérdidas energéticas y un elevado costo de funcionamiento de las edificaciones [5]. Un edificio de energía casi nulo es aquél que tiene un alto rendimiento energético [4].

La arquitectura pasiva implica una combinación de principios arquitectónicos convencionales para crear un ambiente confortable durante todo el año. Las estrategias de arquitectura pasiva buscan mejorar la eficiencia del edificio desde el punto de vista energético [5][6][7]. La orientación de los edificios determina en gran medida la demanda energética por climatización. Una buena orientación [6] podría minimizar considerablemente las demandas energéticas a través del control de las ganancias solares. En zonas como Ecuador se recomienda una orientación norte y sur de las fachadas principales, para facilitar las estrategias de protección de fachadas.

La protección solar es un sistema capaz de controlar y aprovechar de forma óptima el ingreso de la radiación solar, generando un ahorro en el consumo energético [8]. La radiación solar afecta directamente a las zonas acristaladas de un edificio y varía con respecto a la latitud y

orientación según ubicación del edificio. La dirección y tamaño de los flujos energéticos varían a lo largo del día, a lo largo del año y de un lugar a otro, dependiendo de las condiciones climáticas internas y externas [9].

La fachada ventilada es un sistema de cerramiento vertical compuesto por capas interpuestas: hoja exterior, cámara de aire, aislamiento térmico y hoja interior [10].

El uso de cubiertas verdes es una forma de reducir la carga térmica en una edificación y controlar los microclimas. Sin embargo, su instalación, costo y mantenimiento representan una desventaja. El uso de plantas enredaderas en macetas se presenta como una alternativa viable para dichos propósitos [11].

Design-Builder [12] es un software especializado en la simulación energética y medioambiental de los edificios. Sus herramientas permiten evaluar diferentes aspectos bioclimáticos como los niveles de confort, carga térmica, el consumo de energía y las emisiones de carbono.

2. MÉTODO.

2.1. Caso de estudio.

Para este estudio se utilizó como caso de prueba un edificio de dos pisos de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Guayaquil. El edificio está situado en la ciudad de Guayaquil (Ecuador). Se considera la simulación de una intervención de arquitectura pasiva en los elementos de mayor ganancia térmica de una edificación para disminuir su carga térmica y reducir el consumo de energía eléctrica. El edificio fue modelado en DesignBuilder y calibrado con la base de datos de la estación meteorológica Aeropuerto [13] El perfil de ocupación está determinado por 50 personas (docentes y estudiantes) en un horario de lunes a viernes de 08:00 a 20:00 horas. Solo la segunda planta está climatizada por 2 equipos tipo Split.

En la figura 1 se muestran los elementos constructivos (a excepción de las ventanas) que se consideraron para este estudio. En las tablas 1-5 se presentan las fichas técnicas de los principales materiales con los que está construido el edificio.



Figura 1. Vista de elementos constructivos del edificio.

Tabla 1. Ficha técnica del bloque de hormigón.

	Características	Medidas	Detalle
Material	Bloque de Hormigón Hueco	0,1 x 0,2 x 0,4 m ³	
Propiedades de masa térmica	Conductividad térmica	0,62 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	
	Calor específico	840,00 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	
	Densidad	1040,00 kg·m ⁻³	
	Transmitancia térmica (U)	2,428 W·m ⁻² ·K ⁻¹	
Espesor	Parcialmente Enlucido	0,02 m	
	Ancho de Bloque	0,10 m	

Tabla 2. Ficha técnica de cimentación de hormigón armado.

	Características	Medidas	Detalle
Material	Cimentación de Hormigón Armado	20,80 x 6,78 m	
Propiedades de masa térmica	Conductividad	1,400 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	
	Calor específico	840,00 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	
	Densidad	2100,00 kg·m ⁻³	
	Transmitancia térmica (U)	2,422 W·m ⁻² ·K ⁻¹	
Espesor		0,20 cm	

Tabla 3. Ficha técnica de losa de hormigón armado.

	Características	Medidas	Detalle
Material	Losa de Hormigón Armado	24,00 x 10,54 m	
Propiedades de masa térmica	Conductividad	1,400 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	
	Calor específico	840,00 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	
	Densidad	2100,00 kg·m ⁻³	
	Transmitancia térmica (U)	2,31 W·m ⁻² ·K ⁻¹	
Espesor		0,20 m	

Tabla 4. Ficha técnica de baldosa.

	Características	Medidas	Detalle
Material	Baldosa	0.30 x 0.30 m	
Propiedades de masa térmica	Conductividad	0,80 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	
	Calor específico	850,00 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	
	Densidad	1700,00 kg·m ⁻³	
	Transmitancia térmica (U)	3,32 W·m ⁻² ·K ⁻¹	
Espesor		0,006 m	

Tabla 5. Ficha técnica de celosía de vidrio.

	Características	Medidas	Detalle
Material	Celosía de vidrio simple	0.80 x 0.10 cm	
Propiedades térmicas	Conductividad	0,90 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	
	Transmitancia térmica (U)	5,984 W·m ⁻² ·K ⁻¹	
Espesor		0,03 cm	

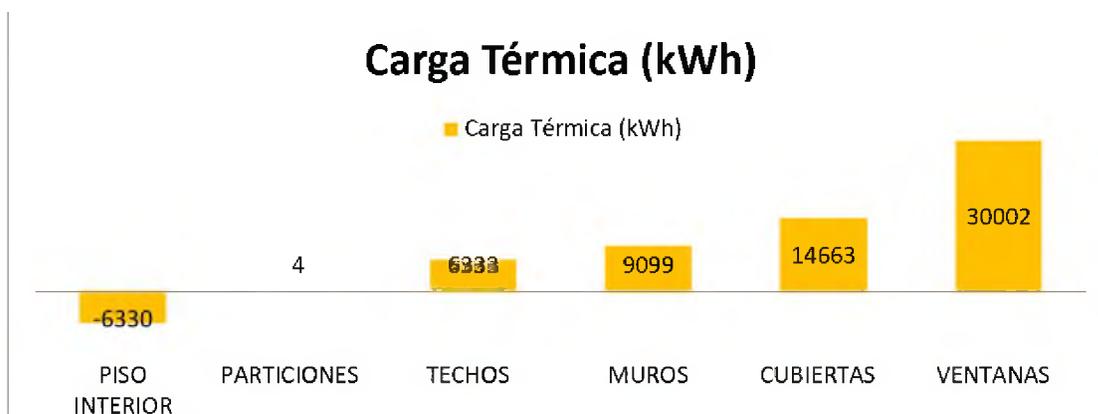
2.2. Indicadores.

Los indicadores a observar son la carga térmica (kWh) por ganancia solar y el consumo de energía eléctrica (kWh).

2.2.1. Carga térmica.

La figura 2 muestra los resultados de

las ganancias térmicas por elementos constructivos. Se puede identificar qué elemento es el que aporta la mayor carga térmica 30002 kWh (ventanas), seguido por cubiertas 14663 kWh y muros 9099 kWh. Todos estos valores son anuales.

**Figura 2.** Cargas térmicas anuales del edificio Asociación de Profesores.

2.2.2. Consumo de energía eléctrica.

El consumo anual de energía eléctrica del edificio fue de 72082,91 kWh.

2.3. Estrategia de arquitectura pasiva.

Los elementos a intervenir corresponden a los que permiten una mayor aportación de carga térmica al edificio. De acuerdo a la información obtenida, consideramos que la protección solar es la solución más

idónea para disminuir la carga térmica en el interior del edificio.

2.3.1. Protección solar en cubierta.

Por las características favorables para desempeñarse en climas tropicales, el poco mantenimiento el tamaño de hoja, se eligió la planta de maracuyá para crear una cubierta verde sobre una malla, a 2,5 m de altura a partir del nivel de la cubierta.

Tabla 6. Ficha técnica de cubierta verde de maracuyá

	Características	Medidas
Material	Cubierta de Maracuyá	20,73 x 10,54 m
Propiedades de masa térmica	Resistencia térmica	0,3620 W·m ⁻² ·K ⁻¹
	Transmitancia térmica (U)	1,99 W·m ⁻² ·K ⁻¹
Altura de vegetación		0,10 m
Índice de área de hojas		2,70
Reflectividad de las hojas		0,220
Emisividad de las hojas		0,950
Espesor		0,10 m

*Figura 3. Cubierta de maracuyá sobre edificio Asociación de Profesores*

2.3.2. Protección solar en ventanas.

Se utilizó el software SOL-AR para determinar las protecciones solares en las ventanas [14].

Tanto para la fachada este como para la oeste se utilizan aleros de bambú con recubrimiento de aluminio de 2 mm. Los

aleros tienen forma de L con el objeto de disminuir la longitud horizontal del alero y evitar la incidencia de sol directa sobre las ventanas desde las 09:00 hasta 16:00 horas. En las figuras 4 y 5 se muestran los cortes de la ubicación de los aleros en las ventanas de la fachadas este y oeste.

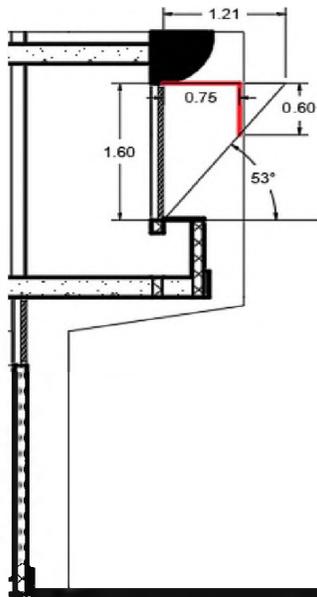


Figura 4. Corte transversal de fachada este.

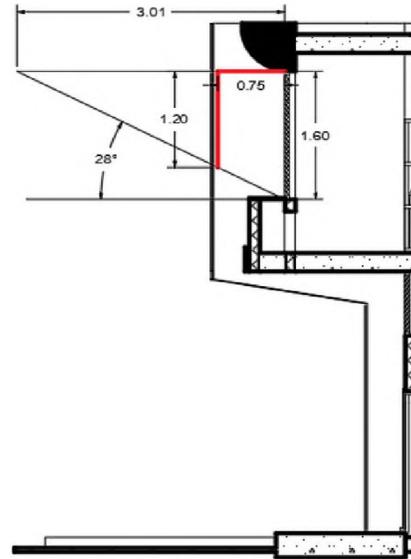


Figura 5. Corte transversal de fachada oeste.

2.3.3. Recubrimiento de muros.

Las fachadas del edificio están orientadas una hacia el este y la otra hacia el oeste, lo que ocasiona que, en horas de la mañana, la fachada este tenga mayor incidencia solar y, en la tarde, la fachada oeste. Se recubrieron con fachadas ventiladas de 1,40 m

de altura, 3,14 m de ancho y 0,032 mm de grosor los muros de planta baja de la fachada oeste. Los antepechos de las ventanas se recubrieron con poliuretano proyectado de 0,003 m en las dos fachadas. En la figura 6 se muestra la disposición de los recubrimientos en la fachada oeste.



Figura 6. Recubrimiento de muros de fachada oeste

La figura 7 muestra un detalle de los cortes de las protecciones en muros.



Figura 7. Detalle de protecciones en muros.

4. RESULTADOS.

Los resultados de carga térmica y energía eléctrica se obtuvieron mediante la simulación de la propuesta en el programa DesignBuilder.

4.1. Carga térmica.

La figura 8 muestra los resultados

las ganancias térmicas de los elementos constructivos evaluados. Se puede identificar que el elemento ventanas es el que aporta la mayor carga térmica 17570 kWh, seguido por muros 8537 kWh y techos 6838 kWh. Todos los valores son anuales.

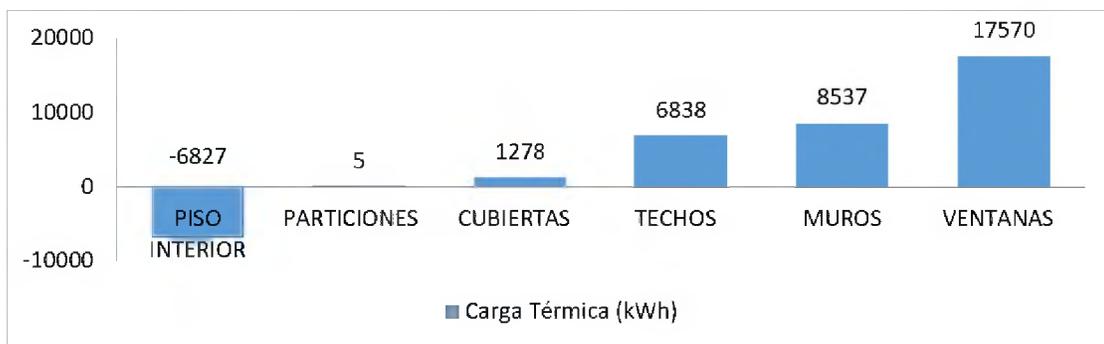


Figura 8. Carga térmica del edificio después de la intervención.

4.2 Consumo de energía eléctrica.

El consumo anual de energía eléctrica del edificio después de la actuación fue de 54382,71 kWh.

5. DISCUSIÓN.



Figura 9. Representación del antes y después de la edificación.

La aplicación de la cubierta verde de maracuyá representa la mayor reducción de carga térmica entre todos los elementos intervenidos. Disminuye en 91% el aporte de carga térmica respecto a las condiciones iniciales. La aplicación de aleros en las ventanas también contribuye significativamente a la disminución de ganancia térmica, reduce el 41% de la carga inicial.

Aunque en la protección de muros también hay una disminución, su disminución no es muy significativa, sólo representa el 6% en comparación con el elemento sin intervenir. En términos absolutos, la propuesta de cubierta verde y la protección con aleros reducen aproximadamente la misma cantidad de carga térmica 13385 kWh y 12432 kWh respectivamente.

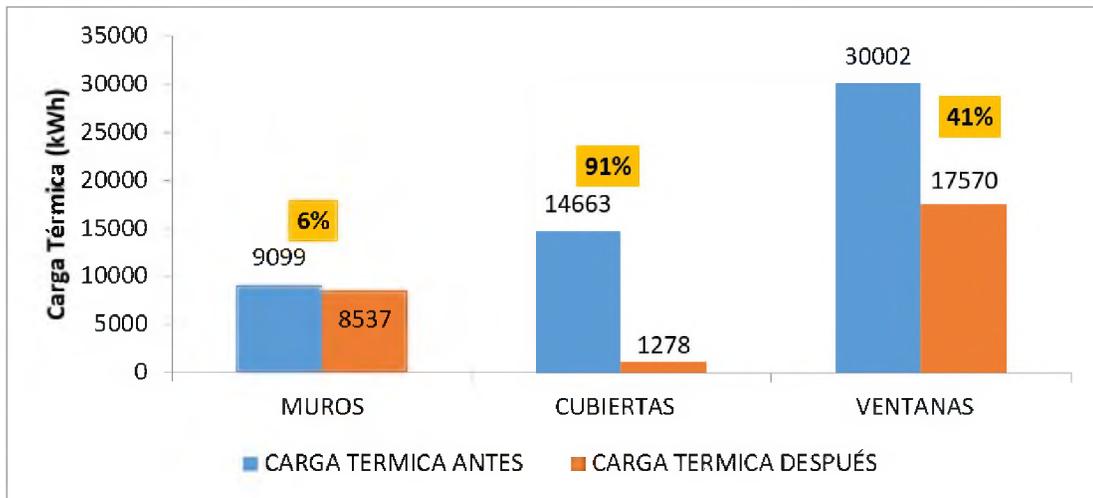


Figura 10. Comparación de carga térmica entre los eventos antes y después de la intervención

El edificio antes de la intervención representa un consumo de 72082,92 kWh de energía total, mientras que en condiciones de estrategia de arquitectura pasiva disminuye el consumo de energía a 54382,71

kWh, habiendo un ahorro de 17700,21 kWh anualmente. La aplicación de la estrategia de arquitectura representa el 24,56% de ahorro de energía anual en la edificación anualmente.

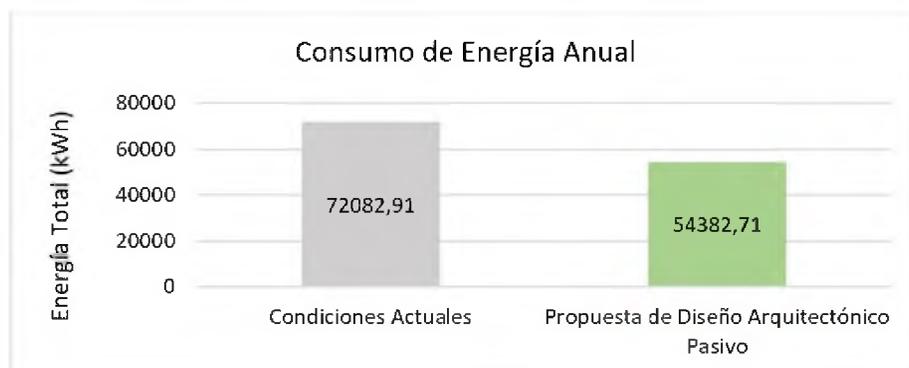


Figura 11. Comparación energía eléctrica entre los eventos antes y después de la intervención.

6. CONCLUSIONES.

El uso de protección solar contribuye significativamente en la disminución de carga térmica en el interior de la edificación.

Las ventanas, cubierta y muros fueron los elementos más susceptibles a las ganancias térmicas solares.

El uso de la cubierta verde de maracuyá redujo el 90% de la carga térmica en cubierta.

La protección de ventanas de la luz directa con un material a base de bambú, recubierto de aluminio redujo la ganancia térmica en 47%.

La protección de muros con facha-

das ventiladas y recubrimiento de poliuretano sólo representó el 6% de reducción de carga térmica.

La reducción de carga térmica fue similar entre la propuesta de cubierta verde y protección con aleros, 13385 kWh y 12432 kWh respectivamente; sin embargo, para poderlos comparar también se debería tener en cuenta la orientación, el área y el tiempo de exposición a los rayos solares.

Las estrategias de arquitectura pasiva aplicadas en este estudio lograron un ahorro anual de energía eléctrica del 24,56%.

Al hacer uso de arquitectura pasiva, es posible reducir la carga térmica y, por consiguiente, prescindir más de los servicios activos de climatización. Estas prácticas pueden conseguir excelentes ahorros en el consumo de energía y por consiguiente la reducción de gases de efecto invernadero.

7. REFERENCIAS.

- [1] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - MEER, "Dirección Nacional de Eficiencia Energética," 2014. [Online]. Available: <https://www.energia.gob.ec/direccion-nacional-de-eficiencia-energetica/>.
- [2] Comisión Europea, "Energía limpia para todos los europeos," Bruselas, 2016.
- [3] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Plan Nacional de Eficiencia Energética del Ecuador, 2016.
- [4] Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables - INER, "Eficiencia Energética en Edificaciones," Quito, 2014.
- [5] C. Naranjo, D. Rouse and G. Quesada, "Simulación transitoria de un sistema de climatización solar por absorción bajo las condiciones climatológicas de Guayaquil," Université du Québec Montréal, p. 2, 2015.
- [6] Cámara de Industrias y Comercio Ecuatoriano-Alemana, "Eficiencia Energética," Agosto 2016. [Online]. Available: <http://ecuador.ahk.de/es/servicios/proyectos/tecnologia-ambiental/eficiencia-energetica/>.
- [7] Eco Housing, "Passive architecture design systems," p. 1, 2009.
- [8] Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, Plan Nacional del Buen Vivir.
- [9] Asociación Española de Fabricantes de Fachadas Ligeras y Ventanas - ASEFAVE, "Manual de Protección Solar," Printed in Spain, Madrid, 2016.
- [10] Ulma Architectural, "Fachadas Ventiladas," Julio 2017. [Online]. Available: <http://www.ulmaarchitectural.com/es/fachadas-ventiladas/descargas/dossier-fachadas-ventiladas-ulma.pdf>.
- [11] H. F. Castleton, V. Stovin, S. B. M. Beck, and J. B. Davison, "Green roofs; Building energy sav
- [12] R. Briceño, Estudio y Simulación Energética del Edificio de la FIEC con Energy Plus, Guayaquil : Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2013
- [13] INAMHI. Instituto Nacional de Meteorología E Hidrología, Anuarios Meteorológicos, 1965 al 2015.
- [14] Laboratorio de Eficiencia Energética en Edificaciones, "Analysis SOL-AR," [Online]. Available: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/analysis-sol-ar>

El bambú como alternativa de construcción sostenible

Bismark Torres^{1,2*}, Mercè Segarra², Luis Bragança³

Resumen

El bambú ha sido y es utilizado por diferentes poblaciones en la construcción de sus viviendas. En América Latina tiene gran presencia: existen 20 géneros y 429 especies de bambúes leñosos que se distribuyen desde México hasta Argentina. En su estado natural es difícil de estandarizar debido a las variaciones que presenta a lo largo de su estructura, tanto en sus propiedades físicas como mecánicas, lo que ha dificultado su incursión masiva en la industria de la construcción. La elaboración de paneles bambú es una alternativa al problema de estandarización; no obstante, esta técnica representa la pérdida de las propiedades estructurales naturales del bambú. A pesar de ello el bambú sigue siendo una alternativa de construcción sostenible. En este trabajo se hace una revisión de la investigación publicada sobre el uso del bambú como una

alternativa de construcción sostenible, desde los puntos de vista de su capacidad para secuestrar carbono, la reducción del impacto ambiental que aporta a los sistemas constructivos, sus propiedades estructurales y sus posibles aplicaciones arquitectónicas.

Palabras clave: bambú; construcción sostenible; secuestro de carbono; impacto ambiental.

Abstract

Bamboo has been used by different populations in the construction of their dwellings. In Latin America it has a great presence: there are 20 genres and 429 species of bamboos that are distributed from Mexico to Argentina. In its natural state it is difficult to standardize due to the variations that occur throughout its structure, both in its physical and mechanical properties, which has hindered its massive incursion

¹Departamento de Investigación, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

²Centro DIOPMA, Departamento de Ciencia de Materiales y Química Física, Facultad de Química, Universitat de Barcelona, Barcelona, España.

³Centro CTAC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimaraes, Portugal.

*bismark.torres@ug.edu.ec

in the construction industry. The elaboration of bamboo panels is an alternative to the problem of standardization. However, this technique may represent the loss of the natural properties of bamboo. Despite this, bamboo remains an alternative for sustainable construction. This paper reviews the published research on the use of bamboo as a sustainable construction alternative, from the point of view of its capacity to sequester carbon, its environmental impact on construction systems, its structural properties and its possible architectural applications.

Keywords: *bamboo; sustainable construction; carbon sequestration; environmental impact.*

1. Introducción

Existe una necesidad urgente de establecer un nuevo paradigma para promover la conservación y la sostenibilidad ambiental. Para conseguirlo se necesita considerar en los productos la disponibilidad suficiente, capacidad de renovación, características físico-mecánicas adecuadas, eficiencia de costos, fácil acceso, producción simple, tecnología local adaptada a las condiciones locales y durabilidad. El bambú [1][2] se presenta como una alternativa a este paradigma, debido a que se encuentra en todas las regiones del mundo y sus 1.600 especies están repartidas en 33 países en un área aproximada de 31,5 millones de hectáreas. Presentan un rápido crecimiento y propagación sin que haya necesidad de replantarlos después del aprovechamiento adecuado, lo que representa ventajas productivas, económicas y ambientales. Se lo utiliza en ali-

mentación, construcción, artesanía, papel, paneles, tableros, laminados, suelos, techos, tejidos, aceite, gas, carbón vegetal, entre otros. En América Latina tiene gran presencia: existen 20 géneros y 429 especies de bambúes leñosos que se distribuyen desde México hasta Argentina. Dentro del género *guadua* en América se destaca la *guadua angustifolia Kunth*, nativa de Colombia, Ecuador y Perú, por sus excelentes propiedades físicas y mecánicas, que tiene una tasa de crecimiento de 10 cm por día, llegando a alcanzar los 30 m de altura y 25 cm de diámetro [3][4][5]

Frente al calentamiento global, la crisis energética y las tensiones socio-ambientales, el uso de energías renovables, los materiales y tecnologías sostenibles no convencionales se convierten en un gran aliado para minimizar el impacto de los convencionales y fomentar cambios en las actitudes de los profesionales involucrados [6]. La industria del bambú actualmente está en auge en Asia, y se extiende rápidamente a otros continentes como África y América [2]

2. El bambú y el secuestro de carbono

El carbono atmosférico (CO₂) es absorbido por los árboles mediante la fotosíntesis y es almacenado en forma de materia orgánica (biomasa). El CO₂ regresa a la atmósfera mediante la respiración de los árboles y por descomposición de la materia orgánica.

El bambú es considerado un material ecológico debido a la capacidad que tiene para secuestrar carbono a altas tasas en

función de su rápido crecimiento y producción de biomasa, está considerado dentro del grupo de plantas C4. Se regenera por sí solo a partir de rizomas, no necesita ser replantado. Puede crecer en terrenos no aptos para otros cultivos, lo que lo convierte en un complemento conveniente y útil para sistemas agrícolas y agroforestales diversificados, grandes y pequeños [1] [4] [7][8][4][9].

2.1 Fijación del carbono en los bosques de Bambú

La fijación de carbono en los bosques de bambú ha sido objeto de algunas investigaciones. Se observa que la cantidad de biomasa sobre el suelo es bastante similar en la mayoría de especies estudiadas: 121,51 t·ha⁻¹ *Bambusa cacharensis*, *Bambusa vulgaris* y *Bambusa balcooa* [10], 137,9 t·ha⁻¹ *Phyllostachys pubescens* [11], 143 t·ha⁻¹ *Bambusa blumeana*[12], 162 t·ha⁻¹ para *Chusquea culeou* [13] y 135,8 t·ha⁻¹ para *Phyllostachys bambusoides* [14]. El mayor aporte de biomasa se da en el culmo seguido por la rama y la hoja [5][10][11]. En la especie *Phyllostachys pubescens* la tasa de crecimiento de la biomasa por encima del suelo es de 3,0 t C ha⁻¹año⁻¹.

Para las especies *Bambusa cacharensis*, *Bambusa vulgaris* y *Bambusa balcooa* [10] el stock bruto de carbono en la plantación se estimó en 120,75 t·ha⁻¹ de los cuales el 51% corresponde al almacenamiento en la biomasa sobre el suelo (culmo 87%, rama 10%, hoja 3%), el 2% en la masa del piso de la camada y el 47% en el suelo hasta 30 cm de profundidad. Para la especie *Phyllostachys pubescens* el stock total de carbono en la reserva fue de 78,6 t·ha⁻¹ en el cuerpo de la planta y 101,2 t·ha⁻¹ en el sistema del suelo [11]

La fijación de carbono estimada *Guadua angustifolia*, para un período de crecimiento de 6 años, es de 54,3 t, donde 10,8 t (19,9%) de la fijación de CO₂ corresponde al rizoma y 43,5 t (80,1%) a la parte aérea del grupo; en las primeras etapas de crecimiento, la contribución del rizoma y el culmo alcanza el 50% de la biomasa total y, seis años después, la contribución del rizoma y el culmo a la biomasa total alcanza el 90% [5].

El suelo de bambú tiene implicaciones importantes en la manipulación del CO₂ atmosférico, al igual que el suelo de los bosques tropicales [10].

2.2 Almacenamiento de carbono en productos

La contribución anual de carbono no es uniforme: las generaciones de menor edad aportan una mayor proporción de biomasa que las de mayor edad [1]. La cosecha de bambú de 4 a 5 años fomenta un manejo cuidadoso de las plantaciones [15], lo que hace que el bambú sea más productivo. El hecho de usar el bambú con elevados porcentajes de biomasa en soluciones constructivas duraderas, representa un mayor almacenamiento de carbono como biomasa a largo plazo. El carbono secuestrado y almacenado en la biomasa del bambú recolectado sólo será liberado al ambiente por un proceso de combustión o biodegradación. El uso de soluciones de

bambú industrializadas en programas de vivienda en Filipinas [15] mostró efectos positivos sobre el medio ambiente al capturar y evitar más de 108 tCO₂ de emisiones durante 130 años. Las innovaciones recientes en el procesamiento y el desarrollo de productos han aumentado la porción de bambú convertido en productos duraderos como materiales de construcción, tableros para pisos, productos de paneles y muebles. Esto refuerza la contribución de los productos de bambú al secuestro de carbono a largo plazo [9].

2.3 El bambú y otras especies madereras

No se encontró mucha información respecto a la capacidad de secuestro de carbono del bambú frente a otras especies madereras. Sin embargo, un estudio donde se compara el bambú *Phyllostachys*, el pino y el eucalipto revela que el bambú almacena cerca del 45% del carbono en su biomasa, valor similar al de estas otras especies; pero si se incluye la tasa de crecimiento y la productividad anual almacena el 41% y el 21% más que el pino y el eucalipto respectivamente [16]. También su capacidad de secuestro es mayor cuando lo comparan con el abeto de China [17].

La *International Network for Bamboo and Rattan* (INBAR) hace una extensa revisión de la literatura sobre la producción de carbono y biomasa de los bosques de plantación en China, y concluye que el bambú parece ser una opción viable para el secuestro de carbono dentro de la silvicultura [18].

3. El impacto ambiental del bambú en los sistemas constructivos

Evaluaciones del ciclo de vida de materiales de construcción basados en bambú concluyen que los impactos ambientales de estos materiales crecen con una mayor industrialización [19][20]. Los insumos relacionados con la recolección y el transporte de bambú y la resina utilizada en el producto tienen una contribución extremadamente limitada al impacto ambiental, mientras que la naturaleza y la cantidad de energía utilizada en el proceso de producción son parámetros críticos que contribuyen de mayor manera a la variabilidad de los resultados [19]. Sin embargo, en un estudio de paneles prensados a base de *Guadua Angustifolia Kunth* (GAK), en el análisis del ciclo de vida determinaron que los principales contribuyentes a la huella de carbono son la producción de los productos químicos del pegamento (urea formaldehído y acetato de vinilo) y el transporte de las guaduas desde la granja hasta la planta de fabricación [20].

Una investigación [21] donde se compara el impacto ambiental de los materiales de bambú producidos en China y enviados a Europa occidental para su comercialización, con la madera, concluyen que: el procesamiento de productos de bambú y el transporte consumen la mayor cantidad de energía; los productos de bambú tienen menor impacto ambiental y mayor rendimiento que la madera dura tropical; el tallo de bambú y los productos de bambú de segundo grado, como los defibra de densidad media MDF y aglomerados, son soluciones sostenibles para aplicaciones locales; sin

embargo, tienen mayor impacto ambiental que los productos europeos de segundo grado de madera blanda europea. Un hallazgo sorprendente de la evaluación es que la resina utilizada para procesar productos de bambú industrial modernos contribuye poco a la huella de carbono o al costo ecológico. Sin embargo, hay espacio para mejorar utilizando resinas que contengan menos formaldehído.

4. Propiedades estructurales del bambú.

El bambú [22][23] es un material compuesto que está reforzado longitudinalmente por fibras de celulosa; a lo largo de su estructura presenta variaciones de volumen respecto al radio. La distribución de las fibras del bambú aumenta desde el interior hacia el exterior lo que les permite actuar como un refuerzo similar al de barras de acero en concreto. La evaluación de la integridad estructural del bambú con fines de construcción es esencial para garantizar que su uso se alinee con las aplicaciones requeridas.

El bambú responde muy bien a tensiones paralelas a la fibra. Sin embargo, a tensiones perpendiculares su respuesta es débil debido a la lignina, aunque esta característica junto a la del peso y su forma hueca representa una ventaja en caso de un terremoto [22][23][24]. El rendimiento mecánico del bambú depende mucho de la edad. El bambú joven tiene una mayor resistencia, rigidez elástica y resistencia a la fractura en comparación con su contraparte más antigua. La excelente toleran-

cia al daño del bambú puede atribuirse a la interacción y despliegue concurrente de la deflexión de grieta y el puente de grieta como los principales procesos de disipación de energía [25]. El bambú tiene mejor resistencia a la compresión que algunos otros materiales de construcción, como la madera, el hormigón y el ladrillo, y la resistencia a la tracción es comparable a la del acero [26]. También se compara favorablemente con muchas especies de madera en términos de su resistencia a la tracción, flexibilidad y dureza [9][22][23][27][28].

La unión de las cañas representa un desafío; sin embargo, la elaboración de juntas, es una propuesta viable para mejorar las conexiones estructurales de los elementos de bambú [24]

Las fibras naturales ofrecen ciertas ventajas en comparación con las sintéticas, ya que son renovables, biodegradables, menos abrasivas, y presentan una menor demanda energética para su producción. Un estudio [29] donde utilizan fibras bambú para la obtención de materiales compuestos de polipropileno, sin y con agente acoplante (anhídrido maleico de polipropileno), concluyen que la resistencia máxima a tensión y flexión para la mayoría de los materiales compuestos fue inversamente proporcional al aumento de partículas de bambú y directamente proporcional al agente acoplante, sin superar al plástico; mientras que el módulo de elasticidad en ambas propiedades aumenta en forma directa con el contenido de partículas y el agente acoplante por encima del plástico. La resistencia al impacto para los materia-

les compuestos es directamente proporcional, cuando se agrega agente acoplante.

Los productos de bambú diseñados resultan del procesamiento del culmo de bambú crudo en un material compuesto laminado o prensado, y son similares a los productos de madera laminada encolada. Estos productos permiten que el material se use en secciones estandarizadas y tienen menos variabilidad inherente que el material natural.

Respecto a las propiedades mecánicas de tensión y compresión, el bambú prensado tiene resistencias ligeramente más altas que el bambú laminado, mientras que en la propiedad de corte paralelo a la fibra su resistencia es menor [30]. Sus propiedades mecánicas son comparables a otros materiales estructurales como la madera y el bambú en bruto. Una ventaja del bambú laminado es su relación de resistencia a la flexión y densidad. La resistencia a la flexión del bambú diseñado es superior al del bambú natural y más baja que la de los compuestos de polímeros reforzados con fibra [28][31][32]. La densidad [33][34][35] tiene una influencia significativa en las propiedades mecánicas de los paneles de bambú, así como también en la absorción de agua.

Tanto el bambú prensado como el laminado exhiben el comportamiento anisotrópico típico del bambú natural y similar al de los compuestos reforzados con fibra [23][36].

Las cargas sísmicas son proporcionales al peso de la estructura y son cíclicas, lo que puede causar fallas de fatiga en las conexio-

nes. Históricamente los edificios tradicionales de bambú y quincha / bahareque han tenido un buen desempeño en terremotos por dos razones claves: su ligereza (alta resistencia en relación a su peso) y su ductilidad (esencialmente la capacidad de absorber energía) en las conexiones y uniones/empalmes, especialmente cuando se usan clavos [37].

En la India, realizaron un estudio utilizando bambú como reemplazo del acero donde las propiedades mecánicas del concreto reforzado con bambú [38] se presentaron en términos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción dividida y resistencia a la flexión. Los resultados muestran con satisfacción las posibilidades de utilizar el refuerzo de bambú como reemplazo del refuerzo de acero en estructuras de concreto pueden ser factibles en términos de construcción ecológica de bajo costo. Otro factor como la resistencia del concreto reforzado con bambú también está aumentando con la edad. En el campo de la construcción verde, el uso del bambú como reemplazo de acero, donde la disponibilidad de material de acero es baja y el costo es alto, puede ser la mejor solución. También se sugiere que la participación del bambú en la construcción verde puede disminuir el uso del acero y puede convertirse en una de las mejores soluciones con recursos limitados en áreas remotas para personas necesitadas. Sin embargo, debido a la tendencia del bambú a absorber agua, la unión entre el bambú y el concreto se considera el mayor problema [39].

La falta de códigos y estándares de construcción apropiados es una barrera para los ingenieros y arquitectos en el uso del material. La estandarización de los productos de bambú estructural refleja el creciente interés de la sociedad y los responsables políticos y ofrece una nueva apertura para el desarrollo industrial sostenible. El surgimiento de una codificación completa de los productos de bambú estructural puede ser inevitable en un futuro cercano,

Aunque las propiedades mecánicas del bambú están por encima de la media, el bambú es muy susceptible [37][40] al fuego, la humedad, las termitas y escarabajos, por lo que necesita ser tratado para protegerse contra ellos y mantener sus propiedades mecánicas.

5. Aplicaciones Arquitectónicas (soluciones constructivas).

El bambú es una de las plantas más primitivas del mundo. Debido a sus excelentes propiedades mecánicas se ha utilizado continuamente en el campo de la construcción en aplicaciones de paredes, techos, pisos, puentes, andamios, entre otras [26]. Se estima que más de mil millones de personas en todo el mundo viven en casas de bambú o utilizan este material como elemento principal para la estructura, el revestimiento exterior o la techumbre [1]. A pesar de la larga tradición de construcción con bambú, el material no se utiliza con frecuencia en construcciones modernas; la aplicación del bambú en el diseño aún se está desarrollando y se es-

peran nuevas aplicaciones [31][39] que continúen incrementando la porción de bambú convertido en productos duraderos.

El bambú es considerado un material versátil debido a su alta relación resistencia-peso, facilidad de trabajo y disponibilidad; dependiendo de su situación y aplicación puede remplazar al concreto, la madera o el acero [39][41][38]. Una mayor participación del bambú disminuiría el uso del acero y, con ello lo que su uso significa en términos de impacto ambiental. Esta también podría ser la mejor solución, en lugares donde la disponibilidad del acero sea baja y el costo alto.

Los productos de bambú diseñados resultan del procesamiento del culmo de bambú en un material compuesto laminado, similar a los productos de madera laminada encolada. Estos productos permiten que el material se use en secciones estandarizadas y tienen menos variabilidad inherente que el material natural [31]. El sustento del bambú para aplicaciones de construcción ofrece beneficios, tales como prefabricación, ensamblaje simple, reemplazo simple de partes estructurales y, además, los elementos de bambú podrían ser fácilmente desmantelados y reutilizados para otra aplicación [26].

Hay estudios prometedores, donde, dependiendo de sus propiedades higiénicas, térmicas y mecánicas, los tableros de fibra de bambú se pueden usar como materiales de aislamiento de edificios en paredes, techos o en espacios abuhardillados; así como también pueden participar en el control de humedad interior [42]. El

ahorro de energía en la construcción por transferencia de calor a través de paredes externas es otro tema importante en la selección de materiales. Las estructuras de paredes de acero y bambú tienen un mejor rendimiento energético que las estructuras de pared comunes [43], lo que indica un gran potencial para el uso de estas paredes en edificios residenciales en las zonas cálidas de verano e invierno frío; sin embargo, el principal inconveniente de la estructura de acero y bambú es que su rendimiento térmico interior durante las horas más calurosas del verano es más pobre que las paredes convencionales. No obstante, todavía falta mucho por investigar sobre estos temas.

En muchas regiones en desarrollo, existe un déficit de vivienda digna, de bajo costo, sostenible de construcción rápida y fácil, que resista a las tensiones producidas por el viento y/o terremotos [38][37]. Esta realidad ha motivado a autoridades e investigadores a pensar en el bambú como una alternativa de solución sostenible a la problemática planteada; lo que los ha llevado a seguir investigando en las bondades y usos del bambú, así como también a la creación de normas de construcción con bambú [44][45][46][47][9][1]. La Organización Internacional de Normalización (ISO) en 2004 publicó tres normas sobre la construcción de bambú (ISO, 2004a, 2004b, 2004c). Países como China, Colombia, Ecuador, India y Perú han tomado la iniciativa en la creación de un marco para los códigos de construcción [44]. Los resultados en el desarrollo de un método

de diseño de vivienda, usando paredes de paneles de bambú contrachapado con base en conexiones entre paredes, muestran que el método seleccionado podría ser implementado en regiones propensas a terremotos y vientos de magnitud considerable [48]. Poco a poco el bambú va recibiendo un mayor reconocimiento como material de construcción. Los pocos programas de construcción de casas de bambú a gran escala, para grupos de bajos recursos económicos, han tenido gran éxito respecto a su objetivo principal, el de proporcionar refugio a las familias pobres [46]. La Universidad Nacional de Colombia, en Bogotá, en el 2008, llevó a cabo el proyecto de "Diseño y construcción de viviendas con elementos estructurales de bambú laminado". El mismo consistía en implementar la producción de elementos estructurales en bambú laminado, elaborar el diseño arquitectónico y estructural y, la construcción de un prototipo de vivienda [49].

El bambú ofrece una variedad de opciones de construcción, desde costos muy bajos hasta costos elevados, y, por lo tanto, tiene una gama más amplia de grupos objetivo; sin embargo, aún persisten percepciones erróneas con respecto a la vivienda de bambú [1][37], lo que podría corregirse con una educación adecuada. Debido a su reputación como un producto sostenible y sus crecientes perspectivas como material de construcción, el bambú tiene una enorme potencialidad en el mercado de la construcción, especialmente en las clases sociales de ingresos bajos a medios [46].

El uso de bambú como una tecnología de madera laminada [50] puede reemplazar a la madera tradicional en ciertos elementos estructurales. Con un correcto desarrollo de productos, en el que el bambú sea abordado como un nuevo material y no solo como sustituto de la madera, el bambú puede sin duda convertirse en un material alternativo, que permite además el desarrollo de comunidades alrededor de su cultivo y tratamiento.

En muchos casos, los diseñadores trabajan en colaboración con artesanos, creando diferentes productos, cambiando estilos de vida y aplicando nuevas tecnologías para crear un mundo con productos sostenibles de manera ecológicamente compatible como diseño social [51].

Conclusiones.

La rápida tasa crecimiento, la productividad y la capacidad de los bambúes para sobrevivir y desarrollarse en suelos de baja calidad en comparación con cualquier plantación o sistema forestal hacen que el bambú sea una posibilidad recurso para disminuir el CO₂ atmosférico.

A escala global, el bambú mantiene su huella de carbono negativa; esto continuará mientras el mercado de productos de bambú siga creciendo y se lo pueda utilizar ampliamente como soluciones locales de construcción sostenible.

Aunque las propiedades mecánicas del bambú están por encima de la media, el bambú es muy susceptible al fuego, la humedad e insectos, por lo que se necesita investigar y educar más respecto al diseño

y construcción con productos de bambú. Existe evidencia de que el bambú es un material sismorresistente.

La capacidad de secuestrar carbono, la productividad y las nuevas tecnologías combinadas con las técnicas tradicionales representan una fortaleza para situar al bambú como el abanderado en la construcción sostenible en los países en vías de desarrollo.

Referencias Bibliográficas

- [1] M. Añazco Romero and S. Rojas, "Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la especie *Guadua angustifolia*," RED INTERNACIONAL DE BAMBÚ Y RATÁN, INBAR, p. 193, 2015.
- [2] Fao, "Global Forest Resources Assessment 2010," 2010.
- [3] M. de D. U. y V. MIDUVI, "Estructuras de *Guadua* (GaK)." 2016.
- [4] X. Londoño, "Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo," *Cespedesia*, vol. 19, pp. 87–137, 1992.
- [5] X. Londoño, G. C. Camayo, N. Riaño, and Y. López, "Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms," *Bamboo Science and Culture*, vol. 16, no. 1, pp. 18–31, 2002.
- [6] L. A. F. de Moraes, P. Ohayon, and K. Ghavami, "Application of Non-Conventional Materials: Evaluation Criteria for Environmental Conservation in Brazil," *Key Engineering Materials*, vol. 517, pp. 20–26, 2012.
- [7] CORPEI, "Bambu (Caña Guadúa Angus-

- tifolia) ‘Caña Brava’ Proyecto Corpei – Cbi ‘Expansión De La Oferta Exportable Del Ecuador,’ 2003.
- [8] Proyecto Corpei-CBI, “Expansión de la oferta exportable del ecuador’|Perfil de producto: Bambú,” pp. 1–25, 2005.
- [9] International Network for Bamboo & Rattan, “Bamboo : A strategic resource for countries to reduce the effects of climate change,” Beijing, China, 2014.
- [10] A. Jyoti Nath, G. Das, and A. K. Das, “Above ground standing biomass and carbon storage in village bamboos in North East India,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 9, pp. 1188–1196, 2009.
- [11] A. Y. Isagi, T. Kawahara, K. Kamo, and H. Ito, “Net Production and Carbon Cycling in a Bamboo *Phyllostachys pubescens* Stand,” *Plant Ecology*, vol. 130, pp. 41–52, 1997.
- [12] E. Uchimura, “Ecological studies on cultivation of tropical bamboo forest in the Philippines,” *Bulletin, Forestry and Forest Products Research Institute, Japan*, vol. 22, no. 301, pp. 79–118, 1978.
- [13] T. T. Veblen, F. M. Schlegel, and B. Escobar, “Bamboo (*Chusquea* Dry-Matter Production of Two Species of in South-Central Chile,” *Journal of Ecology*, vol. 68, no. 2, pp. 397–404, 1980.
- [14] Y. Isagi, T. Kawahara, and K. Kamo, “Biomass and net production in a bamboo *Phyllostachys bambusoides* stand,” *Ecological Research*, vol. 8, pp. 123–133, 1993.
- [15] E. Z. Escamilla, G. Habert, and E. Wohlmuth, “When CO₂ counts : Sustainability assessment of industrialized bamboo as an alternative for social housing programs in the Philippines,” *Building and Environment*, vol. 103, pp. 44–53, 2016.
- [16] R. Monteiro and S. De Carbono, “Eco-design a eficiência de produtos feitos de Bambu para o sequestro de carbono.pdf,” in 10o CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, SÃO LUÍS (MA), 2012.
- [17] T. Yen and J. Lee, “Comparing above-ground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model,” *Forest Ecology and Management*, vol. 261, no. 6, pp. 995–1002, 2011.
- [18] L. Yiping, L. Yanxia, K. Buckingham, G. Henley, and Z. Guomo, “Bamboo and Climate Change Mitigation: a comparative analysis of carbon sequestration,” 2010.
- [19] E. Zea Escamilla and G. Habert, “Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 69, pp. 117–127, 2014.
- [20] A. D. Ramirez, D. Torres, P. Peña, and J. Duque-Rivera, “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*, vol. 142, pp. 447–457, 2014.
- [21] J. Vogtländer, P. Van Der Lugt, and H. Brezet, “The sustainability of bamboo products for local and Western European applications. LCAs and land-use,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 13, pp. 1260–1269, 2010.

- [22] J. J. A. Janssen, "Designing and Building with Bamboo," Beijing, China, 2000.
- [23] S. Amada and S. Untao, "Fracture properties of bamboo," *Composites Part B:Engineering*, vol. 32, no. 5, pp. 451–459, 2001.
- [24] L. Villegas, R. Morán, and J. J. García, "A new joint to assemble light structures of bamboo slats," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 61–68, 2015.
- [25] I. M. Low, Z. Y. Che, B. A. Latella, and K. S. Sim, "Mechanical and Fracture Properties of Bamboo," *Key Engineering Materials*, vol. 312, pp. 15–20, 2006.
- [26] P. O. Awoyera and E. I. Ugwu, *Sustainability and Recycling of Bamboo for Engineering Applications*. Elsevier Ltd., 2017.
- [27] C. P. Takeuchi and C. E. González, "Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad," *Ingeniería y Universidad*, vol. 11, no. 1, pp. 89–103, 2007.
- [28] H. F. Archila-Santos, M. P. Ansell, and P. Walker, "Elastic Properties of Thermo-Hydro-Mechanically Modified Bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) Measured in Tension," *Key Engineering Materials*, vol. 600, pp. 111–120, 2014.
- [29] K. Lázaro, H. Gonzáles, and A. J. Cardenas, "Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno Mechanical properties of the composite material made with bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) and polypropylene," *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 7, no. 38, pp. 95–110, 2016.
- [30] C. P. Takeuchi, M. Estrada, and D. L. Linero, "Determination of Shear Stress in Pull out Tests in Laminated Bamboo *Guadua angustifolia*," *Key Engineering Materials*, vol. 668, pp. 17–22, 2016.
- [31] B. Sharma, A. Gatóo, M. Bock, and M. Ramage, "Engineered bamboo for structural applications," *Construction and Building Materials*, vol. 81, pp. 66–73, 2015.
- [32] P. Luna, C. Takeuchi, and E. Cordón, "Mechanical Behavior of Glued Laminated Pressed Bamboo *Guadua* Using Different Adhesives and Environmental Conditions," *Key Engineering Materials*, vol. 600, pp. 57–68, 2014.
- [33] A. Kumar et al., "Engineered bamboo scrimber: Influence of density on the mechanical and water absorption properties," *Construction and Building Materials*, vol. 127, pp. 815–827, 2016.
- [34] I. Sumardi, K. Ono, and S. Suzuki, "Effect of board density and layer structure on the mechanical properties of bamboo oriented strandboard," *Journal of Wood Science*, vol. 53, no. 6, pp. 510–515, 2007.
- [35] N. Nugroho and N. Ando, "Development of structural composite products made from bamboo II: Fundamental properties of laminated bamboo lumber," *Journal of Wood Science*, vol. 47, no. 3, pp. 237–242, 2001.
- [36] C. P. Takeuchi, M. Estrada, and D. L. Linero, "The Elastic Modulus and Poisson's Ratio of Laminated Bamboo *Guadua angustifolia*," *Key Engineering Materials*, vol. 668, pp. 126–133, 2016.
- [37] N. van Drunen, A. Cangás, S. Rojas, and S. Kaminsky, "Reporte post-sismo sobre estructuras de bambú , y recomendaciones

- para la reconstrucción con bambú en la costa Ecuatoriana,” Quito, 2016.
- [38] S. A. Pardo, F. L. Baez, and N. T. Castellanos, “Connections between a column and its foundation for guadua angustifolia structures under lateral loads,” *Key Engineering Materials*, vol. 668, pp. 227–237, 2016.
- [39] A. Harison, A. Agrawal, A. Imam, and A. Harison, “Bamboo as an Alternative to Steel for Green Construction Towards Low Cost Housing,” *Journal of Environmental Nanotechnology*, vol. 6, no. 2, pp. 100–104, 2017.
- [40] P. O. Awoyera and A. Adesina, *Structural Integrity Assessment of Bamboo for Construction Purposes*. Elsevier Ltd., 2017.
- [41] S. Bhardwaj¹ and R. Kumar, “An Alternative to Steel: Bamboo-A review (New Advances),” *Journal of Engineering Computers & Applied Sciences(JECAS)* ISSN, vol. 3, no. 10, pp. 2319–5606, 2014.
- [42] D. M. Nguyen, A. C. Grillet, T. M. H. Diep, C. N. Ha Thuc, and M. Woloszyn, “Hygrothermal properties of bio-insulation building materials based on bamboo fibers and bio-glues,” *Construction and Building Materials*, vol. 155, pp. 852–866, 2017.
- [43] Y. Li, J. Yao, R. Li, Z. Zhang, and J. Zhang, “Thermal and energy performance of a steel-bamboo composite wall structure,” *Energy and Buildings*, vol. 156, pp. 225–237, 2017.
- [44] A. Gatóo, B. Sharma, M. Bock, H. Mulligan, and M. H. Ramage, “Sustainable structures: bamboo standards and building codes,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, vol. 167, no. 5, pp. 189–196, 2014.
- [45] E. Salas Delgado, “Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia. Capítulo 6. Simón Vélez, Símbolo y búsqueda de lo primitivo.” 2006, pp. 125–248.
- [46] S. K. Paudel and M. Lobovikov, “Bamboo housing: Market potential for low-income groups,” *Journal of Bamboo and Rattan*, vol. 2, no. 4, pp. 381–396, 2003.
- [47] H. Echezuría, “El Bambú como Recurso Sustentable para Construcción de Viviendas de Bajo Costo,” vol. 21, pp. 52–68, 2018.
- [48] G. E. González-Beltrán, “Plybamboo wall-panels for housing Structural Design,” 2003.
- [49] C. P. Takeuchi, “Design and Construction of Housing with Structural Elements of Bamboo (Guadua) Laminated,” *Key Engineering Materials*, vol. 517, pp. 179–183, 2012.
- [50] M. R. Lena, J. F. H. González, J. F. M. Hernández, and S. A. Jiménez, “El tablero de bambú prensado, una nueva propuesta tecnológica,” *Revista Ingenieria de Construcción*, vol. 23, no. 3, pp. 179–186, 2008.
- [51] E.-S. Chele, M.-C. Ricardo, P.-M. Ana, and M.-R. Teresa, “Bamboo, from Traditional Crafts to Contemporary Design and Architecture,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 51, pp. 777–781, 2012.