



UNIVERSITAT^{DE}
BARCELONA

Economía circular de la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK) como una alternativa de construcción sostenible

Bismark Osmany Torres Ruilova



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – SenseObraDerivada 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0. Spain License.**

Ingeniería y Ciencias Aplicadas

**Economía circular de la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK)
como una alternativa de construcción sostenible**

Autor

Bismark Osmany Torres Ruilova



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Memoria presentada en la Universitat de Barcelona de acuerdo con los requisitos para optar al grado de Doctor en el programa de Ingenierías y Ciencias Aplicadas

Director de Tesis

Dr. Mercè Segarra Rubí

Departamento de Ciencia de Materiales y Química Física,
Universitat de Barcelona

2024

AGRADECIMIENTOS



Me gusta comparar mi vida con la conducción en una carretera de dos carriles y dos direcciones, donde a veces es posible decidir el ritmo y la velocidad del viaje, mientras que otras veces las circunstancias del tráfico y del camino imponen cambios necesarios. En este tramo de la carretera que me ha llevado a la recta final de mi tesis doctoral, he tenido que superar diversos obstáculos, incluido un gran semáforo en rojo: la pandemia de COVID-19, y varios "camiones de tráfico pesado". Sin la ayuda de todos ustedes, no habría sido posible llegar a este punto del viaje. Por eso, deseo empezar dando las gracias:

A mis padres, Lola y Darío (+), por siempre apoyarme y haberme encaminado hacia la ruta de la investigación.

A mi esposa, Ivetheyamel, por ser mi copiloto; a mis hijos, Camila y Santiago, quienes son el combustible que me impulsa a seguir adelante.

A la Dra. Mercè Segarra, la Dra. Mónica Martínez, y el Dr. J.A. Padilla, por confiar en mí, guiarme, y dirigir este tránsito que me ha permitido avanzar hacia la meta.

A cada uno de los integrantes de la Comisión de Seguimiento y del grupo DIOPMA, especialmente a Quim, que siempre estuvieron dispuestos a colaborar y ayudar.

A mis hermanos, especialmente a Ramiro, Irina, a mis primas Johana, Karen, a mi suegra Julia, a mi cuñado Nicolas, mis amigos Oswaldo, Andreina y a todos aquellos que encontré en la ruta y estuvieron atentos y prestos a colaborar, compartir y acompañarme en este viaje.

Hemos llegado y hay buen clima.

Gracias de corazón

RESUMEN



La presente tesis doctoral se centra en el aprovechamiento sostenible de la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK), una especie de bambú predominante en las regiones tropicales y subtropicales, especialmente en América Latina. Esta investigación se desarrolla bajo un marco de economía circular y propone la utilización de la GaK como una alternativa ecológica y viable para la construcción. El estudio persigue tres objetivos principales: el desarrollo de tratamientos para mejorar la durabilidad de la GaK, la evaluación de su sostenibilidad mediante el análisis de ciclo de vida (ACV) y la innovación en la creación de materiales compuestos a partir de sus residuos.

En primer lugar, se analizan tratamientos térmicos y termoquímicos, incluyendo la ebullición a presión atmosférica y la aplicación de soluciones de bórax y ácido bórico. Estos tratamientos están diseñados para mejorar la durabilidad del bambú, manteniendo al mismo tiempo sus propiedades mecánicas esenciales e incrementando su resistencia a condiciones adversas, como la exposición al fuego. El propósito de estos tratamientos es alterar la composición química y estructural del bambú de manera que se optimicen su durabilidad y funcionalidad para aplicaciones en el sector de la construcción.

El segundo objetivo se centra en realizar un ACV detallado de los tableros de bambú producidos en Santa Elena, Ecuador. Este análisis puerta a puerta no solo identifica los impactos ambientales significativos asociados con la producción de bambú, sino que también propone mejoras basadas en los hallazgos. Se consideran dos escenarios de: uno que representa el proceso actual y otro que incluye mejoras en la gestión de residuos y recursos, destacando una reducción significativa de los impactos ambientales en el escenario optimizado.

En cuanto al tercer objetivo, se investiga la viabilidad de desarrollar materiales compuestos integrando fibras de bambú en matrices poliméricas. Este enfoque no solo busca valorizar los residuos de bambú, sino también evaluar las propiedades mecánicas y térmicas de los compuestos desarrollados para su posible aplicación en construcción.

La metodología empleada incluye avanzadas técnicas de caracterización química, morfológica, térmica y mecánica para analizar las modificaciones en las propiedades de

la guadua y los materiales compuestos resultantes. Este enfoque integral permite una evaluación detallada de los tratamientos y procesos propuestos, asegurando que las soluciones sean prácticas y científicamente validadas.

Se espera que los resultados de esta investigación proporcionen nuevas perspectivas sobre la optimización del uso del bambú, mejorando su aplicación en la construcción y otros campos, y promoviendo prácticas de desarrollo sostenible. Al abordar tanto las limitaciones actuales como las potencialidades de la guadua, este trabajo contribuye al avance de conocimientos en el área de materiales sostenibles y ofrece soluciones prácticas que pueden beneficiar tanto a la comunidad científica como a la industria local y global del bambú.

En síntesis, esta tesis representa un esfuerzo por mejorar la comprensión y utilización de GaK en aplicaciones sostenibles, apoyando su adopción en prácticas de construcción innovadoras y ecológicas que alinean las necesidades industriales con los imperativos ambientales, especialmente en comunidades en vías de desarrollo.

SUMMARY



This doctoral thesis focuses on the sustainable use of *Guadua angustifolia* Kunth (GaK), a bamboo species prevalent in tropical and subtropical regions, particularly in Latin America. The research is conducted within a circular economy framework and proposes the use of GaK as a viable ecological alternative for construction. The study pursues three main objectives: the development of treatments to improve the durability of GaK, the assessment of its sustainability through life cycle analysis (LCA) and innovation in the creation of composite materials from its residues.

Firstly, thermal, and thermochemical treatments are analyzed, including atmospheric pressure boiling and the application of borax and boric acid solutions. These treatments are designed to enhance the bamboo's durability while maintaining its essential mechanical properties and increasing its resistance to adverse conditions, such as fire exposure. The purpose of these treatments is to alter the chemical and structural composition of the bamboo to optimize its durability and functionality for construction applications.

The second objective focuses on conducting a detailed LCA of bamboo boards produced in Santa Elena, Ecuador. This door-to-door analysis not only identifies the significant environmental impacts associated with bamboo production but also proposes improvements based on the findings. Two production scenarios are considered: one representing the current process and another that includes improvements in waste and resource management, highlighting a significant reduction of environmental impacts in the optimized scenario.

Regarding the third objective, the feasibility of developing composite materials by integrating bamboo fibers into polymeric matrices is investigated. This approach aims not only to valorize bamboo residues but also to evaluate the mechanical and thermal properties of the developed composites for potential construction applications.

The methodology used includes advanced chemical, morphological, thermal, and mechanical characterization techniques to analyze the modifications in the properties of guadua and the resulting composite materials. This comprehensive approach allows for

a detailed evaluation of the proposed treatments and processes, ensuring that the solutions are practical and scientifically validated.

The results of this research are expected to provide new insights into the optimization of bamboo use, enhancing its application in construction and other fields, and promoting sustainable development practices. By addressing both the current limitations and the potentialities of guadua, this work contributes to the advancement of knowledge in the area of sustainable materials and offers practical solutions that can benefit both the scientific community and the local and global bamboo industry.

In summary, this thesis represents an effort to improve the understanding and use of GaK in sustainable applications, supporting its adoption in innovative and ecological construction practices that align industrial needs with environmental imperatives, particularly in developing communities.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	XIII
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS	XIX
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	XXVII
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Potencial del bambú en Ecuador: Enfoque en la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth (GaK).....	9
1.2.1 Distribución geográfica.....	9
1.2.2 Hábitat y Anatomía.....	11
1.2.3 Propiedades físicas y mecánicas.	18
1.2.4 Sostenibilidad.....	20
1.2.5 Impacto cultural y económico.....	22
1.3 Retos asociados a la GaK.	22
1.3.1 Métodos tradicionales.....	23
1.3.2 Tratamientos químicos (TQ)	23
1.3.3 Tratamientos térmicos (TT)	25
1.3.4 Análisis del ciclo de vida (ACV) en productos del bambú	32
1.3.5 Aprovechamiento de residuos del bambú: Enfoque en materiales compuestos.	33
1.4 Bibliografía	34
2 OBJETIVOS	47
2.1 Objetivo general.....	47
2.2 Objetivos específicos.....	47
3 METODOLOGÍA	51
3.1 Introducción	51
3.2 Materiales	51
3.2.1 Láminas de GaK.....	51
3.2.2 Aserrín de GaK	52
3.2.3 Polímero.....	52
3.3 Experimentos	53
3.3.1 Tratamientos de láminas de GaK.....	53
3.3.2 Compuestos con fibras de bambú en una matriz polimérica	56

3.4 Técnicas experimentales de caracterización	58
3.4.1 Técnicas de caracterización química	58
3.4.2 Técnicas de caracterización morfológica	61
3.4.3 Técnicas de caracterización Térmica	61
3.4.4 Técnicas de caracterización mecánica	64
3.4.5 Técnica de análisis biológico	68
3.5 Análisis de ciclo de vida (ACV)	69
3.6 Bibliografía	70
 4 TRATAMIENTO DE LÁMINAS DE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA</i> KUNTH (GAK)	 75
4.1 Introducción	75
4.2 Tipos de tratamientos	76
4.3 Caracterización química	76
4.3.1 Determinación de azúcares reductores	76
4.3.2 Resonancia magnética nuclear de carbono-13 (RMN ¹³ C)	79
4.3.3 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)	85
4.4 Caracterización morfológica	89
4.4.1 Descripción general de la microestructura de la GaK.....	89
4.4.2 Efectos de los Tratamientos Térmicos y Térmico-Químico.....	89
4.5 Caracterización Mecánica.....	92
4.5.1 Análisis de flexión	92
4.6 Caracterización térmica.....	96
4.6.1 Determinación del índice de oxígeno limitante (LOI)	96
4.6.2 Prueba de epirradiador.	97
4.7 Análisis biológico.....	99
4.8 Conclusiones	101
4.9 Bibliografía	101
 5 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV) DE TABLEROS LAMINADOS DE GAK	 107
5.1 Introducción	107
5.2 Descripción del proceso	107
5.3 Escenarios.....	108
5.4 Análisis del ciclo de vida	109

5.4.1 Potencial de calentamiento global (PCG 100 años), considerando y excluyendo el carbono biogénico	110
5.4.2 Potencial de ecotoxicidad acuática en agua dulce (PEAAD)	112
5.4.3 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (PET)	113
5.4.4 Potencial de creación de ozono fotoquímico (PCOF)	114
5.4.5 Energía (Valor calorífico de la red)	116
5.5 Conclusiones	117
5.6 Bibliografía	117
6 APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DEL BAMBÚ: ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS	121
6.1 Introducción	121
6.2 Integración de las fibras de GaK en una matriz de etileno-1-buteno	121
6.3 Caracterización térmica	122
6.3.1 Análisis termogravimétrico (TGA)	122
6.3.2 Análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC)	125
6.3.3 Análisis de epirradiador.	128
6.3.4 Determinación del índice de oxígeno limitante, LOI	129
6.3.5 Conductividad térmica.	130
6.4 Caracterización mecánica.....	131
6.4.1 Ensayo de flexión	132
6.4.2 Ensayo de tracción.....	136
6.5 Conclusiones	137
6.6 Bibliografía	138
7 CONCLUSIONES GENERALES.....	143
8 RECOMENDACIONES	147
A1 CONTRIBUCIONES EN CONGRESOS Y PUBLICACIONES CIENTÍFICAS	153
A1.1 Mejora de las prestaciones mecánicas y frente al fuego de laminas de bambú mediante la optimización del proceso de cocción	153
A1.2 El bambú como alternativa de construcción sostenible	154

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Lista de Figuras

Capítulo 1.

Figura 1.1 Porcentaje del consumo total de energía final de los edificios en 2021 [1].	3
Figura 1.2 Porcentaje del proceso de emisiones globales de energía en edificios 2021 [1].	4
Figura 1.3 Representación de la distribución de bambú a nivel mundial [12].	6
Figura 1.4 Aplicaciones de bambú: a) Vivienda, b) Restaurante, c) Andamio, d) Cama [32]–[35].	7
Figura 1.5 Vivienda de bambú, Pedernales, Ecuador [48].	8
Figura 1.6 Disponibilidad del bambú [50].	9
Figura 1.7 Distribución y potencial agroecológico del bambú en Ecuador [50].	10
Figura 1.8 Plantación natural de GaK en Dos Mangas, Ecuador.	11
Figura 1.9 Rizoma de GaK [51].	12
Figura 1.10 Hoja caulinar.	13
Figura 1.11 Culmos de GaK.	14
Figura 1.12 Microestructura de la GaK: (a) Corteza y distribución de los haces vasculares en la pared del bambú. Morfología de los haces vasculares: (b) sección exterior; (c) sección media; (d)sección interior de la pared del bambú. Partes del haz vascular: metaxilema 1, floema 2, protoxilema 3, haces de fibras 4 y parénquima 5; (e) haz de fibras de bambú; (f) lumen en fibras de bambú [54].	16
Figura 1.13 Microestructura del culmo de bambú: a) sección transversal del culmo de bambú; b) sección transversal de la fibra y la célula de parénquima en el bambú; c) sección radial del bambú [55].	17
Figura 1.14 Relación entre la tensión y la densidad para diferentes materiales de construcción.	20
Figura 1.15 Imágenes SEM de muestras de bambú a) No tratadas. Tratadas hidrotermalmente durante 2 h b) 140 °C y c) 160 °C [101]	30
Capítulo 3.	
Figura 3.1 Proceso de acondicionamiento de láminas de bambú desde la plantación hasta obtener las láminas.	52

Figura 3.2 Probetas de láminas de bambú antes del tratamiento térmico.	54
Figura 3.3 Tratamiento térmico de láminas de bambú a) Ubicación de probetas en rejilla plástica. b) peso sobre rejilla para mantener la inmersión. c) recipiente tapado. d) secado de probetas.	55
Figura 3.4 Mezcladora de palas.	57
Figura 3.5 Detalle de la cuba operando.	57
Figura 3.6 Prensa de platos calientes.	58
Figura 3.7 Ensayo de LOI de una lámina de GaK sometida al tratamiento TTQ60.	64
Figura 3.8 Máquina de ensayos universales Zwick/Roell.	65
Figura 3.9 Probetas de láminas de GaK para ensayos de flexión.	66
Figura 3.10 Probetas para ensayos de tracción.	68
Capítulo 4.	
Figura 4.1 Método Fehling A-B concentración de Xilosa.	77
Figura 4.2 Curva de calibración de Xilosa.	77
Figura 4.3 Extracción de AR por gramo de bambú y su relación con el tiempo de tratamiento térmico.	78
Figura 4.4 Espectros de RMN de ¹³ C para diversos tratamientos térmicos y químicos en láminas de Guadua angustifolia: análisis comparativo y asignación espectral de carbonos.	80
Figura 4.5 Máximas intensidades relativas de los picos para los desplazamientos químicos singulares de los espectros de RMN ¹³ C en los tratamientos TT30, TT60, TT90, TT120 y TTQ60.	84
Figura 4.6 Comparativa de espectros FT-IR entre GaK, celulosa, hemicelulosa y lignina organosolv.	85
Figura 4.7 Comparativa de espectros FT-IR entre GaK tratada y no tratada.	86
Figura 4.8 Imágenes de microscopía electrónica a) Estructura microscópica del grupo de control en GaK: haces vasculares y parénquima; b) Detalle del haz vascular: fibras (1), metaxilema (2), floema (3), protoxilema (4) y parénquima (5).	89
Figura 4.9 Análisis transversal del haz vascular para los diferentes tratamientos a) GC, b) TT30, c) TT60, d) TT90, e) TT120 y f) TTQ60.	90
Figura 4.10 Comparación del tejido parenquimático y almidón de láminas de GaK tratadas y no tratadas a) GC, b) TT30, c) TT60, d) TT90, e) TT120 y f) TTQ60.	91

Figura 4.11 Comparación de grietas entre los tratamientos 1 (GC), 2 (TT120) y 3 (TTQ60).	91
Figura 4.12 Variaciones del módulo de elasticidad entre tratamientos.	93
Figura 4.13 Comparación de la resistencia a la flexión entre tratamientos.	93
Figura 4.14 Relación entre densidad y módulo de elasticidad en láminas de GaK antes y después de tratamientos térmicos y químicos.	95
Figura 4.15 Impacto de tratamientos térmicos y químicos en el LOI de láminas de GaK.	96
Figura 4.16 Probetas a) antes y b) después de la prueba de epiirradiador.	97
Figura 4.17 Comparación del crecimiento bacteriano en aguas de cocción de bambú tratadas (TT60 y TTQ60) cultivadas en Columbia agar con 5% de sangre de oveja a lo largo de una semana.	100

Capítulo 5.

Figura 5.1 Flujo del proceso de elaboración de tableros de GaK.	108
Figura 5.2 Potencial de calentamiento global (PCG 100 años), considerando y excluyendo el carbono biogénico.	111
Figura 5.3 Potencial de ecotoxicidad acuática en agua dulce (PEAAD).	113
Figura 5.4 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (PET).	114
Figura 5.5 Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (PCOF).	115
Figura 5.6 Energía (Valor calorífico de la red).	116

Capítulo 6.

Figura 6.1 Láminas de polímero y fibras de GaK a) 30% GaK, M30, b) 40% GaK, M40 y c) 50% GaK, M50.	122
Figura 6.2 Análisis termogravimétrico de copolímero de EB, GaK y las mezclas M30, M40 y M50.	123
Figura 6.3 Derivada de la pérdida de masa de EB, GaK y las mezclas M30, M40 y M50.	123
Figura 6.4 Curvas DSC correspondientes a la etapa de fusión del copolímero de EB y mezclas con fibras de GaK.	126
Figura 6.5 Curvas DSC correspondientes a la etapa de cristalización del copolímero de etileno-buteno y de las mezclas con fibras de bambú.	127

Figura 6.6 Representación del índice de oxígeno limitante (LOI) de las materias primas y las mezclas.....	129
Figura 6.7 Conductividad térmica del EB y las mezclas M30, M40 y M50.	131
Figura 6.8 Valor de E respecto a la proporción en peso (p/p) de fibras.	133
Figura 6.9 Módulo de elasticidad versus densidad.....	134
Figura 6.10 Comparación de los valores teóricos y experimentales del E y δ en compuestos de EB reforzados con fibras de GaK.....	135

Lista de Tablas

Capítulo 1.

Tabla 1.1 Superficie de bambú, por regiones, 2020 [11].	5
Tabla 1.2 Dimensiones del diámetro, espesor del culmo y distancia del entrenudo de GaK de 4 años [53].	15
Tabla 1.3 Porcentajes de tejido en el culmo de GaK de 4 años [53].	15
Tabla 1.4 Composición química del bambú GaK.	18
Tabla 1.5 Propiedades físicas y mecánicas de la GaK.	19
Tabla 1.6 BGB y AGB para grupos (5 x 5 m) de GaK [70].	21

Capítulo 3.

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del copolímero EB de DEX Plastomers [1].	53
Tabla 3.2 Tratamientos estudiados	54
Tabla 3.3 Porcentajes en peso de las materias primas para las mezclas propuestas.	56
Tabla 3.4 Condiciones de operación de la mezcladora.	57
Tabla 3.5 Especificaciones y condiciones de ensayo para materiales compuestos y láminas de GaK.	65

Capítulo 4.

Tabla 4.1 Descripción de los tratamientos llevados a cabo en el estudio de la optimización de la extracción de azúcares del bambú.	76
Tabla 4.2 Cuantificación de AR en equivalentes de Xilosa calculados a partir de la curva de calibración.	77
Tabla 4.3 Asignación de tipos de carbono según los desplazamientos químicos en espectros de RMN ¹³ C para los diversos tratamientos del bambú [1]-[7].	83
Tabla 4.4 Máximas intensidades relativas de resonancia en diversos intervalos de desplazamiento químico para muestras de agua de cocción de GaK, según espectros de RMN de ¹³ C.	84
Tabla 4.5 Asignación de grupos funcionales a GaK en espectros FT-IR.	88

Tabla 4.6 Resumen de Propiedades Mecánicas de Láminas de Bambú respecto al ensayo de flexión de tres puntos.	94
---	----

Tabla 4.7 Efectos de tratamientos térmicos y químicos sobre la inflamabilidad y estabilidad térmica de láminas de bambú en pruebas de epirradiador.	98
--	----

Capítulo 5.

Tabla 5.1 Resumen de las actividades de los procesos.	107
--	-----

Tabla 5.2 Especificaciones del tablero de GaK.	108
---	-----

Tabla 5.3 Descripción de los escenarios de estudio.	109
--	-----

Tabla 5.4 Aproximaciones de los procesos.	109
--	-----

Tabla 5.5 Flujos de masa y energía del escenario E01.	110
--	-----

Capítulo 6.

Tabla 6.1 Nomenclatura de las materias primas y las mezclas realizadas.	121
--	-----

Tabla 6.2 Detalles de las etapas de descomposición térmica para EB y sus mezclas con fibras de GaK.	124
--	-----

Tabla 6.3 Temperaturas de fusión t_f y recristalización t_c así como las entalpías de fusión ΔH_f y cristalización ΔH_c para EB y sus mezclas con fibras de GaK.	126
---	-----

Tabla 6.4 Inflamabilidad y estabilidad térmica de láminas de EB, GaK, y mezclas del copolímero con fibras de GaK sometidas a pruebas de epirradiador.	128
--	-----

Tabla 6.5 Modulo de elasticidad (E) y densidad (δ) correspondientes al ensayo de flexión. ...	132
--	-----

Tabla 6.6 Valores promedios y desviación estándar (DE) de la tensión máxima y la elongación de rotura del polímero EB y sus mezclas con fibras de GaK en pruebas de tracción.	136
--	-----

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Abreviaturas

A

ACV - análisis de ciclo de vida

AGB – Biomasa sobre suelo (*Aboveground Biomass*)

AR – Azúcar reductor

B

BGB – Biomasa bajo suelo (*Belowground Biomass*)

C

CCA - Arseniato de cobre cromatado

CCB - Borato de cobre cromatado

CFCs - Clorofluorocarbonos

COV - Compuestos orgánicos volátiles

D

DCB - Diclorobenceno

DE - Desviación estándar

DOT - Octaborato disódico tetrahidratado

DSC - Calorimetría diferencial de barrido (*Differential Scanning Calorimetry*)

DTGA - Análisis Termogravimétrico Derivativo (*Derivative Thermogravimetric Analysis*)

E

EB - Etileno-1-buteno

F

FRA - Evaluación de los recursos forestales Mundiales (*Forest Resources Assessment*)

FT-IR - Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (*Fourier-transform infrared spectroscopy*)

G

GaK - *Guadua angustifolia* Kunth

GC - Grupo de control

GEI - Gases de efecto invernadero

I

INBAR - Red Internacional para Bambú y Ratán

IPCC - Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)

L

LOI - Índice de oxígeno limitante (*Limiting Oxygen Index*)

M

MFI - Índice de fluidez (*Melt Flow Index*)

O

ODS – Objetivos de desarrollo sostenible

P

PCG - Potencial de calentamiento global

PCOF - Potencial de creación de ozono fotoquímica

PEAAD - Potencial de ecotoxicidad acuática en agua dulce

PET - Potencial de ecotoxicidad terrestre

PIB - Producto interior bruto

PLA – Ácido poliláctico (*Polylactic Acid*)

PM – Pérdida de masa

R

RMN ¹³C - Resonancia magnética nuclear de carbono-13

S

SEM - Microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscopy*)

T

TGA - Análisis termogravimétrico

TSP - Tetrametilsilano

TT - Tratamiento térmico

TTQ - Tratamiento térmico químico

W

WSAAX – Biblioteca Sigma-Aldrich de Espectros ATR-IR – Wiley (*ATR-IR - Sigma-Aldrich Library of ATR-IR Spectra – Wiley*)

Símbolos

C

cm/día - Centímetro día (tasa de crecimiento de la GaK)

culm/ha – Culmo por hectárea

°C - Grado Celsius

°C/min – Grados Celsius por minuto

E

E - Módulo de elasticidad o Módulo de Young

G

GPa – Gigapascales

Gt - Gigatonelada métrica

H

h – Horas

Hz - Hercios

J

J/g – Julios por gramo

L

l/m²- Litros por metro cuadrado

K

kg – Kilogramo

kg CO₂-eq – Kilogramos de CO₂ equivalente

kg DCB-eq – Kilogramos de diclorobenceno equivalente

kg eteno-eq - Kilogramos de eteno equivalente

kg/clump – Kilogramos por grupo (*kilograms per clump*)

kg/m³ – Kilogramos por metro cúbico

kWh – Kilovatios-hora

M

Mha - Millones de hectáreas

MHz - Megahercios

MJ - Megajulios

MPa - Megapascales

m – Metro

m³ - Metro cúbico

mg/g bambú – Miligramo por gramo de bambú

mg/ml – Miligramo por mililitro

min - Minuto

mm - Milímetro

mm/min - Milímetros por minuto

msnm - Metros sobre el nivel del mar

N

N – Número de igniciones

P

p/p - % peso/peso

ppm – partes por millón

S

s - Segundos

T

t - Tonelada métrica

t_c - Temperatura de recristalización

t_f - Temperatura de fusión

t_m - Duración de la ignición

t_0 - Tiempo hasta la primera ignición

W

W/mK - Vatios por metro por kelvin

-

δ - Densidad

σ_f - Resistencia a la flexión

σ_{tmax} - Resistencia a la tensión máxima

ΔH_f - Entalpía de fusión

ΔH_c - Entalpía de cristalización



Capítulo 1.

Introducción

- Antecedentes
- Potencial del bambú en Ecuador:
Enfoque en la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK)
- Retos asociados a la GaK
- Bibliografía

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La interconexión de las crisis en los ámbitos económico, energético, de seguridad y climático subraya la urgencia de avanzar hacia la descarbonización y el fortalecimiento de la resiliencia en el ámbito de la construcción a nivel mundial. Se proyecta que el consumo global de materias primas se duplicará para 2060 [1], con un tercio de este aumento debido al sector de la construcción, que ya en 2021 representaba el 34% de la demanda de energía a nivel mundial. De este porcentaje el 21% corresponde al sector residencial, el 9% al no-residencial y el 4% a la industria de hormigón, aluminio y acero para la edificación (Figura 1.1).

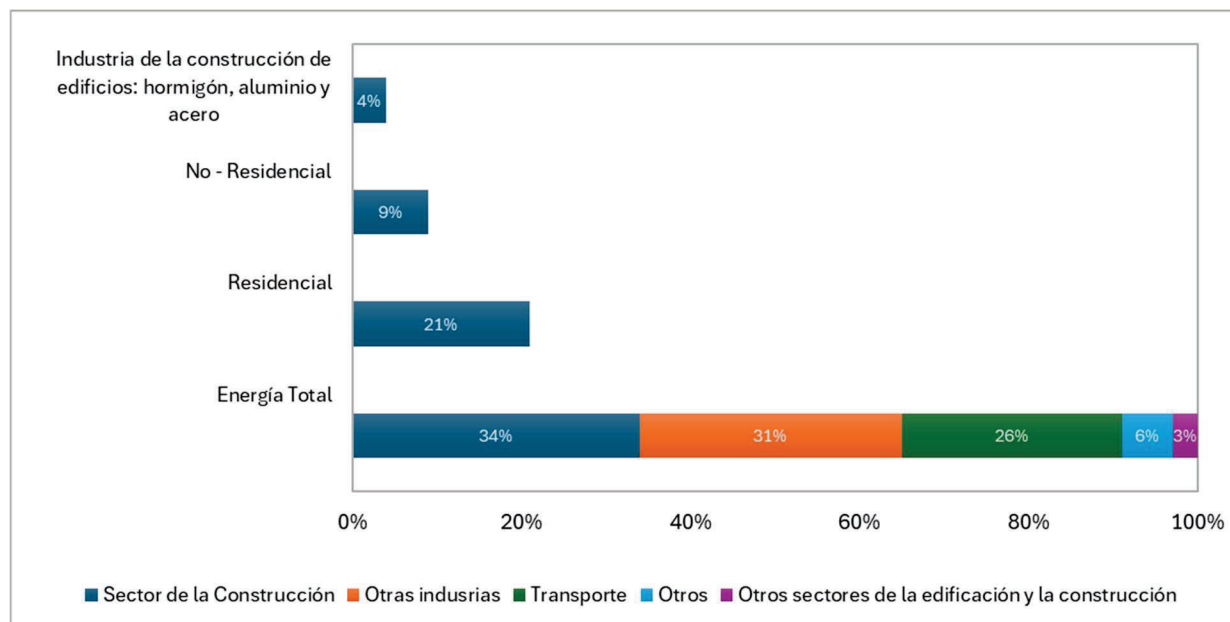


Figura 1.1 Porcentaje del consumo total de energía final de los edificios en 2021 [1].

Además, se estima que el sector de la construcción fue responsable del 37% de las emisiones globales de CO₂ relacionadas con el consumo de energía en ese mismo año, derivadas tanto de las operaciones de los edificios como de la fabricación de materiales utilizados en la construcción. De este porcentaje, el 17 se atribuye al sector residencial, el 11% al sector no residencial y el 9% a la utilización de materiales específicos como el hormigón, acero, aluminio, vidrio y ladrillos (Figura 1.2).

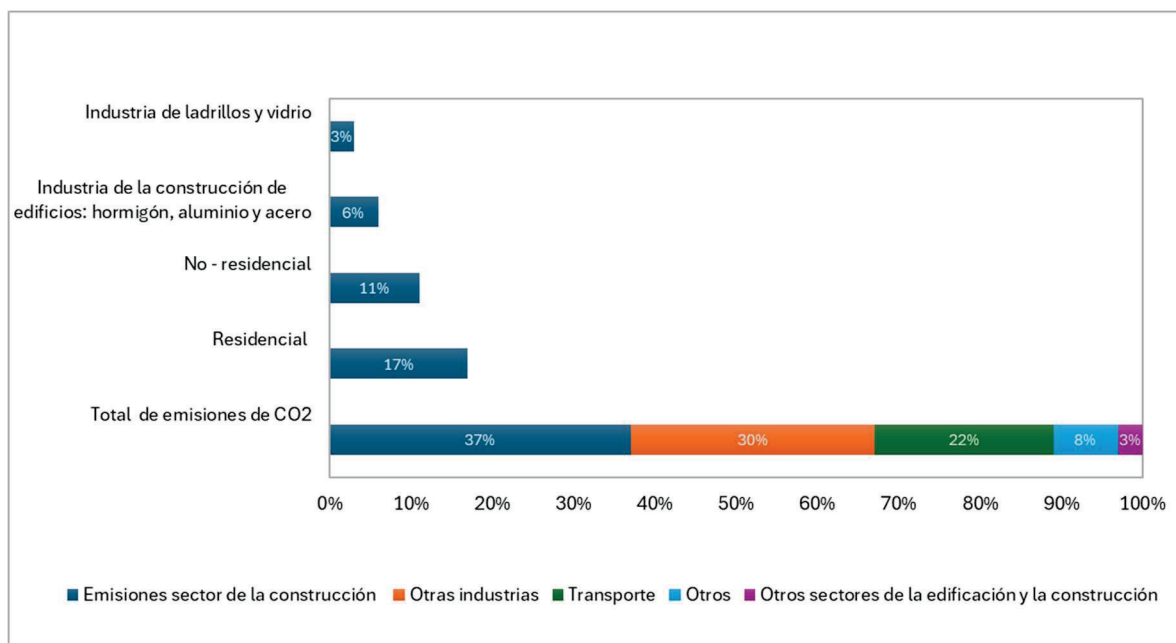


Figura 1.2 Porcentaje del proceso de emisiones globales de energía en edificios 2021 [1].

El crecimiento de los materiales de construcción ha sido notable, con el sector del hormigón y cemento expandiéndose diez veces desde hace 65 años, y el acero triplicándose. Los mercados de materiales de construcción en economías emergentes verán un aumento significativo, esperándose que sus emisiones crezcan entre 3,5 y 4,6 Gt de CO₂ anualmente para 2060 [1]. Sin un cambio hacia normas de materiales de baja emisión de carbono, diseño y construcción sostenibles, y eficiencia energética, el sector se arriesga a un bloqueo en un modelo de desarrollo de alta emisión de carbono [2]. Abarcar valores ambientales, económicos y sociales en el desarrollo del entorno construido es apremiante [3].

Las prácticas tradicionales de construcción, a menudo centradas en el uso intensivo de recursos no renovables y la generación de desechos, están siendo reevaluadas y cuestionadas. En las últimas décadas, la sociedad ha reconocido cada vez más la importancia de adoptar modelos de desarrollo sostenible principalmente debido a los crecientes desafíos ambientales y la necesidad de preservar recursos naturales para las futuras generaciones [4][5]. Las tendencias predominantes en investigación sobre construcción sostenible, en orden de relevancia [6], son: materiales alternativos, gestión sostenible, reciclaje, y sostenibilidad social.

La aplicación de modelos como la economía circular en el sector de la construcción se posiciona como una estrategia prometedora. Este enfoque se centra en la optimización del ciclo de vida de los recursos, destacando la importancia de reducir, reutilizar y reciclar materiales para minimizar el consumo de recursos y energía [7][8].

La implementación de la economía circular en la construcción, particularmente en edificaciones, se fundamenta en un enfoque de ciclo de vida que busca maximizar la durabilidad de las estructuras, integrar la planificación del fin de vida desde la etapa de diseño, y adoptar modelos de propiedad que promuevan la preservación y reutilización de materiales, transformando los edificios en bancos de materiales [9].

En este contexto, el bambú emerge como una alternativa viable en la construcción sostenible. Esta planta, reconocida por su versatilidad y abundancia, ha sido históricamente un recurso vital para la sustentabilidad y el desarrollo de diversas comunidades. Con más de 1600 especies distribuidas en climas tropicales, subtropicales y templados, su presencia a nivel global es significativa [10].

De acuerdo con la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales (*Forest Resources Assessment*, FRA) de 2020 [11], el bambú ocupa aproximadamente 35 Mha en América, África y Asia. En América Latina, donde se estima que abarca 5.5 Mha, se encuentran alrededor de 20 géneros y 440 especies de bambúes leñosos, desde México hasta Chile [10]. La distribución mundial del bambú por región, expresada en Mha y porcentajes, se detalla en la Tabla 1.1, mientras que la Figura 1.3 ofrece una representación visual de esta distribución a nivel global.

Tabla 1.1 Superficie de bambú, por regiones, 2020 [11].

Región	Área de bambú (Mha)	Porcentaje (%)
América	5,5	16
África	4,6	13
Asia	24,9	71
Resto del planeta	35,0	100



Figura 1.3 Representación de la distribución de bambú a nivel mundial [12].

Además, se han documentado más de 100 usos del bambú, destacándolo como una fuente invaluable de alimento, materia prima renovable y energía regenerativa [13]. Su utilidad abarca múltiples sectores, desde la construcción hasta su papel en la industria alimentaria, la celulosa, textil, química, y la medicina herbal, entre otras [14]–[16].

En el campo de la construcción el bambú destaca notablemente [17]–[19]. Sus culmos, con propiedades tecnológicas excepcionales, son utilizados para erigir viviendas simples, así como también para estructuras urbanas más complejas de varios pisos [20][21]. La facilidad de procesamiento del bambú a nivel artesanal, con una inversión de capital relativamente baja, lo hace accesible para comunidades de recursos limitados. Además, su uso en andamios, muebles y productos artesanales demuestra su versatilidad y durabilidad en diversas aplicaciones [13]. La Figura 1.4 ilustra el uso del bambú en diversas aplicaciones.

El bambú, como una alternativa de construcción sostenible, presenta una serie de ventajas, debido a su rápido crecimiento y propagación, alta capacidad para secuestrar carbono, adaptabilidad para crecer en terrenos no aptos para otros cultivos, excelentes propiedades físicas y mecánicas, versatilidad, disponibilidad, y biomasa residual [17], [22]–[25]. Dependiendo de su situación y aplicabilidad puede remplazar materiales convencionales como el hormigón, la madera o el acero en diversas aplicaciones, incluidas paredes, techos, pisos y andamios [26]–[29]. Es considerado como un material sísmo resistente debido a su ligereza (alta resistencia con relación a su peso) y ductilidad (capacidad para absorber energía) [30][31].



Figura 1.4 Aplicaciones de bambú: a) Vivienda, b) Restaurante, c) Andamio, d) Cama [32]–[35].

En términos de beneficios económicos y ecosistémicos, los bosques y plantaciones de bambú desempeñan un papel crucial en la generación de medios de vida y servicios ambientales. Han sido una fuente de sustento para poblaciones rurales durante siglos y continúan siendo un motor económico en muchos países [13][36]. A medida que la tecnología avanza, surgen nuevas aplicaciones y productos derivados del bambú, lo que amplía aún más su utilidad y potencial económico. El bambú está ganando relevancia como una alternativa sostenible a materiales convencionales como plásticos, acero y cemento [29][37]–[41]. Su rápido crecimiento y capacidad de regeneración lo convierten en una fuente prometedora de biomasa para biocombustibles y una variedad de productos químicos [42]–[45]. Este enfoque en la sostenibilidad y la innovación está impulsando aún más la demanda y el uso del bambú en diversas industrias [36].

La inclusión del bambú en prácticas de construcción sostenible no solo promueve la conservación de recursos naturales, sino que también puede contribuir significativamente al Producto Interno Bruto (PIB) global y al cumplimiento de los objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 [46].

A nivel mundial, más de mil millones de personas habitan en viviendas de bambú o lo utilizan como componente estructural, de revestimiento o para techos primarios [10]. En muchas regiones en desarrollo, se enfrenta un déficit de viviendas dignas, de bajo costo, construcción rápida y fácil, que puedan resistir tensiones derivadas de vientos y/o terremotos [27][37]. Ecuador, un país con alta actividad sísmica, registró un déficit de vivienda del 57% a finales de 2020 [47]. La Figura 1.5 presenta un ejemplo representativo de viviendas de interés social construidas con bambú en Ecuador.



Figura 1.5 Vivienda de bambú, Pedernales, Ecuador [48].

Sin embargo, a pesar de las ventajas, el bambú presenta desafíos, como su susceptibilidad al fuego, la humedad y el ataque de insectos, lo que requiere tratamiento para preservar sus propiedades mecánicas [28]. Además, en algunas regiones, como Ecuador, el bambú se percibe como un material de bajo valor y se relaciona con la pobreza [10][30][49].

Superar estos desafíos demanda investigación continua para optimizar su uso y cambiar percepciones arraigadas. El bambú ha demostrado ser una herramienta esencial tanto para la vida humana como para el medio ambiente, y emerge como un recurso valioso

con el potencial de impulsar un futuro más sostenible y próspero para las generaciones venideras.

1.2 Potencial del bambú en Ecuador: Enfoque en la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK)

1.2.1 Distribución geográfica

En Ecuador, hay alrededor de 0,6 Mha de bambú, con un potencial de desarrollo de hasta 3,4 Mha. Se han identificado 46 especies, de las cuales 11 son endémicas de los géneros *Arthrostylidium*, *Aulonemia*, *Chusquea*, *Guadua* y *Rhipidocladum*, mientras que las demás son especies introducidas, especialmente de Asia. A pesar de esta abundancia, solo se aprovecha el 2,5% de la disponibilidad de bambú. En términos de contribución económica, en 2017, el bambú representó el 0,5% del PIB total del país [50]. La Figura 1.6 muestra los porcentajes de utilización y subutilización del bambú, mientras que la Figura 1.7 presenta el mapa de las principales zonas con presencia de bambú, junto con las áreas de potencial agroecológico de esta planta.

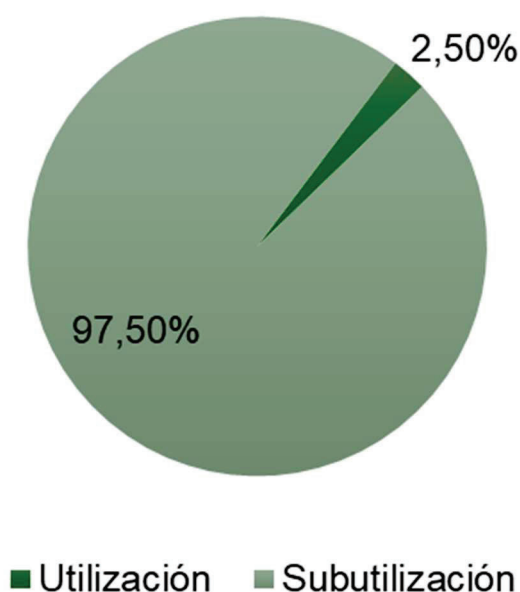


Figura 1.6 Disponibilidad del bambú [50].

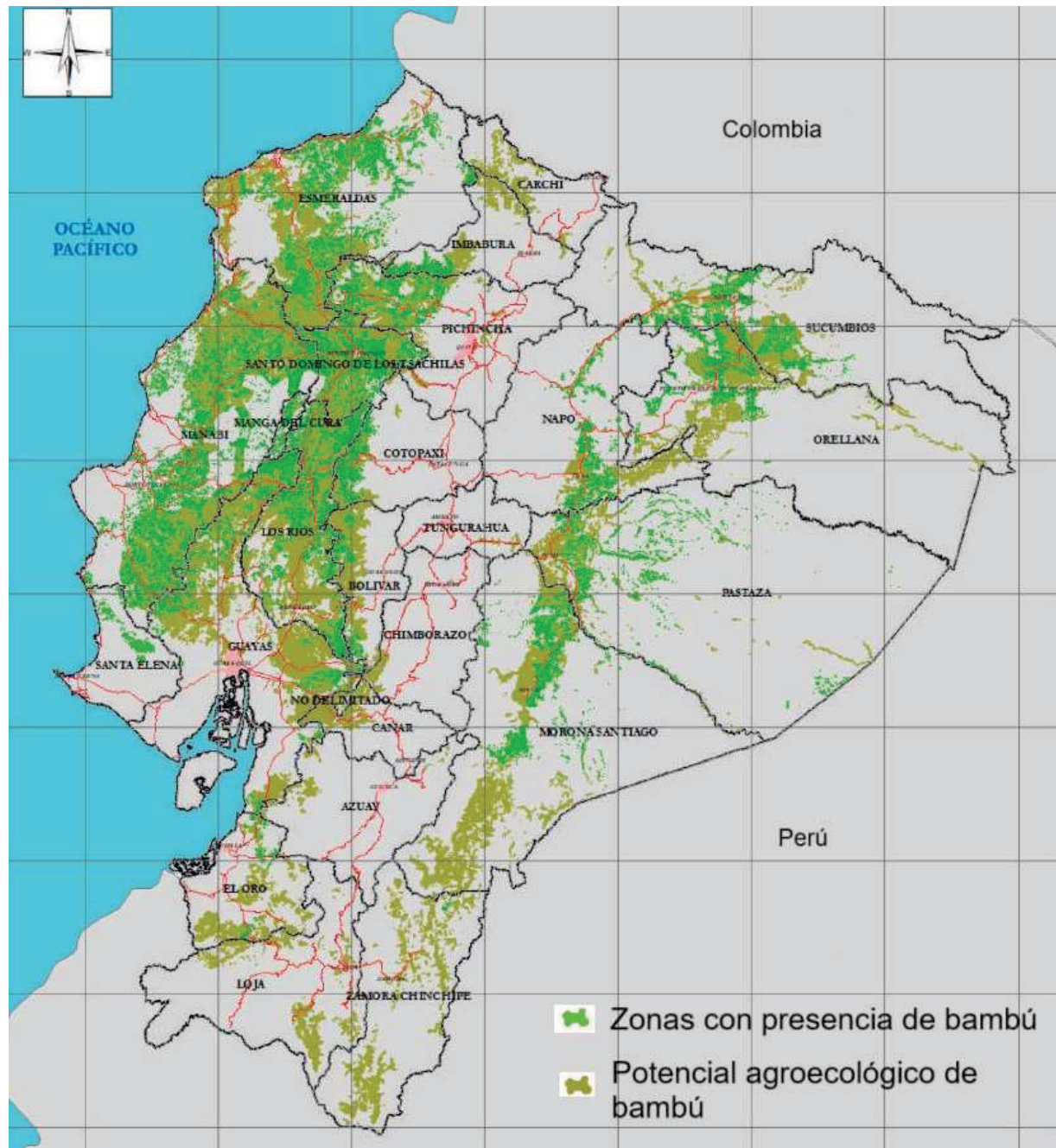


Figura 1.7 Distribución y potencial agroecológico del bambú en Ecuador [50].

La GaK es una de las especies de mayor producción en el Ecuador [10]. En un estudio de la Red Internacional del Bambú y el Ratán (INBAR) sobre las especies de bambú de importancia económica con prioridad mundial se sitúa a la GaK en la octava posición de catorce en la lista de prioridades identificadas para América Latina [36].

1.2.2 Hábitat y Anatomía.

La GaK pertenece a la familia de las gramíneas Poaceae, de la tribu de bambúes leñosos (Bambusodae), comúnmente conocida como guadua. Esta especie de bambú es endémica de Colombia, Ecuador y Venezuela [22]. Esta planta es ampliamente reconocida por su resistencia estructural y rápido crecimiento, ha sido de gran importancia histórica, cultural y económica para las comunidades que habitan en estas áreas. En Ecuador también se la conoce como acero vegetal y se la puede encontrar entre los 0 – 2000 msnm, su uso es tan antiguo que se han encontrado restos de guadua en construcciones que datan de hace 9500 años [10][50]. A continuación, se presenta una revisión de la literatura sobre la caracterización de esta planta.

1.2.2.1 Hábitat

Su hábitat corresponde a zonas tropicales y subtropicales húmedas. El crecimiento óptimo se encuentra entre 500 y 1500 msnm, en condiciones de 1200-2500 l-m² de precipitación anual, temperaturas de 18 °C a 24 °C, y 80-90% de humedad relativa [36]. La Figura 1.8 muestra una plantación natural de GaK en Ecuador.



Figura 1.8 Plantación natural de GaK en Dos Mangas, Ecuador.

1.2.2.2 Anatomía

La anatomía de la Gak desempeña un papel crucial en su funcionalidad y versatilidad. A continuación, se describen características morfológicas principales, incluyendo el rizoma, culmo, yema, rama, hoja caulinar y follaje, con un enfoque especial en el culmo, que constituye la parte más aprovechable de la planta.

Rizoma

Las raíces de la Gak son fundamentales para su supervivencia y crecimiento. El rizoma [10] es del tipo paquimorfo y consta de tres partes: el cuello, el rizoma y las raíces adventicias. Sirve como estructura fundamental de la planta, anclándola al suelo y facilitando la absorción de nutrientes y agua. Este tallo subterráneo también desempeña un papel fundamental en la reproducción asexual, permitiendo que el bambú se propague de manera eficiente y ocupe vastas áreas.

La estructura del rizoma está adaptada tanto para el almacenamiento como para el crecimiento rápido, lo que permite a la guadua capitalizar rápidamente las condiciones ambientales favorables. Además de su función en la absorción de nutrientes, las raíces también desempeñan la función de estabilización del suelo y prevención de la erosión. La Figura 1.9 ilustra un rizoma de GaK.



Figura 1.9 Rizoma de GaK [51].

Hoja caulinar

La hoja caulinar [52] envuelve el culmo, protege los brotes jóvenes y contribuye a la retención de agua. También participa en la fotosíntesis, aunque en menor medida que las hojas del follaje. Consta de una vaina basal y una lámina distal, con apéndices como aurículas y fimbrias.

La ligula interna une la vaina y la lámina, y a veces se presenta un anillo en la base de la vaina. Estas características son cruciales para la identificación taxonómica a nivel de especies y géneros del bambú. La Figura 1.10 muestra imágenes de hojas caulinares.



Figura 1.10 Hoja caulinar.

Yemas

La GaK [52] tiene una sola yema por nudo, y están protegidas por un profilo, pudiendo ser activas o inactivas, vegetativas o reproductivas. Se localizan en el culmo sobre la línea nodal, rompiendo su inactividad al completar el crecimiento apical. La disposición y forma de las yemas en los nudos son cruciales para la taxonomía, utilizadas para identificar especies y géneros. Además, las yemas tienen relevancia en biotecnología para la propagación "in vitro".

Ramas

En la GaK [52] las ramas emergen de manera intravaginal por dentro de la hoja caulinar sin romperla, se extienden desde los nudos del culmo y contribuyen a la biomasa general

y la capacidad fotosintética de la planta. La ramificación de los bambúes varía mucho durante los diferentes estados de desarrollo de la planta, sin embargo, la forma más típica de ramificación se observa en la parte media de los culmos adultos. En algunas especies de guaduas las ramas se modifican y llegan a transformarse en espinas.

Follaje.

El follaje [13], comprende vaina, lámina y apéndices como aurículas y fimbrias en la mayoría de las gramíneas. En la guadua la lámina es de tamaño grande. El follaje es crucial para estudios taxonómicos, destacando su relevancia anatómica.

Culmo

El culmo [52], eje aéreo segmentado de los bambúes, tiene forma cilíndrica y hueca que va disminuyendo su diámetro desde la base hacia el ápice, comprende cuello, nudos y entrenudos. El cuello corresponde a la unión entre el rizoma y el culmo. Los nudos, puntos de unión entre entrenudos, son la parte más resistente del culmo y varían en prominencia según la especie; también, son cruciales en la propagación de la guadua, ya que son el punto de origen de nuevas ramificaciones y brotes. Los entrenudos son huecos, con características como sulcados o cilíndricos. Importantes rasgos para observar incluyen la presencia de cera, agua interna y textura superficial. La Figura 1.11 ilustra culmos de GaK.



Figura 1.11 Culmos de GaK.

La longitud del entrenudo tiende a aumentar desde la base hacia el centro del culmo y luego disminuye hacia el ápice. Las dimensiones del diámetro, espesor del culmo y la distancia entre los entrenudos para GaK de 4 años se detallan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Dimensiones del diámetro, espesor del culmo y distancia del entrenudo de GaK de 4 años [53].

Culmo	Basal (mm)	Medio (mm)	Apical (mm)
Diámetro promedio	111,5	110,5	5,84
Espesor de pared	18,2	13,2	8,9
Distancia de entrenudo	202,5	348,3	333,8

Microestructura del culmo

La estructura del bambú [54] comprende un tejido parenquimático intercalado con haces vasculares (Figura 1.12a), cuya distribución y morfología varían significativamente desde la periferia hacia el interior de la pared a lo largo del culmo. En la GaK constituye el 51% a tejido parenquimatoso, 40% a fibras y 9% a células conductoras. Estas proporciones son similares a otros bambúes tropicales y subtropicales. La Tabla 1.3 presenta los porcentajes de tejido en el culmo de GaK de 4 años.

Tabla 1.3 Porcentajes de tejido en el culmo de GaK de 4 años [53].

Tejido	Culmo (% de tejido)			
	Basal	Medio	Apical	Total
Parénquima	8	27	16	51
Fibras	4	11	25	40
Células conductoras	1	4	4	9
Total	13	42	45	100

En la periferia del culmo, los haces vasculares son pequeños, numerosos y densamente agrupados (Figura 1.12b), contrastando con la sección media (Figura 1.12c) e interior (Figura 1.12d), donde estos haces se presentan más grandes y espaciados.

El tejido parenquimático (Figura 1.12c 5) rodea a los haces vasculares, y es ahí donde se almacena el almidón (Figura 1.13a). Los haces vasculares comprenden [13]: el metaxilema (Figura 1.12c 1), que consiste en dos grandes vasos separados por tejido parenquimatoso, variando en diámetro de 0,02 a 0,22 mm; el floema (Figura 1.12c 2), que está compuesto por tubos cribosos delgados y no lignificados, con células

acompañantes densas; el protoxilema (Figura 1.12c 3), que consta de traqueidas, fibras xilemáticas y parénquima, crucial para el transporte del agua; y los haces de fibras (Figura 1.12c 4).

Las fibras constituyen el principal componente estructural del culmo y muestran una forma hexagonal o pentagonal (Figura 1.12e). Cada fibra elemental contiene un pequeño orificio central conocido como lumen (Figura 1.12f). Esta configuración estructural es fundamental para entender las propiedades mecánicas y la funcionalidad del bambú en diversas aplicaciones.

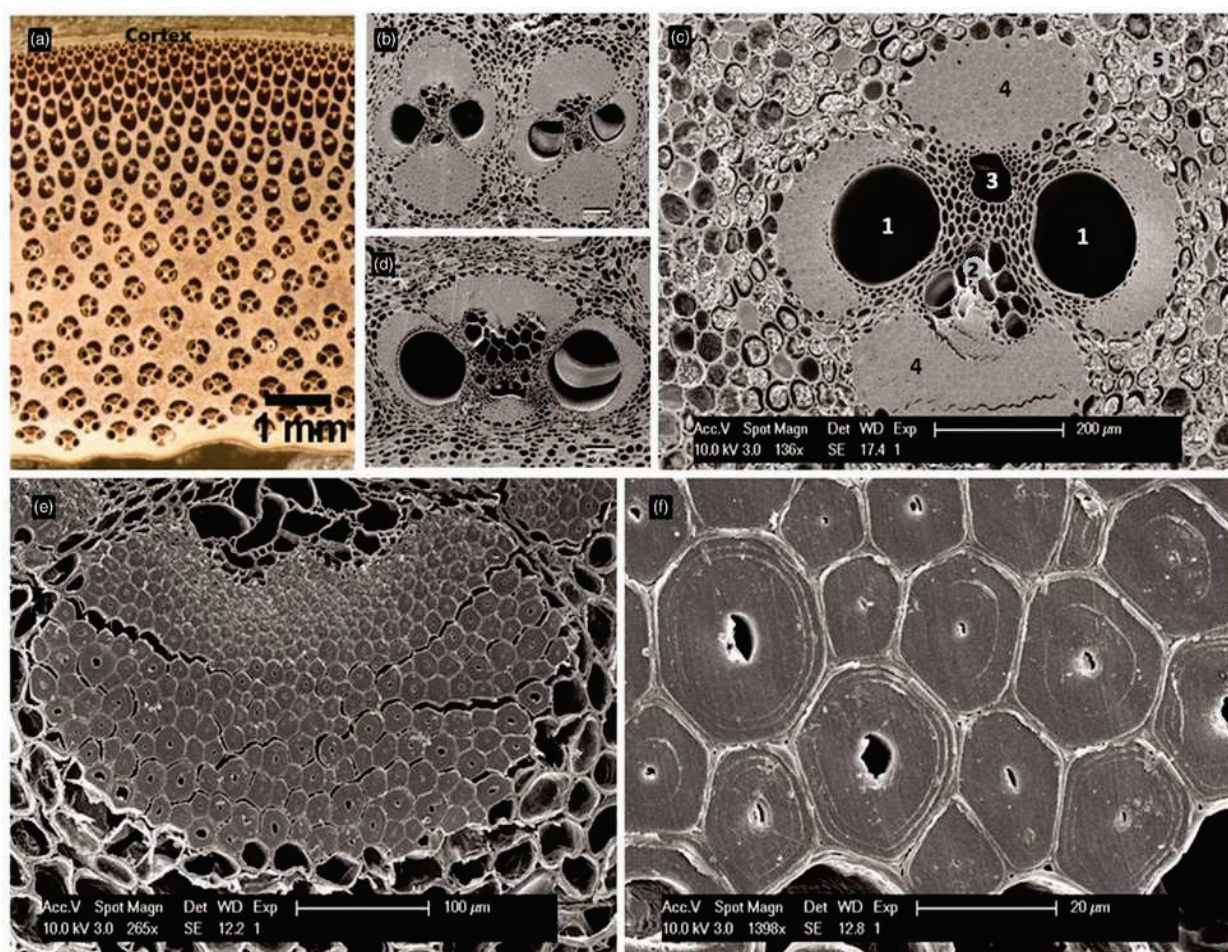


Figura 1.12 Microestructura de la GaK: (a) Corteza y distribución de los haces vasculares en la pared del bambú. Morfología de los haces vasculares: (b) sección exterior; (c) sección media; (d) sección interior de la pared del bambú. Partes del haz vascular: metaxilema 1, floema 2, protoxilema 3, haces de fibras 4 y parénquima 5; (e) haz de fibras de bambú; (f) lumen en fibras de bambú [54].

Las fibras son largas, delgadas y ahusadas (Figura 1.13b, 1.13c), se distribuyen alrededor de los haces vasculares en forma de vainas de esclerénquima y como hebras individuales, variando en tamaño y forma dependiendo de su posición dentro del culmo. En la GaK [53], el contenido de fibras varía entre el 64,8% y el 97,2% por haz vascular, mostrando una proporción más alta en los haces vasculares de las áreas periféricas y de transición (89,9%-97,2%), en comparación con los de las áreas media e interna (64,8%-87,2%). El porcentaje más bajo de fibras (64,8%) se encontró en la región interna del culmo. No se reportan diferencias significativas entre el contenido de fibras y la edad del culmo. La longitud de la fibra [13] se correlaciona con el diámetro de la fibra, la gravedad específica, el espesor de la pared celular, el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión.

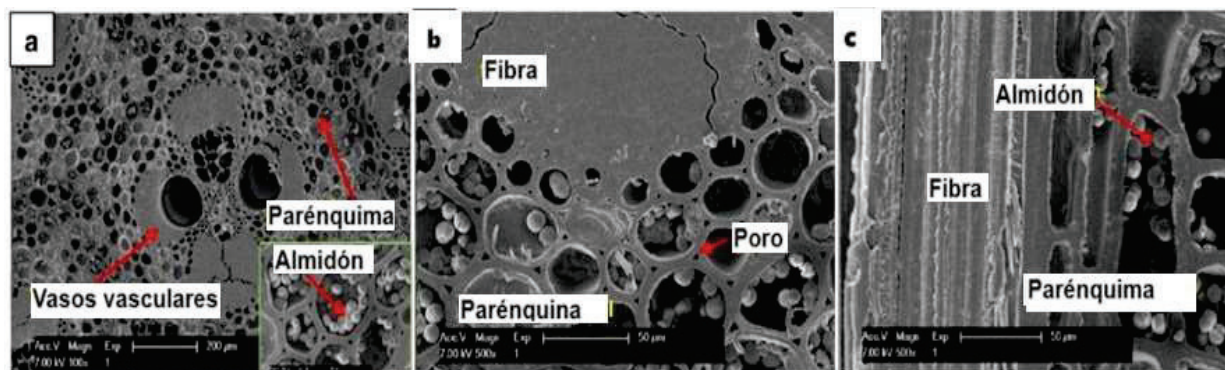


Figura 1.13 Microestructura del culmo de bambú: a) sección transversal del culmo de bambú; b) sección transversal de la fibra y la célula de parénquima en el bambú; c) sección radial del bambú [55].

Composición Química

La composición química del bambú [56] es comparable a la de las maderas duras, aunque presenta valores más elevados de cenizas y extractivos. El culmo del bambú está compuesto [57] principalmente por celulosa (60-70%), polisacáridos (20-25%), hemicelulosa y lignina (cada una aproximadamente 20-30%, junto con otros componentes como extractivos y componentes inorgánicos (cenizas), aunque en proporciones menores.

La Tabla 1.4 muestra la composición química de los culmos de GaK reportados por algunos autores.

Tabla 1.4 Composición química del bambú GaK.

	GaK (%p)		
	[58]	[59]	[60]
Humedad ^a	9,10	7,80	-
Carbono fijo ^b	23,10	20,40	-
Materia volátil ^b	74,10	75,80	-
Cenizas ^b	2,90	3,80	4,05
Celulosa	47,12	52,60	63,80
Hemicelulosa	18,21	19,70	
Lignina	22,76	27,60	25,20
Extractivos	-	7,30	9,55

^a base húmeda, ^b base seca.

1.2.3 Propiedades físicas y mecánicas.

Las propiedades físicas del bambú, particularmente su densidad y contenido de humedad, son de gran interés debido a su relación directa con las características del material, las propiedades mecánicas y su comportamiento estructural [56]. La estructura anatómica del bambú, específicamente la distribución y densidad de sus haces vasculares, ejerce una influencia determinante sobre sus propiedades mecánicas, haciendo que estas varíen a lo largo del culmo. La resistencia del bambú aumenta con el engrosamiento de las paredes de la fibra hasta alcanzar la madurez. Factores, como la edad, el lugar y la estación influyen en las propiedades de resistencia [13][61].

La GaK se distingue por sus excepcionales capacidades mecánicas, incluyendo una alta resistencia tanto a la tracción como a la compresión, que en algunos casos supera incluso a ciertos tipos de acero [22]. Esta notable resistencia, combinada con su ligereza, la convierte en un material óptimo para estructuras que demandan materiales robustos, pero al mismo tiempo livianos. A diferencia de muchos materiales rígidos, la guadua puede doblarse significativamente sin romperse, lo que permite su uso en diseños arquitectónicos innovadores. La capacidad para absorber impactos sin fracturarse la hace particularmente valiosa en regiones propensas a sismos, donde la flexibilidad y fortaleza son esenciales para la conservación de la integridad estructural. Este hecho fue evidenciado de manera impactante durante el terremoto de 2016 en Ecuador, donde las

construcciones realizadas con bambú demostraron ser notablemente más resilientes en comparación con los edificios convencionales [30]. En la Tabla 1.5 se presenta una síntesis de las propiedades físicas y mecánicas de la GaK.

Tabla 1.5 Propiedades físicas y mecánicas de la GaK.

Referencias	[62]	[63]	[64]	[65]	[66]	[67]	[68]
Densidad (kg/m ³)	730,00	663,30-764,60	630,00	545,98	531,26	620,41	-
Contenido de humedad %	-	>30	82	42 – 126	89 – 118	42 – 78	20 - 101
Fuerza a compresión (MPa)	58,00	36,60 – 36,80	-	32,62	22,86	37,95	45,99
Módulo de compresión (GPa)	18,48	16,30 – 17,90	-	15,00	34,51	20,32	17,52
Fuerza a tensión (MPa)	-	-	-	42,53	56,32	50,61	56,58
Módulo de tensión (GPa)	-	-	-	17,87	9,43	19,47	15,32
Fuerza a flexión (MPa)	-	88,60 – 104,10	-	68,39	39,81	55,29	38,88
Módulo de flexión (GPa)	-	17,20	-	12,72	11,57	12,56	14,93
Resistencia a la cizalladura (MPa)	12,00	7,10 – 7,80	-	7,82	3,95	7,57	4,46
Contracción radial %	-	-	18,37	-	-	-	-
Contracción tangencial %	-	-	8,33	-	-	-	-
Contracción longitudinal %	-	-	0,28	-	-	-	-

A pesar de la variabilidad de sus propiedades, el bambú sobresale por su combinación óptima de resistencia y ligereza [69], especialmente en comparación con otros materiales naturales y sintéticos como se lo evidencia en la Figura 1.14. Esta ventaja se enfatiza en el diseño de estructuras de masa mínima, donde el bambú ofrece un rendimiento superior en flexión, subrayando su potencial como un material altamente eficiente y versátil para diversas aplicaciones.

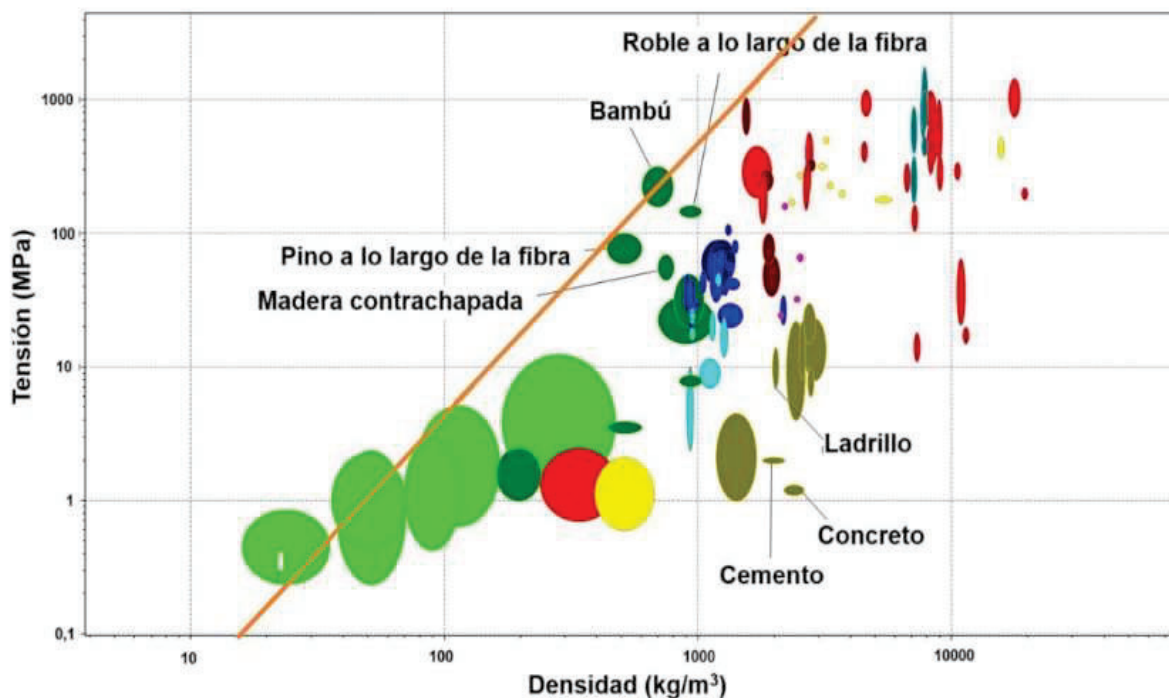


Figura 1.14 Relación entre la tensión y la densidad para diferentes materiales de construcción.

1.2.4 Sostenibilidad

La GaK es una planta multipropósito, se percibe como un material económico, de rápido crecimiento, con alta capacidad de secuestrar carbono. Tiene un intrincado sistema de rizomas que ayuda a estabilizar y evitar la erosión del suelo [13].

Alcanza su madurez entre los 3 y 4 años [36]. Puede llegar a tener una producción de 3000 - 8000 culm/ha. La contribución de biomasa de GaK a la biomasa del suelo es de alrededor de 10 toneladas por ha por año, y la acumulación de materia seca alcanza 76,6 toneladas por ha incluido culmos, ramas, hojas de follaje y hojas caulinares. La captación de CO₂ es mayor a 50 t de CO₂/ha para cultivos de seis años de crecimiento [53]. En la Tabla 1.6 se presentan datos de biomasa bajo el suelo (*Belowground Biomass*, BGB) y sobre el suelo (*Aboveground Biomass*, AGB) para espaciados de (5 x 5 m) de 3, 4 y 5 años.

Tabla 1.6 BGB y AGB para grupos (5 x 5 m) de GaK [70].

Grupos Gak	BGB (kg/clump)	AGB (kg/clump)
3 años	3,35	68,93
4 años	6,00	152,71
5 años	7,27	161,80

Los materiales de construcción de base biológica, como el bambú capturan CO₂ durante su fase de crecimiento y pueden almacenarlo en sus productos duraderos. Esta fase de almacenamiento cobra importancia cuando se extiende por décadas, como ocurre con los edificios.

La utilización del culmo completo en la construcción se ve limitada por la variación en las propiedades geométricas y mecánicas, dificultando las conexiones y uniones de los elementos entre sí lo que podría representar una desventaja en la sostenibilidad. Sin embargo, la gestión eficiente de los residuos permite aprovecharlo, ya sea como biomasa para producción de energía, o utilizando sus fibras o valor energético para un nuevo subproducto.

Cada vez más investigaciones demuestran una industria y una demanda crecientes de productos de construcción sostenibles. Los estudios varían desde el uso del culmo en su forma cilíndrica en construcción y andamios [71]–[73] hasta compuestos de bambú diseñados [21][41][74]–[76]. Los compuestos de bambú diseñados permiten que el material se utilice en secciones estandarizadas y tienen menos variabilidad inherente que el material natural [77].

En su estudio sobre la sostenibilidad de soluciones industrializadas de bambú en proyectos habitacionales, Escamilla [78] aborda diversas variables clave, incluyendo las emisiones de CO₂, los ingresos potenciales derivados de créditos de carbono y el potencial de generación de empleo. Destaca la importancia crucial de dos variables específicas: la vida útil de los edificios construidos con bambú y los escenarios relacionados con su disposición final. Este resultado subraya el papel significativo que desempeña el bambú como material de construcción sostenible y respalda su adopción como una alternativa viable para promover la sostenibilidad en el sector de la construcción.

1.2.5 Impacto cultural y económico.

Más allá de sus ventajas ambientales y mecánicas, la GaK también tiene un importante valor cultural y económico en Ecuador. Apoya las economías locales proporcionando materias primas para una amplia gama de productos, desde construcción y muebles hasta artesanías e instrumentos musicales [22]. El cultivo y procesamiento de la GaK fomenta la artesanía y las habilidades locales, contribuyendo a la preservación del patrimonio cultural y promoviendo al mismo tiempo el desarrollo sostenible [10].

1.3 Retos asociados a la GaK.

El bambú es conocido por su notable resistencia y versatilidad como material de construcción. Sin embargo, debido a su composición lignocelulósica es susceptible a diversos factores ambientales y biológicos que pueden afectar significativamente su durabilidad y funcionalidad. La humedad, en particular, puede restringir su uso en aplicaciones estructurales y exteriores, induciendo a deformaciones y aumentando su vulnerabilidad ante ataques biológicos [79].

Agentes xilófagos, como termitas y coleópteros barrenadores, representan una amenaza significativa. Especies como *Dinoderus minutus* son conocidas por su capacidad de degradar el bambú, comprometiendo su integridad estructural [80][81]. Aunque la GaK no posee resistencia inherente al fuego, el tratamiento con soluciones retardantes puede mejorar su comportamiento en este aspecto.

Para abordar estas preocupaciones, se han desarrollado diversos tratamientos que alteran la estructura química y física del bambú. Estos métodos buscan mejorar su resistencia a la humedad, protegerlo contra insectos y aumentar su resistencia al fuego, aunque también pueden afectar su composición química y microestructura, influyendo en propiedades fundamentales como la rigidez y flexibilidad de la GaK. La comprensión de estas prácticas es crucial para el desarrollo de del bambú, de modo que se mejore su durabilidad sin comprometer sus características esenciales.

El acceso a estos tratamientos está limitado por la tecnología, la economía y el conocimiento, especialmente en países en vías de desarrollo, lo cual es una limitante

para el desarrollo industrial sostenible. Entre los principales métodos se pueden distinguir los siguientes:

1.3.1 Métodos tradicionales

Desde tiempos antiguos se han desarrollado varios métodos para tratar el bambú [10], [82]–[85] con el propósito de mejorar su durabilidad, protegiéndolo de plagas, hongos y humedad, mejorando sus propiedades mecánicas y facilitando su mantenimiento para aplicaciones en construcción. Los métodos tradicionales incluyen el curado en matas, el remojo en agua y el ahumado sobre fuego abierto, que, aunque efectivos en cierto grado, no garantizan una protección a largo plazo. Para una mayor resistencia a la humedad, insectos y fuego, se prefieren tratamientos químicos y térmicos.

1.3.2 Tratamientos químicos (TQ)

Los TQ [86] son los métodos más utilizados y eficientes para proteger al bambú. Los conservantes para bambú se clasifican en base a agua y aceite. Los conservantes a base de agua [69], como el arseniato de cobre cromatado (CCA) y el borato de cobre cromatado (CCB), se aplican mediante presión o difusión y se dividen en fijadores y no fijadores. Aunque efectivos, algunos de estos químicos presentan toxicidad, lo que ha llevado a la búsqueda de alternativas más seguras, como los compuestos de boro [69], [87]–[89]. También existen otras alternativas de TQ [90][91] que incluyen compuestos orgánicos como extractos naturales y ácido piroleñoso, sin embargo, su efectividad es reducida.

Tratamientos con ácido bórico y bórax

El ácido bórico y el bórax son compuestos químicos ampliamente utilizados en la preservación [92][97] de la madera y otros materiales vegetales. Estos compuestos actúan como agentes insecticidas y fungicidas, inhibiendo el crecimiento de organismos que degradan la hemicelulosa y celulosa.

El ácido bórico (H_3BO_3) y el bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) funcionan principalmente a través de la liberación de iones de boro [89], [92], que interfieren en los procesos metabólicos de hongos e insectos. Los tratamientos con estos compuestos pueden aplicarse

mediante inmersión o aspersión, permitiendo que las soluciones penetren en las fibras del bambú. Además, los compuestos de boro como el ácido bórico y el bórax ofrecen propiedades retardantes de fuego [89], lo cual es un valor añadido en aplicaciones de construcción.

Diversos estudios [69][89][93] han investigado la efectividad de estos tratamientos en la GaK. Por ejemplo, Guzmán [94] evaluó el uso de soluciones de bórax y ácido bórico en diferentes concentraciones y concluyó que una solución de 2% de cada compuesto mostró una reducción significativa en la incidencia de ataques de hongos y termitas.

El procedimiento típico para la aplicación de estos tratamientos incluye la preparación de una solución acuosa con los compuestos en las concentraciones deseadas. Las muestras de bambú se sumergen en la solución durante un periodo que varía entre 72 y 120 h, dependiendo de la densidad y tamaño del material[30][95][96]. Posteriormente, las muestras se secan al aire libre antes de ser sometidas a pruebas de resistencia y durabilidad.

Los estudios indican que los tratamientos con ácido bórico y bórax aumentan significativamente la resistencia del bambú a la biodegradación. Además, investigaciones realizadas por Caldeira [92] y Venmalar [89] han señalado que los compuestos de boro, como el ácido bórico y el bórax, se destacan como alternativas de bajo costo y baja toxicidad. Además, se ha demostrado que los tratamientos con ácido bórico y bórax pueden proporcionar protección contra el fuego, lo cual es crucial para su uso en aplicaciones de construcción [69].

Sin embargo, es importante considerar que la efectividad del tratamiento puede variar en función de factores como la concentración de la solución, el tiempo de inmersión o método de aplicación y las condiciones ambientales. Un problema significativo es que, sin la presencia de un fijador, las sales de boro pueden lixiviarse cuando el bambú está expuesto a adversidades externas o en contacto con el suelo [69][92]. Aunque estos compuestos se utilizan ampliamente en la construcción con bambú en América Latina y Asia, aún se requiere más investigación sobre su efectividad a largo plazo en exteriores y su influencia en las propiedades mecánicas.

Los tratamientos con ácido bórico y bórax se presentan como una solución económica y sostenible para la preservación del bambú.

1.3.3 Tratamientos térmicos (TT)

El TT es una técnica utilizada para modificar las propiedades del bambú, enfocada en la estabilidad dimensional y la resistencia a la degradación.

Existen diferentes tipos de TT, el acceso a ellos se ve limitado por principalmente por los recursos y la tecnología, cada uno de ellos tiene implicaciones específicas en las propiedades del bambú. A continuación, se describe algunos de ellos.

1. Tratamiento por Ebullición: Consiste en hervir el bambú en agua a presión atmosférica. Este método es sencillo y efectivo para eliminar azúcares y almidones, reduciendo la atracción de insectos y hongos. Li [97] encontró que tratamientos superiores a 4 h causaron degradación celular y pérdida de propiedades mecánicas en bambú *Phyllostachys pubescens* de 4 años.

2. Tratamiento Hidrotérmico: Este método utiliza al vapor de agua como medio de tratamiento y se divide en vapor saturado y vapor sobrecalentado. El vapor saturado ablanda el bambú a temperaturas relativamente bajas, minimizando la disminución de sus propiedades mecánicas, mientras que el vapor sobrecalentado es más económico, pero menos eficiente en el ablandamiento del material. Wang [98] en su estudio reporta que el tratamiento con vapor saturado a 140 °C mejoró la densidad, la estabilidad dimensional y la resistencia a la flexión y compresión del bambú Moso, aunque estas propiedades disminuyeron a 180 °C debido a la degradación de la hemicelulosa.

3. Tratamiento con aire caliente: El TT del bambú con aire a temperaturas de 100-220 °C durante 1 a 4 h puede mejorar su calidad [99]. No obstante, la degradación de la celulosa por el oxígeno puede resultar en pérdidas de masa y resistencia mecánica. Para mitigar esto, Nguyen [100] utilizó nitrógeno como gas inerte, reduciendo la pérdida de masa al 5% tras el tratamiento a 180 °C durante 5 h.

Todos estos tratamientos tienen implicaciones en las propiedades químicas, morfológicas, térmicas, biológicas y mecánicas del bambú, así como también en la sostenibilidad y en el desarrollo de las economías locales

La investigación y desarrollo continuo del TT de ebullición para el bambú, específicamente la GaK, es crucial para aprovechar plenamente este recurso sostenible en países en desarrollo. Esta técnica no solo mejora las propiedades del bambú, sino que también es económica y accesible, promoviendo el desarrollo económico local y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. La implementación efectiva de estos tratamientos puede transformar la industria del bambú, creando oportunidades económicas y avanzando hacia un futuro más sostenible.

1.3.3.1 Efectos del tratamiento térmico en el bambú

1. Efectos en la composición Química.

El TT induce cambios significativos en la composición química del bambú, afectando componentes clave como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. A continuación, se describen los efectos del TT en la composición química del bambú y las técnicas analíticas utilizadas para evaluar estos cambios, específicamente FT-IR, RMN-¹³C y el método Fehling A y B.

a. Degradación de la Hemicelulosa

El TT provoca la degradación de la hemicelulosa, uno de los principales componentes de la pared celular del bambú. Este proceso reduce el contenido de grupos hidrofílicos, como los hidroxilos y carbonilos, disminuyendo así la capacidad de absorción de humedad del bambú tratado. La degradación de la hemicelulosa también implica la ruptura de enlaces glucosídicos y la descomposición de grupos acetilo, lo que resulta en una menor higroscopicidad y mayor estabilidad dimensional [98].

b. Modificación de la Celulosa

La celulosa, que constituye la estructura principal del bambú, sufre cambios estructurales durante el TT. La eliminación de agua adsorbida en la región amorfa de la celulosa y la reordenación de las cadenas de celulosa aumentan la cristalinidad relativa del material. Este incremento en la cristalinidad mejora las propiedades mecánicas del bambú tratado, aunque puede también conllevar cierta fragilidad debido a la reducción de la flexibilidad de las fibras [97].

c. Incremento de la Lignina

La lignina, un polímero complejo que actúa como aglutinante en la pared celular, se vuelve más prominente después del TT debido a la degradación de la hemicelulosa y la celulosa. Este incremento relativo en la lignina contribuye a mejorar la resistencia del bambú a la biodegradación y a incrementar sus propiedades hidrofóbicas, reduciendo la capacidad de absorción de agua y aumentando la durabilidad del material [98].

2. Efectos en la microestructura del bambú

El TT del bambú produce cambios significativos en su microestructura, especialmente en las paredes celulares, el tejido de parénquima y en los haces vasculares [98]. Estos cambios son cruciales para comprender cómo el TT puede mejorar o modificar las propiedades mecánicas y físicas del bambú, haciendo de este material una opción más viable para aplicaciones en construcción y manufactura.

Las temperaturas elevadas pueden causar la despolimerización y la degradación de la hemicelulosa y alterar la lignina, lo que resulta en una mayor densificación de las paredes celulares y una disminución en su porosidad. Esto puede contribuir a un aumento en la resistencia mecánica, pero también puede hacer que el material sea más frágil [98].

El TT del bambú impacta significativamente su microestructura [97][98][101], despolimerizando la hemicelulosa y alterando la lignina, lo que densifica las paredes celulares y reduce su porosidad, aumentando la resistencia mecánica pero también la fragilidad del material. Los haces vasculares experimentan cambios que afectan las propiedades de flexión y compresión, mientras que las alteraciones en el tejido de parénquima impactan la capacidad del bambú para absorber impactos y distribuir cargas, esencial para aplicaciones estructurales.

3. Efectos en el comportamiento al fuego del bambú

El TT puede modificar la composición química del bambú, reduciendo los componentes más volátiles como la hemicelulosa y aumentando la concentración de lignina carbonizada, lo que podría resultar en una mayor resistencia al fuego [102]. Li [103], afirma que el TT a altas temperaturas en bambú retarda la liberación de humo y reduce las emisiones de CO durante la combustión, mejorando así su comportamiento ante el

fuego mediante un aumento en el rendimiento de carbón, lo que contribuye a una menor liberación de calor.

4. Efectos en las propiedades mecánicas

El TT incide notoriamente en las propiedades mecánicas del bambú, afectando de manera diferencial su rigidez y capacidad de flexión. La variabilidad en los resultados respecto al módulo de elasticidad (E) y la resistencia a la flexión (σ_f) se atribuye a la diversidad en las temperaturas y duraciones de los tratamientos aplicados. La exposición al calor provoca una degradación de la hemicelulosa, lo que conlleva una reducción en la resistencia mecánica y en la flexibilidad del material, al alterar la cohesión de las paredes celulares. Asimismo, este proceso modifica la lignina, incrementando la fragilidad del bambú, particularmente bajo condiciones de altas temperaturas y prolongadas exposiciones. Aunque la celulosa muestra una relativa estabilidad, la aplicación de TT extendidos y a elevadas temperaturas puede comprometer su estructura, resultando en una disminución del E [97][98][101][104].

1.3.3.2 Técnicas de evaluación química

1. Técnicas de evaluación química

a. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (*Fourier-transform Infrared spectroscopy*, FT-IR)

La FT-IR es una técnica analítica que mide la absorción de radiación infrarroja por las moléculas del material, proporcionando información sobre los grupos funcionales presentes. En el contexto del TT del bambú, FT-IR se utiliza para identificar cambios en la composición química, como la disminución de grupos hidroxilo y carbonilo, y la aparición de nuevos enlaces debido a la degradación de la hemicelulosa y la celulosa [98]. Por lo general las muestras se analizan en un espectrómetro FT-IR en el rango de $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$. El análisis consiste en identificar de picos característicos de grupos funcionales y se comparan con los de muestras no tratadas. A continuación, se presentan algunos de los picos característicos para los componentes principales del bambú.

- Celulosa: Pico a 897 cm^{-1} (vibración de flexión CH del enlace β -glucosídico), 1159 cm^{-1} (vibración de estiramiento C-O-C), 1318 cm^{-1} (vibración de estiramiento O-H) [97][98] .
- Hemicelulosa: Pico a 1730 cm^{-1} (grupo acetilo con el grupo éster o carboxilo) [97].
- Lignina: Pico a 1590 cm^{-1} (vibraciones de estiramiento C=C) [97].

b. Resonancia Magnética Nuclear de Carbono-13 (RMN- ^{13}C)

La resonancia magnética nuclear de carbono-13 (RMN- ^{13}C) es una técnica que proporciona información detallada sobre la estructura molecular y la dinámica de los componentes orgánicos. La RMN- ^{13}C utiliza la propiedad de los núcleos de carbono-13 para resonar en presencia de un campo magnético fuerte. Esta técnica se utiliza para estudiar la estructura de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina en el bambú tratado térmicamente, revelando cambios en la configuración y composición química [97].

Los espectros se analizan a partir de los picos para identificar cambios en las estructuras de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. A continuación, se indican los picos característicos de estos componentes.

- Celulosa [105]: Pico a 105 ppm (C_1), 74 ppm (C_2 , C_3 , C_5)
- Hemicelulosa [106]: Picos 102 ppm (C_1), 76 ppm (C_4)
- Lignina [97]: Picos a 56 ppm (grupo metoxilo OCH_3), 147 ppm y 152 ppm (C_3 y C_5 de la lignina siringil no fenólica y fenólica).

c. Método Fehling A y Fehling B

El método Fehling es una técnica clásica utilizada para determinar el contenido de azúcares reductores (AR), que son un indicador de la degradación de carbohidratos como la hemicelulosa. Este método se basa en la capacidad de los AR para reducir el ion cúprico (Cu^{2+}) a ion cuproso (Cu^+), que precipita como óxido de cobre(I) (Cu_2O) de color rojo [107].

La evaluación consiste en el análisis de la observación de la formación de un precipitado rojo de óxido de cobre(I) indicativo de la presencia de AR en la muestra analizada. Para cuantificar con precisión la cantidad de AR, es habitual emplear una curva de calibración. Esta curva se construye utilizando una sustancia de referencia conocida, lo que permite

expresar la concentración de AR en términos comparables a dicha sustancia de referencia. Este procedimiento asegura que la cuantificación sea no solo cualitativa, sino también cuantitativa, facilitando así la interpretación y comparación de los resultados obtenidos en diferentes ensayos o condiciones experimentales.

2. Técnica de evaluación microscópica: Microscopía electrónica de barrido (Emission Scanning Electron Microscopy, SEM)

Esta técnica proporciona imágenes de alta resolución que permiten una observación detallada de la topografía y la morfología de las células de bambú a escalas microscópicas. Al emplear SEM, los investigadores pueden evaluar cómo el TT afecta la distribución y el tamaño de los poros en las paredes celulares, la integridad de los haces vasculares y la densidad del tejido de parénquima[108]. La Figura 1.15 muestra un ejemplo de esta técnica.

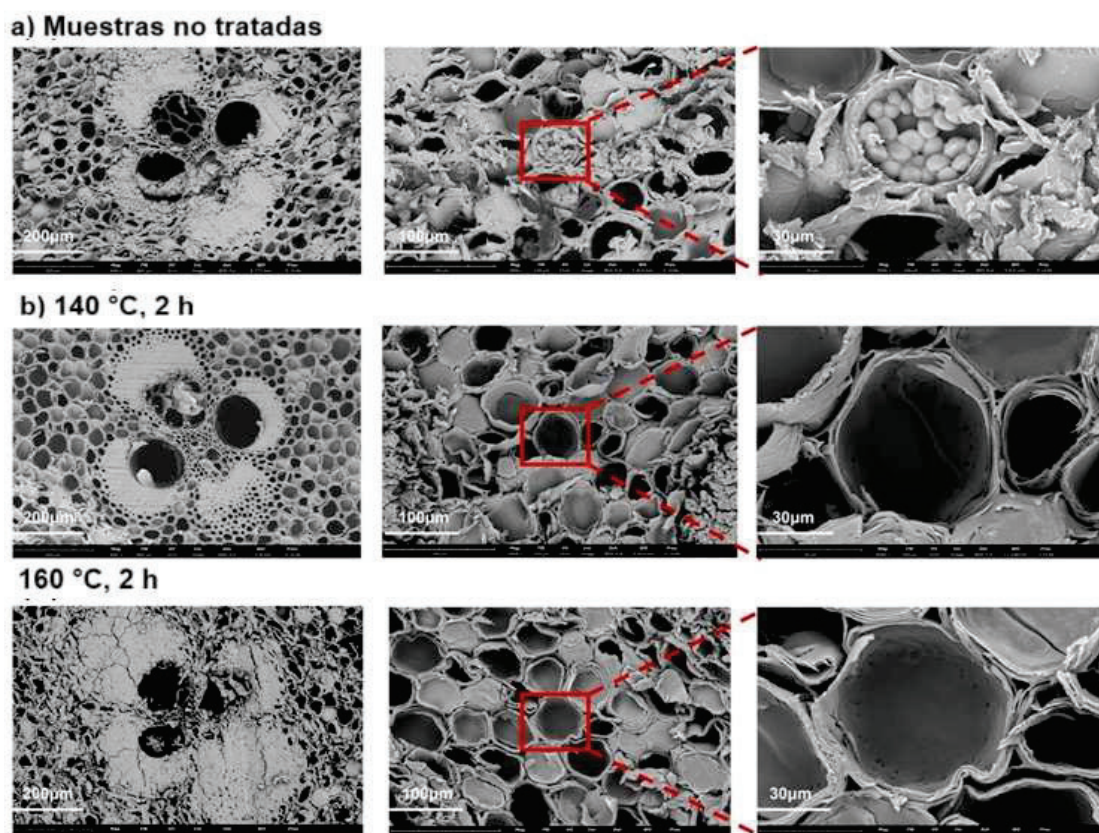


Figura 1.15 Imágenes SEM de muestras de bambú a) No tratadas. Tratadas hidrotermalmente durante 2 h b) 140 °C y c) 160 °C [101]

El TT tiene un impacto significativo en la microestructura del bambú, lo que puede ser decisivo para su funcionalidad en diversas aplicaciones. La técnica SEM, por su capacidad para proporcionar un análisis detallado y a pequeña escala, es fundamental para entender estas modificaciones.

3. Técnicas de comportamiento al fuego.

Al diseñar con bambú, es crucial considerar su comportamiento frente al fuego. Dos técnicas destacadas para evaluar y mejorar la resistencia al fuego del bambú son el epirradiator y el índice de oxígeno límite.

Epirradiator: Esta técnica implica exponer el material a una fuente de calor radiante para simular las condiciones de un incendio y medir su reacción, como la pérdida de masa, la emisión de humos, la resistencia al fuego entre otras [109].

Índice de Oxígeno Limitante (*Limiting Oxygen Index*, LOI): El LOI mide la concentración mínima de oxígeno necesaria para mantener la combustión de un material. Un LOI más alto indica una mayor resistencia al fuego [110].

4. Técnicas de evaluación mecánica

La técnica de flexión a tres puntos es un método estándar para evaluar la resistencia y rigidez de materiales como el bambú. En esta prueba, una muestra de bambú se coloca sobre dos apoyos y se aplica una carga en el centro hasta que el material se rompe o alcanza un límite de deformación predeterminado. Los principales parámetros medidos son:

Módulo de Elasticidad (E): Indica la rigidez del bambú, calculado a partir de la pendiente de la parte lineal del gráfico carga vs. deformación.

Resistencia a la flexión (σ_f): Es la máxima tensión que el bambú puede soportar antes de romperse, derivado de la carga máxima soportada durante la prueba.

Estos parámetros son fundamentales para diseñar componentes estructurales que utilicen bambú, asegurando que cumplan con los requisitos de rendimiento y seguridad necesarios.

1.3.4 Análisis del ciclo de vida (ACV) en productos del bambú

La evaluación de la sostenibilidad de los productos y subproductos derivados de la GaK constituye un desafío significativo. El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología robusta que permite medir los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un producto. Este procedimiento se estructura en cuatro fases fundamentales: definición de objetivos y alcance, análisis del inventario de ciclo de vida, evaluación de impacto del ciclo de vida e interpretación de los resultados [111]. Los hallazgos del ACV pueden servir como referencia para orientar la transición hacia una bioeconomía, enfocada en la mitigación de impactos ambientales.

La aplicación del ACV puede variar significativamente dependiendo de factores como el alcance del estudio, la delimitación del sistema y la unidad funcional elegida. Hernández [112], evaluó los impactos ambientales de la extracción de GaK en Pereira, Colombia. El estudio realizado con SimaPro 7.3.3, identificó como principales impactos ambientales el consumo de combustible en pre cosecha y cosecha, destacando la toxicidad humana por el uso de gasolina (44%) y el deterioro de la capa de ozono (99%) debido a emisiones de halones y clorofluorocarbonos (CFCs), asociados al equipo de aserrío y transporte.

Por otro lado, Ramírez [113], reveló que la producción de paneles encolados y prensados emite 9,3 kg de CO₂-eq por unidad, siendo la fabricación de pegamento (urea formaldehído y acetato de vinilo) responsables del 48% de las emisiones, además del transporte que también es contribuyente significativamente.

Adicionalmente, Restrepo [114], en su estudio para fabricación de tableros laminados de bambú en Colombia, utilizando gestión energética y ACV enfocada en el calentamiento global según el IPCC 2007, identificó un consumo energético de 3456,6 kWh y recomendó una producción mínima de 400 tableros mensuales. El balance de carbono, incluyendo emisiones evitadas por la utilización de residuos de bambú como combustible, resultó en -117 kg de CO₂-eq, validando el modelo ambiental incluso bajo un escenario alternativo con gas natural.

Este estudio también pretende realizar un ACV para un tablero laminado de bambú prensado en caliente producido en una planta en Santa Elena, Ecuador. El objetivo es

evaluar la situación actual y desarrollar un escenario de mejora que contribuya al desarrollo sostenible de esta industria local.

1.3.5 Aprovechamiento de residuos del bambú: Enfoque en materiales compuestos.

En la fabricación de tableros laminados de GaK, se utiliza solamente una sección de 4.5 metros del culmo de bambú, mientras que la parte apical y los residuos generados durante el proceso frecuentemente se degradan en el ambiente. La reutilización de estos residuos del culmo en la producción de tableros y su incorporación en matrices de polímeros constituyen estrategias innovadoras y ecológicas en la industria de materiales de construcción. Estos métodos no solo promueven la sostenibilidad, sino que también añaden valor a subproductos anteriormente desaprovechados, contribuyendo así a la reducción de impacto ambiental y optimización de recursos en la producción de materiales de construcción.

La integración de fibras de bambú en matrices de polímero abre un campo vasto de posibilidades en la construcción [115]. Las aplicaciones potenciales incluyen su uso en paneles de revestimiento, elementos estructurales y como aislamiento acústico y térmico. Las fibras de bambú pueden ser incorporadas tanto en polímeros termoestables como termoplásticos, creando compuestos que son ligeros, resistentes y con buena resistencia al impacto. Además, la capacidad de las fibras de bambú para reforzar matrices poliméricas ha mostrado mejoras significativas en las propiedades mecánicas del material compuesto final, incluyendo la resistencia a la tensión y la flexión.

Los estudios de Abhilash [116], Ramírez [117], resaltan cómo la adición de elastómeros a compuestos de polipropileno reforzados con fibra de bambú mejora significativamente la resistencia al impacto y la elongación. Estas mejoras son cruciales para aplicaciones que requieren materiales duraderos bajo condiciones de uso variadas, especialmente en la construcción y automoción.

Lázaro [118], describe cómo el tamaño de partícula y la proporción de mezcla de bambú a polipropileno afectan la rigidez y la absorción de agua de los compuestos. Descubrieron que las formulaciones con menor tamaño de partícula y mayor contenido de polipropileno

exhiben mejoras en la rigidez y menores tasas de absorción de agua, factores importantes para la durabilidad de los materiales de construcción.

Takagi [119] proporcionan evidencia de que los compuestos de bambú con ácido poliláctico (PLA) tienen una conductividad térmica menor en comparación con los plásticos reforzados con fibras convencionales, lo que los hace adecuados para aplicaciones de aislamiento térmico en edificaciones.

Mousavi [38] revisa estudios de caso sobre compuestos de fibra de bambú y polímero, enfatizando la importancia de la selección del tipo de polímero y el porcentaje de fibra para optimizar las propiedades mecánicas del material final. Este enfoque permite adaptar los materiales a necesidades específicas, lo cual es esencial para su uso en aplicaciones estructurales y semi-estructurales.

1.4 Bibliografía

- [1] United Nations Environment Programme, “2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi,” 2022.
- [2] C. Z. Li *et al.*, “A blockchain- and IoT-based smart product-service system for the sustainability of prefabricated housing construction,” *J. Clean. Prod.*, vol. 286, p. 125391, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125391.
- [3] S. Solaimani and M. Sedighi, “Toward a holistic view on lean sustainable construction : A literature review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 248, p. 119213, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119213.
- [4] T. Joensuu, H. Edelman, and A. Saari, “Circular economy practices in the built environment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 276, p. 124215, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124215.
- [5] C. J. Kibert, *Sustainable construction: green building design and delivery*. John Wiley & Sons, 2016.
- [6] A. D. Udomsap and P. Hallinger, “A bibliometric review of research on sustainable construction , 1994 e 2018,” *J. Clean. Prod.*, vol. 254, p. 120073, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120073.
- [7] G. J. P. C. Ramírez and D. M. Suárez, “Prácticas de economía circular inmersas en el valor compartido,” *Apunt. Econ. y Soc.*, 2023, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:258914835>.
- [8] M. Yang *et al.*, “Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues,” vol. 21, pp. 55–80, 2023, doi: 10.1007/s10311-022-

01499-6.

- [9] R. A. Lopes, A. Chambel, J. Neves, D. Aelenei, and J. Martins, “A Literature Review of Methodologies Used to Assess the Energy Flexibility of Buildings,” *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 1053–1058, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.274.
- [10] 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 Int. BAMBÚ Y RATÁN, INBAR*, p. 193, 2015.
- [11] FAO, “Global Forest Resources Assessment 2020: Main report,” Rome, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.
- [12] “Where does Bamboo grow?” <https://www.guaduabamboo.com/blog/where-does-bamboo-grow> (accessed Feb. 28, 2024).
- [13] W. Liese, J. Welling, and T. K. H. Tang, “Utilization of Bamboo,” in *Bamboo. Tropical Forestry*, Vol 10., W. Liese and M. Köhl, Eds. Switzerland: Springer, 2015.
- [14] M. F. Hossain, M. A. Islam, and S. M. Numan, “Multipurpose Uses of Bamboo Plants : A Review,” vol. 4, no. 12, pp. 57–60, 2015.
- [15] D. P. Nirala, N. Ambasta, and P. Kumari, “A Review on Uses of Bamboo Including Ethno-Botanical Importance,” *Int. J. Pure Appl. Biosci.*, vol. 5, no. 5, pp. 515–523, Nov. 2017, doi: 10.18782/2320-7051.5398.
- [16] A. Emamverdian, Y. Ding, F. Ranaei, and Z. Ahmad, “Application of Bamboo Plants in Nine Aspects,” *Sci. World J.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/7284203.
- [17] N. Mohan, S. P. Dash, N. Mary Boby, and D. Shetty, “Study of bamboo as a building material – Construction & preservation techniques and its sustainability,” *Mater. Today Proc.*, vol. 60, pp. 100–114, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.12.263.
- [18] Z. Zhang, F. Rao, and Y. Wang, “Morphological, Chemical, and Physical–Mechanical Properties of a Clumping Bamboo (*Thyrsostachys oliveri*) for Construction Applications,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/polym14173681.
- [19] K. Chaowana, S. Wisadsatorn, and P. Chaowana, “Bamboo as a sustainable building material—culm characteristics and properties,” *Sustain.*, vol. 13, no. 13, 2021, doi: 10.3390/su13137376.
- [20] H. Echezuría, “El Bambú como Recurso Sustentable para Construcción de Viviendas de Bajo Costo,” vol. 21, pp. 52–68, 2018.
- [21] J. Su, H. Li, Z. Xiong, and R. Lorenzo, “Structural design and construction of an office building with laminated bamboo lumber,” *Sustain. Struct.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–8, 2021, doi: 10.54113/j.sust.2021.000010.
- [22] B. Torres, M. Segarra, and L. Bragança, “El bambú como alternativa de construcción sostenible,” *Extensionismo, Innovación y Transf. Tecnológica*, vol. 5, pp. 389–396, 2019.

- [23] C. Navas-c *et al.*, “The Role of Oxygenated Functional Groups on Cadmium Removal using Pyrochar and Hydrochar Derived from *Guadua angustifolia* Residues,” 2023.
- [24] M. Yadav and A. Mathur, “Bamboo as a sustainable material in the construction industry: An overview,” *Mater. Today Proc.*, vol. 43, pp. 2872–2876, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.01.125.
- [25] C. M. G. da Cunha and P. A. da S. Machado, “The use of Bamboo in construction: a sustainable alternativ,” *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 10, no. 12, pp. 086–095, 2023, doi: 10.22161/ijaers.1012.9.
- [26] S. Amziane and M. Sonebi, “Overview on bio-based building material made with plant aggregate,” *RILEM Tech. Lett.*, vol. 1, pp. 31–38, 2016, doi: 10.21809/rilemtechlett.2016.9.
- [27] S. Andrade Pardo, F. Lamus Baez, and N. Torres Castellanos, “Connections between a column and its foundation for *guadua angustifolia* structures under lateral loads,” *Key Eng. Mater.*, vol. 668, pp. 227–237, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.668.227.
- [28] P. O. Awoyera and A. Adesina, *Structural Integrity Assessment of Bamboo for Construction Purposes*. Elsevier Ltd., 2017.
- [29] S. Bhardwaj, R. Sharma, and R. Kumar, “An Alternative to Steel: Bamboo-A review (New Advances),” *J. Eng. Comput. Appl. Sci. ISSN*, vol. 3, no. 10, pp. 2319–5606, 2014.
- [30] 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.
- [31] D. Witte, “Structural Bamboo Building Codes: Catalysts for Industry, Research, and Construction Technology,” *Technol. + Des.*, vol. 3, no. 1, pp. 50–64, Jan. 2019, doi: 10.1080/24751448.2019.1571824.
- [32] J. De la Torre and A. Iñiguez, “El bambú en la vivienda latinoamericana: 10 casas que muestran el futuro del material en la arquitectura,” *ArchDaily*, Sep. 11, 2023. <https://www.archdaily.cl/cl/1006383/el-bambu-en-la-vivienda-latinoamericana-10-casas-que-muestran-el-futuro-del-material-en-la-arquitectura/64fb400b9e3fb90e356c74b7-el-bambu-en-la-vivienda-latinoamericana-10-casas-que-muestran-el-futuro-del-material-en-la> (accessed Feb. 25, 2024).
- [33] “Keeng Seafood Restaurant / BambuBuild,” *ArchDaily*, Nov. 14, 2023. https://www.archdaily.com/1009690/keeng-seafood-restaurant-bambubuild?ad_source=search&ad_medium=projects_tab (accessed Feb. 28, 2024).
- [34] P. Lynch, “Watch How Bamboo Scaffolding Was Used to Build Hong Kong’s Skyscrapers,” *ArchDaily*, Aug. 15, 2016. <https://www.archdaily.com/793364/watch->

- how-bamboo-scaffolding-was-used-to-build-hong-kongs-skyscrapers?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_all (accessed Feb. 25, 2024).
- [35] “Camas de bambú.” <https://www.construccion-manualidades.com/2018/09/camas-de-bambu.html> (accessed Feb. 28, 2024).
- [36] T. L. Trinh, Y. Li, and J. Durai, *Global Priority Species of Economically Important Bamboo. INBAR technical report no. 44*. Beijing, China: International Bamboo and Rattan Organization (INBAR), 2022.
- [37] A. Harison, A. Agrawal, A. Imam, and A. Harison, “Bamboo as an Alternative to Steel for Green Construction Towards Low Cost Housing,” *J. Environ. Nanotechnol.*, vol. 6, no. 2, pp. 100–104, 2017, doi: 10.13074/jent.2017.06.172257.
- [38] S. R. Mousavi *et al.*, “Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: a review of recent case studies,” *J. Mater. Sci.*, vol. 57, 2022, doi: 10.1007/s10853-021-06854-6.
- [39] B. A. Akinyemi and T. E. Omoniyi, “Effect of moisture on thermal properties of acrylic polymer modified mortar reinforced with alkali treated bamboo fibres,” *J. Indian Acad. Wood Sci.*, vol. 15, no. 1, pp. 45–51, Jun. 2018, doi: 10.1007/S13196-018-0207-4/FIGURES/8.
- [40] S. Wadkar, “Review of Bamboo as a Reinforcement Material,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 550–555, 2023, doi: 10.22214/ijraset.2023.49087.
- [41] A. Mofidi, J. Abila, and J. T. M. Ng, “Novel advanced composite bamboo structural members with bio-based and synthetic matrices for sustainable construction,” *Sustain.*, vol. 12, no. 6, 2020, doi: 10.3390/su12062485.
- [42] J. J. Andrew and H. N. Dhakal, “Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities – A critical review,” *Compos. Part C Open Access*, vol. 7, p. 100220, 2022, doi: 10.1016/j.jcomc.2021.100220.
- [43] K. L. Chin, S. Ibrahim, K. R. Hakeem, P. S. H'ng, S. H. Lee, and M. A. Mohd Lila, “Bioenergy production from Bamboo: Potential source from Malaysia’s perspective,” *BioResources*, vol. 12, no. 3, pp. 6844–6867, 2017, doi: 10.15376/biores.12.3.6844-6867.
- [44] Y. Song, Y. G. Lee, D. S. Lee, D. T. Nguyen, and H. J. Bae, “Utilization of bamboo biomass as a biofuels feedstocks: Process optimization with yeast immobilization and the sequential fermentation of glucose and xylose,” *Fuel*, vol. 307, no. June 2021, p. 121892, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121892.
- [45] S. Hada, P. Roat, B. Chechani, S. Kumar, D. K. Yadav, and N. Kumari, “An Overview on Biomass of Bamboo as a Source of Bioenergy,” in *Biotechnology for Biofuels: A Sustainable Green Energy Solution*, N. Kumari, Ed. Springer, Singapore, 2020, pp. 1–288.
- [46] H. Espinoza, “Circular economy: an approach to its origin, evolution and importance as a model of sustainable development,” *Rev. Econ. Inst.*, vol. 25, no. 49, pp. 109–

- 134, 2023.
- [47] MIDUVI, “Déficit Habitacional Nacional – MIDUVI – Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda,” 2023. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/deficit-habitacional-nacional/> (accessed Feb. 09, 2024).
- [48] M. Carreño, “Viviendas saludables y seguras en comunidades de Manabí,” *Pastoral Social Caritas Ecuador (PSCE)*, Jul. 26, 2017. <https://www.caritasecuador.org/2017/07/viviendas-saludables-y-seguras-en-comunidades-de-manabi/> (accessed Feb. 25, 2024).
- [49] J. Morán Ubidia, “Vulnerabilidad de las viviendas de Bambú al Cambio Climático en la Costa del Ecuador.” UNIÓN EUROPEA · RED INTERNACIONAL DEL BAMBÚ Y RATÁN, Quito, p. 56, 2014.
- [50] Ministerio de Agricultura y Ganadería, Mesa Sectorial del Bambú, and Red Internacional del Bambú y el Ratán, “Ecuador: Estrategia Nacional del Bambú. Lineamientos para un desarrollo verde e inclusivo,” Quito, 2018.
- [51] “Guadua angustifolia - Guadua Bamboo.” <https://www.guaduabamboo.com/blog/guadua-angustifolia> (accessed Feb. 28, 2024).
- [52] X. Londoño, “Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambues del nuevo mundo,” *Cátedra Maestría en Construcción. Modulo Guadua, Arquitectura*,. Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [53] X. Londoño, G. C. Camayo, N. Riaño, and Y. López, “Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms,” *Bamboo Sci. Cult.*, vol. 16, no. 1, pp. 18–31, 2002, [Online]. Available: http://www.bamboo.org/publications/e107_files/downloads/ABSJournal-vol16.pdf#page=3.
- [54] L. Osorio, E. Trujillo, F. Lens, J. Ivens, I. Verpoest, and A. W. Van Vuure, “In-depth study of the microstructure of bamboo fibres and their relation to the mechanical properties,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 37, no. 17, pp. 1099–1113, 2018, doi: 10.1177/0731684418783055.
- [55] H. Chen, Y. Zhang, X. Yang, H. Ji, T. Zhong, and G. Wang, “A comparative study of the microstructure and water permeability between flattened bamboo and bamboo culm,” *J. Wood Sci.*, vol. 65, no. 1, pp. 0–14, 2019, doi: 10.1186/s10086-019-1842-0.
- [56] N. Jiyas, I. Sasidharan, K. Bindu Kumar, B. Gopakumar, M. Dan, and B. Sabulal, “Mechanical superiority of *Pseudoxynthera* bamboo for sustainable engineering solutions,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–16, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-45523-3.
- [57] D. Fengel and G. Wegener, *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, 2011.
- [58] B. G. Salas-Enríquez, A. M. Torres-Huerta, E. Conde-Barajas, M. A. Domínguez-

- Crespo, L. Díaz-García, and M. L. X. de la Negrete-Rodríguez, "Activated carbon production from the *Guadua amplexifolia* using a combination of physical and chemical activation," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 124, no. 3, pp. 1383–1398, 2016, doi: 10.1007/s10973-016-5238-8.
- [59] C. R. Ardila, M. B. Folgueras, and F. J. Fernández, "Oxidative pyrolysis of *Guadua angustifolia* Kunth," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 738–743, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2019.09.057.
- [60] G. A. E. R. Prado, F. E. Felissia, M. C. Area, T. Suirezs, and M. E. Vallejos, "Physical, Chemical and Morphological Characteristics of Bamboo Species *Guadua Trinii* and *Guadua Angustifolia* and Their Potential To Produce High-Value Products," *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 55, no. 9–10, pp. 951–959, 2021, doi: 10.35812/cellulosechemtechnol.2021.55.81.
- [61] L. Carballo, G. Kosler, and H. Echezuría, "Evaluation of mechanical properties from venezuelan *Guadua Angustifolia* Kunth," *Tekhné*, vol. 22, no. 4, pp. 15–28, 2019.
- [62] R. Lorenzo, M. Godina, L. Mimendi, and H. Li, "Determination of the physical and mechanical properties of moso, *guadua* and *oldhamii* bamboo assisted by robotic fabrication," *J Wood Sci*, vol. 66, p. 20, 2020, doi: 10.1186/s10086-020-01869-0.
- [63] D. J. F. Correal and C. Juliana Arbeláez, "Influence of age and height position on colombian *Guadua angustifolia* bambo mechanical properties," *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 12, no. 2, pp. 105–113, 2010, doi: 10.4067/S0718-221X2010000200005.
- [64] J. F. Villareal, O. S. Marasigan, R. C. Mendoza, M. A. Alipon, and W. P. Abasolo, "Morphological, anatomical, and physical properties of Iron Bamboo (*Guadua angustifolia* kunt.) grown in the Philippines," *Philipp. J. Sci.*, vol. 149, no. 3, pp. 1005–1013, 2020, doi: 10.56899/149.3a.25.
- [65] L. Sánchez, "Caracterización de las propiedades físico-mecánicas de la *Guadua angustifolia* kunth del municipio de Socorro, Santander - Colombia," Universidad Nacional de Colombia, 2018.
- [66] S. Narváez, "Caracterización De Las Propiedades Físico-Mecánicas De La *Guadua Angustifolia* Kunth Del Municipio De Oiba, Santander," Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [67] A. F. Garzón, "Caracterización físico-mecánica de la *guadua* en el municipio de Guaduas- Cundinamarca," Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [68] C. L. Ardila Pinilla, "Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima, Colombia," Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [69] C. Gauss, "Tratamento preservativo e modificacão química do bambu para fins estruturais," Universidade de Sao Paulo, 2020.
- [70] S. Viswanath, G. Joshi, P. Somasekhar, and M. R. Jagadish, "*Guadua angustifolia* Kunth : Potential bamboo species for humid tropics of peninsular india," *Inst. wood*

- Sci. Technol.*, vol. IWST Techn, no. 9, pp. 1–29, 2012.
- [71] K. F. Chung and W. K. Yu, “Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings,” *Eng. Struct.*, vol. 24, no. 4, pp. 429–442, 2002, doi: 10.1016/S0141-0296(01)00110-9.
 - [72] S. Kaminski, “Engineered bamboo houses for low-income communities in Latin America - The Institution of Structural Engineers,” *Struct. Eng.*, vol. 91, no. 10, pp. 14–23, 2013, [Online]. Available: [https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-91-\(2013\)/issue-10/engineered-bamboo-houses-for-low-income-communitie/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-91-(2013)/issue-10/engineered-bamboo-houses-for-low-income-communitie/).
 - [73] M. Ramanathan, “Hong Kong – bastion of bamboo scaffolding,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Civ. Eng.*, vol. 161, no. 4, pp. 177–183, 2008, doi: 10.1680/cien.2008.161.4.177.
 - [74] J. Correal, F. Ramirez, S. Gonzalez, and J. Camacho, “Structural behavior of glued laminated guadua bamboo as a construction material,” 2010.
 - [75] M. Mahdavi, P. L. Clouston, and S. R. Arwade, “A low-technology approach toward fabrication of Laminated Bamboo Lumber,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 257–262, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.046.
 - [76] Y. Li, J. Yao, R. Li, Z. Zhang, and J. Zhang, “Thermal and energy performance of a steel-bamboo composite wall structure,” *Energy Build.*, vol. 156, pp. 225–237, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.083.
 - [77] B. Sharma, A. Gatóo, M. Bock, and M. Ramage, “Engineered bamboo for structural applications,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 66–73, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.077.
 - [78] E. Z. Escamilla, G. Habert, and E. Wohlmuth, “When CO 2 counts : Sustainability assessment of industrialized bamboo as an alternative for social housing programs in the Philippines,” *Build. Environ.*, vol. 103, pp. 44–53, 2016.
 - [79] W. Yu and Y. Wang, “Research on the Change in Chemical Composition and Fungal Resistance of Moso Bamboo with Heat Treatment,” *Polym. 2023, Vol. 15, Page 453*, vol. 15, no. 2, p. 453, Jan. 2023, doi: 10.3390/POLYM15020453.
 - [80] R. M. Da Silva *et al.*, “Nº 2. Páginas 5-12 IDESIA (Chile) Junio,” vol. 37, 2019.
 - [81] M. Tripathy, M. Ranjan Kar, and B. Kumar Pradhan, “Control of bamboo borer *Dinoderis minutus* Fab infesting *Sal*, *Shorea robusta* in Odisha, India,” ~ 588 ~ *J. Entomol. Zool. Stud.*, vol. 8, no. 4, pp. 588–592, 2020, Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: <http://www.entomoljournal.com>.
 - [82] J. Encalada Nuñez, “Modelo de panel prefabricado en guadúa, aplicado a la industrialización de la construcción, para divisiones verticales,” UNIVERSIDAD DE CUENCA FACULTAD, 2016.
 - [83] J. C. C. Espelho and A. L. Beraldo, “Avaliação físico-mecânica de colmos de bambu tratados,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 12, no. 6, pp. 645–652, 2008, doi: 10.1590/s1415-43662008000600012.

- [84] P. J. Kaur, S. Satya, K. K. Pant, S. N. Naik, and V. Kardam, "Chemical characterization and decay resistance analysis of smoke treated bamboo species," *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 74, no. 4, pp. 625–628, Jul. 2016, doi: 10.1007/S00107-016-1029-Y/TABLES/2.
- [85] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda - MIDUVI, "Estructuras de Guadua (GaK)," Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), Quito, 2016. [Online]. Available: <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/04/NEC-SE-GUADUA-VERSION-FINAL-WEB-MAR-2017.pdf>.
- [86] J. F. Correal, *Bamboo design and construction*, vol. 10. Elsevier, 2016.
- [87] E. Setiyowati and A. B. Mappaturi, "Comparison between chemical and natural treatments for bamboo as building material towards sustainable construction method," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 456, no. 012043, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/456/1/012043.
- [88] T. K. H. Tang and W. Liese, "Pressure treatment of bamboo culms of three vietnamese species with boron and CCB preservatives," *J. Bamboo Ratt.*, vol. 10, no. 1–2, pp. 63–76, 2011.
- [89] D. Venmalar, "Preservative treatment of bamboo for value addition," in *Value addition bamboo technologies*, D. S. R. Shukla, Ed. Bengaluru: Institute of Wood Science and Technology, 2020, pp. 7–85.
- [90] R. F. González-Laredo, M. Rosales-Castro, N. E. Rocha-Guzmán, J. A. Gallegos-Infante, M. R. Moreno-Jiménez, and J. J. Karchesy, "Wood preservation using natural products," *Maderas y Bosques*, vol. 21, no. Núm.esp., pp. 63–76, 2015, doi: 10.1201/9781420017373.pt1.
- [91] J. H. Matsuoka, "Avaliação da eficiência do ácido pirolenhoso no tratamento preservativo de taliscas de bambu gigante contra a deterioração por fungos," Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- [92] F. Caldeira, "Boron in Wood Preservation A Review in its Physico-Chemical Aspects," *Silva Lusit.*, vol. 18, no. 2, pp. 179–196, 2010.
- [93] M. A. . Handana, B. Surbakti, and R. Karolina, "The Effect of Borax Solution as Preservative to the Mechanical Properties of Bamboo," *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 79–88, Sep. 2020, doi: 10.30880/ijscet.2020.11.02.009.
- [94] L. J. Guzmán, R. U. Enríquez, O. M. Mosquera, and J. C. Camargo García, "Concentraciones de una solución preservante a base de ácido bórico y bórax. Evaluación en culmos de Guadua angustifolia," *Recur. Nat. y Ambient.*, 2012.
- [95] J. Simisterra, R. Cervantes, L. Ona, and D. Lajones, "Borax and boric acid impregnation into Guadua angustifolia Kunth cane by immersion method," *Manglar*, vol. 19, no. 1, pp. 91–98, 2022, doi: 10.17268/manglar.2022.012.
- [96] T. Morales-Pinzón, L. F. Durán, and C. A. Alzate, "Efectividad de la preservación de Guadua angustifolia en el Eje Cafetero colombiano por el método de inmersión-

- difusión,” *Recur. Nat. y Ambient.*, no. 65, pp. 51–55, 2012, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11554/7066>.
- [97] S. N. Li, Y. M. Zhang, Y. L. Yu, and W. J. Yu, “Effect of Boiling Treatment on Physical and Mechanical Properties of Moso Bamboo,” *Chinese J. Wood Sci. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 59–64, 2021, doi: 10.12326/j.2096-9694.2020158.
- [98] X. Wang *et al.*, “Effect of high-temperature saturated steam treatment on the physical, chemical, and mechanical properties of moso bamboo,” *J. Wood Sci.*, vol. 66, no. 1, 2020, doi: 10.1186/s10086-020-01899-8.
- [99] Y. M. Zhang, Y. L. Yu, and W. J. Yu, “Effect of thermal treatment on the physical and mechanical properties of phyllostachys pubescen bamboo,” *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 71, no. 1, pp. 61–67, Jan. 2013, doi: 10.1007/s00107-012-0643-6.
- [100] C. T. Nguyen, A. Wagenführ, L. X. Phuong, V. H. Dai, M. Bremer, and S. Fischer, “The effects of thermal modification on the properties of two vietnamese bamboo species, Part I: Effects on physical properties,” *BioResources*, vol. 7, no. 4, 2012, doi: 10.15376/biores.7.4.5355-5366.
- [101] X. Li, H. Peng, S. Niu, X. Liu, and Y. Li, “Effect of High-Temperature Hydrothermal Treatment on Chemical, Mechanical, Physical, and Surface Properties of Moso Bamboo,” *Forests*, vol. 13, no. 5, 2022, doi: 10.3390/f13050712.
- [102] Q. Xu, L. Chen, K. A. Harries, and X. Li, “Combustion performance of engineered bamboo from cone calorimeter tests,” *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 75, no. 2, pp. 161–173, 2017, doi: 10.1007/s00107-016-1074-6.
- [103] X. Li *et al.*, “The physical, mechanical and fire performance of bamboo scrimber processed with thermal-treated bamboo bundles,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 205, no. 498, p. 117549, 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117549.
- [104] D. Li, S. Yang, Z. Liu, Z. Wang, N. Ji, and J. Liu, “Effects of Heat Treatment under Different Pressures on the Properties of Bamboo,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 14, 2023, doi: 10.3390/polym15143074.
- [105] Y. Huang, F. Meng, R. Liu, Y. Yu, and W. Yu, “Morphology and supramolecular structure characterization of cellulose isolated from heat-treated moso bamboo,” *Cellulose*, vol. 26, no. 12, pp. 7067–7078, 2019, doi: 10.1007/s10570-019-02614-7.
- [106] J. L. Wen *et al.*, “Comparative study of alkali-soluble hemicelluloses isolated from bamboo (*Bambusa rigida*),” *Carbohydr. Res.*, vol. 346, no. 1, pp. 111–120, 2011, doi: 10.1016/j.carres.2010.10.006.
- [107] J. Li *et al.*, “Dynamic in-situ Formation of Cu₂O Sub-Nanoclusters through Photoinduced pseudo-Fehling’s Reaction for Selective and Efficient Nitrate-to-Ammonia Photosynthesis,” *Angew. Chemie*, p. e202317575, 2023, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266572705>.
- [108] Q. Feng, Y. Huang, C. Ye, B. Fei, and S. Yang, “Impact of hygrothermal treatment

- on the physical properties and chemical composition of Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*),” no. 35, 2020.
- [109] L. Haurie, A. Avellaneda, and J. Monton, “Fire Behavior of Bamboo, *Guadua angustifolia*,” in *Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety 2020* 9, 2020, pp. 103–108.
- [110] A. Avellaneda, L. Haurie, and J. Montón, “Comportamiento al fuego del bambú, *Guadua angustifolia*,” *Congr. LIGNOMAD Congr. sobre construcción con madera y otros Mater. lignocelulósicos*, no. 5, pp. 211–215, 2019, [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/178588>.
- [111] G. Sandin, G. M. Peters, and M. Svanström, *Life Cycle Assessment of Forest Products: Challenges and Solutions*, vol. 72, no. 2. 2016.
- [112] A. Hernández Londoño, J. A. Montoya Arango, and J. C. Camargo García, “Análisis del ciclo de vida aplicado a la fase de extracción de guadua, en el Eje Cafetero colombiano,” *Recur. Nat. y Ambient.*, vol. 1, no. 65–66, pp. 68–76, 2015, [Online]. Available: [https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7069/Analisis del ciclo de vida aplicado a la fase de extraccion de guadua en el eje cafetero colombiano.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7069/Analisis%20del%20ciclo%20de%20vida%20aplicado%20a%20la%20fase%20de%20extraccion%20de%20guadua%20en%20el%20eje%20cafetero%20colombiano.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [113] 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 Trans. Built Environ.*, vol. 142, pp. 447–457, 2014, doi: 10.2495/ARC140381.
- [114] A. Restrepo, R. Becerra, and J. E. G. Tibaquirá, “Energetic and carbon footprint analysis in manufacturing process of bamboo boards in Colombia,” *J. Clean. Prod.*, vol. 126, pp. 563–571, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.144.
- [115] A. . Radzi *et al.*, “Bamboo-Fiber-Reinforced Thermoset and Thermoplastic Potential Applications,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, p. 1387, 2022.
- [116] R. M. Abhilash, G. S. Venkatesh, and S. S. Chauhan, “Development of bamboo polymer composites with improved impact resistance,” *Polym. Polym. Compos.*, vol. 29, no. 9_suppl, pp. S464–S474, 2021, doi: 10.1177/09673911211009369.
- [117] F. Ramirez, M. Gonzalez, A. Maldonado, and J. Nivia, “Bamboo-*Guadua* fibers for composites,” *ECCM 2012 - Compos. Venice, Proc. 15th Eur. Conf. Compos. Mater.*, no. June, pp. 24–28, 2012.
- [118] 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,” *Rev. Mex. Ciencias For.*, vol. 7, no. 38, pp. 95–110, 2016.

[119] H. Takagi, S. Kako, K. Kusano, and A. Ousaka, "Thermal conductivity of PLA-bamboo fiber composites," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 16, no. 4, pp. 377–384, 2007, doi: 10.1163/156855107782325186.



Capítulo 2. Objetivos

- Introducción
- Objetivo general
- Objetivos específicos

2 Objetivos

Este capítulo establece los objetivos que han dirigido el enfoque de la investigación sobre el uso de la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK) dentro de la economía circular, proponiéndola como una alternativa sostenible en la construcción. El estudio se estructura sobre tres pilares fundamentales: el desarrollo de tratamientos para incrementar la durabilidad del material, la evaluación de su sostenibilidad a través del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), y la innovación en materiales compuestos utilizando residuos de bambú.

2.1 Objetivo general

El propósito principal de esta investigación es desarrollar y perfeccionar técnicas y aplicaciones sostenibles que mejoren la resistencia y la utilidad de la *Guadua angustifolia* Kunth. Este trabajo busca promover el uso responsable de este recurso y contribuir al avance industrial en regiones donde la guadua es abundante, fomentando su adopción en prácticas de construcción sostenible.

2.2 Objetivos específicos

- Optimización de TT y TTQ
 1. Evaluar cómo la duración del tratamiento térmico en ebullición a presión atmosférica afecta las características químicas y morfológicas de la GaK.
 2. Investigar los efectos de un TTQ sobre la GaK
 3. Examinar cómo estos tratamientos influyen las propiedades mecánicas del material y su comportamiento frente al fuego.
- Realizar un ACV de productos de bambú.
 1. Evaluar la sostenibilidad ambiental de los tableros de bambú producidos en Santa Elena, Ecuador, adoptando un enfoque de análisis puerta a puerta.
 2. Identificar oportunidades para mitigar los impactos ambientales asociados con la producción de bambú y proponer mejoras concretas basadas en los resultados del ACV.

- Desarrollar materiales compuestos aprovechando residuos de GaK.
 1. Determinar la viabilidad de desarrollar materiales compuestos integrando fibras de bambú en matrices poliméricas
 2. Evaluar las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales compuestos desarrollados, identificando su potencial para aplicaciones en el campo de la construcción.

Los objetivos formulados se derivan de los desafíos observados en la utilización de la GaK en comunidades como Santa Elena, Ecuador, donde a pesar de su abundancia, su uso se ve limitado por problemas de durabilidad, estandarización, percepciones de bajo valor y sostenibilidad. La investigación apunta a ofrecer soluciones prácticas y validadas científicamente que beneficien tanto a la comunidad científica como a la industria local y global del bambú.

La metodología adoptada implica el uso de materiales experimentales y técnicas avanzadas para estudiar las propiedades de la GaK y su aplicación en materiales de construcción sostenibles. Se emplearán técnicas como la caracterización química, morfológica, térmica y mecánica para evaluar las modificaciones en las propiedades de la guadua y los materiales compuestos resultantes.

Se anticipa que los resultados de esta investigación proporcionarán nuevas perspectivas sobre la optimización del uso de bambú, mejorando su aplicación en la construcción y otros campos, y promoviendo prácticas de desarrollo sostenible.

Capítulo 3. Metodología



- Introducción
- Materiales
- Experimentos
- Técnicas experimentales de caracterización
- Análisis de ciclo de vida
- Bibliografía

3 Metodología

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología experimental empleada, detallando los materiales, experimentos y técnicas utilizadas en el estudio. La investigación se concentra en la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK) proveniente de Ecuador, considerada como una alternativa viable para soluciones de construcción sostenible. El estudio se estructura en tres etapas distintas:

1. TT y TTQ de láminas de GaK: En esta fase, se llevaron a cabo TT y TTQ sobre láminas de guadua para modificar sus propiedades.
2. Análisis del ciclo de vida (ACV) de tableros laminados de GaK: Se realizó un ACV de los tableros laminados elaborados a partir de GaK, evaluando su desempeño ambiental y su viabilidad como material de construcción sostenible.
3. Elaboración de materiales compuestos con fibras de bambú en una matriz polimérica: Esta etapa se llevó a cabo la fabricación de materiales compuestos mediante la incorporación de fibras de bambú en una matriz polimérica.

Los experimentos se centran en el estudio de las propiedades mecánicas, químicas, térmicas, morfológicas de la GaK tras los tratamientos, así como también en la evaluación mecánica y térmica de los compuestos.

3.2 Materiales

3.2.1 Láminas de GaK

Se seleccionó GaK de 4 años, originaria de Dos Mangas, provincia de Santa Elena, Ecuador. Se eligieron guaduas en buen estado, cortadas a más de 800 mm sobre el nivel de las raíces, extrayendo culmos con valores aproximados de: 6000 mm de largo, espesor de pared de 100 mm y un diámetro de 120 mm. Estos culmos fueron divididos longitudinalmente con una sierra eléctrica en latillas de 1220 mm de largo, 30 mm de ancho y el espesor del culmo. Posteriormente se eliminó la piel interior y exterior de las tiras mediante la técnica del cepillado, reduciendo su espesor a 7 mm. Para facilitar su manejo y transporte a la Universidad de Barcelona, España, donde se realizó la

investigación, se redujo la longitud de las láminas a 600 mm. Estas se secaron a temperatura ambiente de 25 °C hasta alcanzar un equilibrio higroscópico. La Figura 3.1 ilustra imágenes del proceso de acondicionamiento de las láminas de bambú desde la plantación hasta obtener las láminas.



Figura 3.1 Proceso de acondicionamiento de láminas de bambú desde la plantación hasta obtener las láminas.

3.2.2 Aserrín de GaK

EL aserrín derivado del corte de los culmos de la GaK en la fabricación de tableros laminados, fue el residuo seleccionado para la posterior elaboración de las mezclas con el polímero. Tras su recolección, el aserrín fue sometido a un proceso de secado a temperatura ambiente de 25 °C, seguido de un tamizado utilizando un tamiz con una malla de 750 µm. Este tamaño permite aprovechar más del 80% del residuo sin tenerlo que volver a triturar y presenta una buena manejabilidad durante el proceso, lo que justifica su elección sobre tamaños mayores o menores. Este procedimiento se llevó a cabo con el propósito de preparar el aserrín para su integración en las mezclas con el polímero de manera adecuada y homogénea.

3.2.3 Polímero

El polímero empleado como matriz de los materiales compuestos pertenece a la familia de los termoplásticos elastómeros, específicamente el copolímero etileno-1-buteno (EB) de DEX Plastomers S.L. Los plastómeros se caracterizan por su elevada ductilidad, lo que permite la incorporación de una mayor cantidad de carga, y por su baja densidad

presentando propiedades intermedias entre los elastómeros y los termoplásticos convencionales como el polietileno [1]. En la Tabla 3.1 se detallan las especificaciones técnicas del copolímero.

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del copolímero EB de DEX Plastomers [1].

Especificaciones	Valor
Densidad (g/cm ³)	0,882
Dureza Shore A	84
Índice de fluidez (190 C, 2,16 kg, g/10 min)	1,1
Contenido de comonomero (%p)	29

La selección de este polímero se basó en consideraciones específicas, como la baja temperatura de fusión (t_f) y el índice de fluidez (*Melt Flow Index*, MFI) reducido, factores cruciales para asegurar una adecuada manipulación en los procesos de mezclado mediante mezcladoras de palas o extrusoras.

3.3 Experimentos

3.3.1 Tratamientos de láminas de GaK

La investigación se fundamentó en la optimización de procesos y en criterios de sostenibilidad para la fabricación de tableros laminados de GaK en Santa Elena, Ecuador. Actualmente, en la producción de estos tableros, las láminas se someten a un tratamiento hidrotérmico en agua en ebullición durante 120 min. Sin embargo, las implicaciones de este tratamiento en las propiedades del bambú no están bien definidas, y su eficacia aún no ha sido confirmada.

Por tanto, se propone un enfoque para entender la situación actual y para explorar escenarios que optimicen el proceso y sean sostenibles. Con este fin, se estudió la influencia de la variable tiempo en el tratamiento de ebullición, y la incorporación de una solución de ácido bórico y bórax en el tratamiento térmico para comparar su efectividad versus el tratamiento térmico. La Tabla 3.2 presenta el detalle de los tratamientos estudiados.

Tabla 3.2 Tratamientos estudiados

Tipo de tratamiento	Tiempo (min)	Nomenclatura	No. de Probetas	Peso (g)
Grupo de control	-	GC	20	87,77
Térmico	30	TT30	20	86,94
Térmico	60	TT60	20	84,04
Térmico	90	TT90	20	91,10
Térmico	120	TT120	20	92,59
Térmico – Químico	60	TTQ60	20	90,34

3.3.1.1 Acondicionamiento de las Probetas

Las probetas se prepararon siguiendo el estándar GB/T 15780-1995 [2], que estipula los métodos de prueba para propiedades físicas y mecánicas del bambú. La Figura 3.2 ilustra una imagen de las probetas.

Se utilizó material de la zona entre los nodos de la guadua, dimensionando las probetas en 160 x 10 x 5 mm (largo, ancho, espesor). Cada probeta se identificó con una letra, se pesó en una balanza electrónica con precisión de 0,0001 g y sus dimensiones se midieron con un micrómetro de tornillo con precisión de 0,01 mm.



Figura 3.2 Probetas de láminas de bambú antes del tratamiento térmico.

Se tomaron tres medidas para cada dimensión, calculando luego el promedio para su uso en análisis estadísticos. Las mediciones se realizaron en los extremos y la parte

central de las probetas, marcando los puntos de medición para mantener una referencia constante.

3.3.1.2 Tratamiento térmico

Las probetas preparadas se sometieron a un tratamiento hidrotermal a presión atmosférica, variando los tiempos de ebullición entre 30, 60, 90 y 120 min. En cada experimento se emplearon 20 probetas. El procedimiento se llevó a cabo en una estufa eléctrica equipada con un panel para controlar la temperatura y el tiempo. Se utilizó un recipiente de aluminio de 150 mm de diámetro y 200 mm de altura, donde se colocaron 1400 ml de agua destilada y se llevó a ebullición.

Las probetas se sumergieron horizontalmente en una rejilla de plástico (Figura 3.3a) y se aseguró su completa inmersión con un peso sobre la rejilla (Figura 3.3b). Se colocó una tapa al recipiente para evitar excesivas pérdidas por evaporación (Figura 3.3c). Después de completar el tiempo de ebullición, se retiraron las probetas y se les permitió reposar durante 60 min antes de medir nuevamente sus dimensiones y peso. Posteriormente, se secaron en una estufa eléctrica (Nahita, Modelo 632 Plus) a 103 °C (Figura 3.3d) hasta alcanzar un contenido de humedad constante, momento en el que se registraron nuevamente las dimensiones y la masa.



Figura 3.3 Tratamiento térmico de láminas de bambú a) Ubicación de probetas en rejilla plástica. b) peso sobre rejilla para mantener la inmersión. c) recipiente tapado. d) secado de probetas.

3.3.1.3 Tratamiento químico

Para el tratamiento químico, se preparó una solución al 5% de bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) y ácido bórico (H_3BO_3) en una relación de 1:1 en masa, 20 probetas fueron sometidas a

ebullición en esta solución durante 60 min, siguiendo los mismos procedimientos descritos anteriormente para el tratamiento térmico. Este método permite una distribución homogénea de los compuestos de boro y ácido bórico en el material de prueba.

3.3.2 Compuestos con fibras de bambú en una matriz polimérica

En concordancia con los principios de sostenibilidad y la búsqueda de soluciones para la gestión de residuos de bambú como el aserrín que se genera en la industria de tableros, se optó por investigar la utilización de matrices poliméricas en combinación con fibras de bambú. Las fibras de bambú demuestran un enorme potencial [3]-[6] como fase de refuerzo en materiales compuestos de matrices poliméricas, los compuestos reforzados con fibras naturales, especialmente el bambú, son un material alternativo sostenible para competir con los materiales convencionales. Se considera que este enfoque representa los primeros pasos hacia un campo de investigación emergente en el contexto del aprovechamiento de los residuos de los culmos de GaK, particularmente en la planta ubicada en Santa Elena.

Considerando variaciones en los porcentajes de fibra y polímero, se plantean tres combinaciones para la incorporación de fibras en la matriz polimérica. La Tabla 3.3 expone los porcentajes en peso de las materias primas para las mezclas propuestas.

Tabla 3.3 Porcentajes en peso de las materias primas para las mezclas propuestas.

Referencia	EB (p/p)	GaK (p/p)
M30	70	30
M40	60	40
M50	50	50

3.3.2.1 Elaboración de los materiales compuestos

El procedimiento para obtener los materiales compuestos se realizó en dos fases principales. Inicialmente, se mezclan las fibras de GaK con el EB, usando una mezcladora de palas (Figura 3.4) equipada con una camisa de aceite térmico. Esta mezcla (Figura 3.5) se prepara en lotes de 300 g para cada formulación, según las especificaciones detalladas en la

Tabla 3.4. En la segunda fase, las mezclas se sometieron a un proceso de prensado en caliente (Figura 3.6) para conformar láminas de 150 mm de largo, 150 mm de ancho y 3 mm de espesor. Posteriormente, con un molde metálico se obtuvieron las probetas específicas para los diferentes ensayos.



Figura 3.4 Mezcladora de palas.



Figura 3.5 Detalle de la cuba operando.

Tabla 3.4 Condiciones de operación de la mezcladora.

Parámetro	Valor
Velocidad de rotación (rpm)	55
Temperatura de la mezcla (°C)	130 - 140
Temperatura del aceite (°C)	180



Figura 3.6 Prensa de platos calientes.

3.4 Técnicas experimentales de caracterización

3.4.1 Técnicas de caracterización química

Las alteraciones en la composición química del bambú debido a los tratamientos fueron evaluadas mediante dos enfoques complementarios: el análisis de la composición del agua de cocción y el análisis de las láminas de bambú tras los TT y TTQ. A través de estas técnicas se busca identificar posibles cambios en la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina inducidos por los tratamientos aplicados, sustancias claves en el desempeño y durabilidad del bambú.

El método Fehling A-Fehling B se empleó para determinar la cantidad de azúcares reductores (AR) liberados durante la cocción, presumiblemente provenientes en su mayor parte de almidones y de la hemicelulosa debido a su menor estabilidad térmica. Se utilizó la resonancia magnética nuclear de estado líquido (RMN) para comparar la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina en el agua de cocción entre los diferentes tratamientos. Estos análisis se complementaron con espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (*Fourier-transform Infrared spectroscopy*, FT-IR) en las láminas de bambú. Este enfoque integral permite una evaluación complementaria de las propiedades químicas del bambú, proporcionando información crucial para comprender el impacto de los tratamientos en su composición química.

3.4.1.1 Método Fehling A Fehling B

La evaluación cuantitativa de AR presentes en el líquido resultante del tratamiento térmico del bambú fue realizada aplicando el método de Fehling A y B [7]. Este método analítico se basa en la capacidad reductora de los azúcares ante iones cúpricos (Cu^{2+}), los cuales son reducidos a óxido cuproso (Cu_2O) y conllevan a un cambio en la absorbancia que puede ser cuantificado por espectrofotometría.

Inicialmente, se utilizó papel filtro para eliminar los sólidos en suspensión del agua después de la cocción. Posteriormente, el líquido filtrado se llevó a un volumen de 500 ml en un matraz aforado. Para el análisis, se tomó una muestra de 50 ml de agua de tratamiento térmico y se redujo su volumen a 20 ml mediante evaporación en una placa calefactora eléctrica para obtener una solución menos diluida. Luego se utilizó un filtro de 40 μm para purificar aún más la solución y disminuir las impurezas que podrían afectar el análisis.

El ensayo se realizó utilizando 1 ml de la solución Fehling A, 1 ml de la solución Fehling B y 1 ml de muestra, los cuales fueron colocados en un tubo de ensayo y se incubaron en un baño maría durante 3 min para que se produzca la reacción de oxidación. Cada ensayo se repitió dos veces.

Para la cuantificación de azúcares, se elaboró una recta de calibración utilizando xilosa ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_5$) en 10 puntos de concentración (1-10 mg/ml). Se eligió xilosa por ser uno de los principales monosacáridos en la hemicelulosa del bambú. Al igual que en los ensayos se empleó la misma cantidad de Fehling A, Fehling B y de xilosa. Se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis Agilent Cary 60 para la medición, con un rango de escaneo de número de onda establecido entre 200 y 800 nm, y se estableció la absorbancia de la mezcla de las sustancias de Fehling A, Fehling B como la referencia con una longitud de onda en 660 nm.

Haciendo uso de la relación entre el volumen de una solución y la concentración de un soluto expresada en la Ecuación 3.1, se determinó la concentración de AR en mg/ml,

correspondiente a la masa de las 20 probetas en cada tratamiento. Posteriormente, esta información se utilizó para calcular la extracción de AR por gramo de bambú.

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde,

C1 es la concentración inicial (mol/L),

V1 es el volumen inicial (L),

C2 es la concentración fina (mol/L), l, y

V2 es el volumen final (L).

Este método proporciona una evaluación significativa de los AR presentes en el agua de tratamiento térmico, permitiendo así el seguimiento de los cambios químicos inducidos por los tratamientos aplicados.

3.4.1.2 Resonancia Magnética Nuclear de Carbono-13 (RMN ¹³C)

El agua resultante del tratamiento térmico concentrada a 20 ml y filtrada a 40 µm, procedimiento descrito en el apartado 0 fue el material analizado. Las muestras para el análisis por RMN ¹³C estuvieron compuestas por 0,5 ml de agua de cocción de bambú, 0,2 ml de deuterio (D₂O) como disolvente y 0,1 ml de tetrametilsilano (TSP) (C₄H₁₂Si) a una concentración de 40 mg/ml como referencia de calibración.

Los espectros de RMN ¹³C se obtuvieron en un espectrómetro Bruker de 400 MHz. El espectrómetro está equipado con una sonda Z122623_0019 (CPP BBO 400S1 BB-H&F-D-05 Z). El espectro de RMN ¹³C se registró a 25 °C después de 4000 exploraciones. Se utilizó un ángulo de inversión de pulso de 30°, un ancho de pulso de 7,80 µs, un tiempo de retardo entre exploraciones de 1,00 s, el tiempo de adquisición fue de 1,36 s y el ancho espectral fue de 24038.5 HZ. Se utilizó el software MestReNova v6.02-5475 para el análisis.

3.4.1.3 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (*Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR*)

Para el análisis de FT-IR, se utilizó un espectrómetro PerkinElmer Spectrum Two FT-IR. El material analizado fue polvo de bambú tamizado a 500 μm , obtenido mediante el aserrado de las muestras con una sierra manual. El rango de escaneo de número de onda del análisis FT-IR se estableció entre 4000 y 450 cm^{-1} , con 32 escaneos a una resolución de 4 cm^{-1} . Se utilizó la base de datos del software KnowItAll(R) Informatics System 2023, Wiley para el análisis.

3.4.2 Técnicas de caracterización morfológica

3.4.2.1 Microscopia electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscopy, SEM*)

Para examinar la microestructura de la GaK en sus formas tratada y no tratada, se empleó un microscopio electrónico de barrido de efecto campo (*Field Emission Scanning Electron Microscopy, FESEM*), modelo JEDL J-7100, con el cual se pretendió obtener una imagen de alta resolución mediante electrones secundarios de la superficie del corte. Las probetas, con dimensiones de 10 x 10 x 5 mm, fueron cuidadosamente preparadas utilizando un estilete y una prensa para garantizar cortes precisos y superficies lisas. Posteriormente, estas probetas se sometieron a un proceso de secado en un horno a 103 °C durante 2 h. Para conseguir que las muestras fueran conductoras, se aplicó un recubrimiento de carbono sobre las superficies de las probetas con un evaporador de varillas de grafito modelo 208 Carbon Turbo de la marca Cressington. Se examinó una probeta por cada grupo de tratamiento.

3.4.3 Técnicas de caracterización Térmica

3.4.3.1 Análisis termogravimétrico (*Derivative Thermogravimetric Analysis, TGA*)

La técnica de TGA permite medir los cambios de masa de una muestra bajo condiciones controladas de temperatura y atmósfera. Esta variación puede ser la pérdida o ganancia

de masa debido a fenómenos como la descomposición, la evaporación o reacciones químicas [8].

Para llevar a cabo los análisis termogravimétrico y termogravimétrico diferencial (TG/DTG), se empleó un instrumento Q-600 SDT de TA Instruments (New Castle, DE, EE. UU.). Las mediciones se efectuaron en un rango de temperatura de 25 °C a 1000 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, en una atmósfera de nitrógeno y un flujo de gas de 50 ml/min. Se prepararon las muestras utilizando crisoles de alúmina estándar, conteniendo aproximadamente 11 mg de peso cada una. Se utilizó el software TA Instruments TRIOS versión 5.1.1.46572 para el análisis.

3.4.3.2 Calorimetría diferencial de barrido (*Differential Scanning Calorimetry, DSC*)

La técnica DSC mide la diferencia en la cantidad de calor requerida para aumentar la temperatura de una muestra en comparación con un material de referencia. Se usa ampliamente para estudiar las transiciones de fase de los materiales, como la fusión y la cristalización, y también para observar transiciones de vidrio y otras reacciones químicas. DSC es crucial para determinar la pureza de los materiales, estudiar el curado de polímeros y evaluar la estabilidad térmica y las propiedades térmicas de los materiales [9].

Para analizar el comportamiento termo físico se empleó un equipo DSC 3+ de Mettler Toledo. Las mediciones se llevaron a cabo en un rango de temperatura de -30 °C a 200 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min, bajo un flujo de nitrógeno de 50 ml/min y se repitieron por tres ciclos. Se usaron crisoles de alúmina sellados de 100 µL.

3.4.3.3 Conductividad térmica

Las fibras de bambú pueden alterar la matriz polimérica, afectando tanto las propiedades mecánicas como las térmicas del compuesto. Además, En la construcción y en la fabricación de componentes, los materiales con una adecuada conductividad térmica ayudan a mejorar la eficiencia energética de los edificios y dispositivos al facilitar un mejor

manejo del calor, de ahí la importancia de conocer la conductividad térmica de los materiales compuestos.

Se utilizó un analizador Hot Disk TPS2200, que aplica el método de fuente plana transitoria [10], para determinar la conductividad térmica de las muestras. Este dispositivo está equipado con un sensor Kapton 7577 y se configuró a una potencia de 20 mW durante un periodo de medición de 5 s. Las dimensiones de las muestras fueron de 20 x 20 x 3 mm, realizando tres mediciones por cada una de las tres muestras. Todas las pruebas se efectuaron en condiciones ambientales controladas, con temperaturas entre 19,5 y 20,5 °C.

3.4.3.4 Determinación del índice de oxígeno limitante (*Limiting Oxygen Index, LOI*)

El LOI es una medida de la inflamabilidad de los materiales. Se determina experimentando con la muestra en una atmósfera controlada de oxígeno y nitrógeno. El LOI indica la concentración mínima de oxígeno, expresada en porcentaje, necesaria para mantener la combustión de la muestra una vez que ha sido encendida [11].

Para determinar el LOI, se siguió la norma ISO UNE-EN 4589-2 [12], utilizando probetas que fueron acondicionadas en cámara climática a 23°C y 50% de humedad relativa durante al menos 24 h. Las dimensiones de las probetas fueron de 70 x 10 x 5 mm para las láminas de GaK y de 70 x 10 x 3 mm para las mezclas y el polímero. Según la norma, los criterios de aceptación incluyen un periodo de quema de hasta 180 s, un periodo de brillo también de hasta 180 s, y una longitud quemada no superior a 50 mm. Materiales con un LOI menor a 20.95% se consideran combustibles, aquellos con un LOI entre 20,95 y 28% son de combustión lenta, y los que tienen un LOI superior a 28% son autoextinguibles [13]. La Figura 3.7 ilustra un ensayo de esta prueba.



Figura 3.7 Ensayo de LOI de una lámina de GaK sometida al tratamiento TTQ60.

3.4.3.5 Técnica de epirradiador

El ensayo epirradiador, definido en la norma UNE-EN 23-725-90 [14], es un método para evaluar la respuesta de los materiales al fuego. Este ensayo somete las muestras a una fuente de calor radiante constante para observar la ignición de gases y la reacción de llama. Se monitorean parámetros como la duración y el número de igniciones, así como el tiempo hasta la primera ignición y el porcentaje de peso de residuo, proporcionando datos cruciales sobre la capacidad del material para resistir y autoextinguir la llama. Las muestras se colocan en una rejilla metálica a 3 cm bajo un radiador de 500 W, durante 5 min o hasta que se consuman totalmente, lo que ocurra primero. Las probetas fueron acondicionadas previamente por 24 h a 23°C y 50% de humedad relativa. Se efectuaron tres réplicas por escenario

3.4.4 Técnicas de caracterización mecánica

Los ensayos mecánicos fueron realizados utilizando una maquina universal Zwick/Roell SmartPro. La Figura 3.8 ilustra la máquina de ensayos universales.



Figura 3.8 Máquina de ensayos universales Zwick/Roell.

3.4.4.1 Ensayo de flexión a tres puntos

El ensayo de flexión a tres puntos mide la resistencia a la flexión de un material aplicando una carga uniformemente distribuida entre dos puntos de apoyo mientras un tercer punto central aplica una fuerza descendente hasta que la muestra se fractura o deforma. Este método es fundamental para evaluar las propiedades mecánicas como la resistencia y la rigidez de diferentes materiales. La Tabla 3.5 presenta las dimensiones y el número de probetas ensayadas para cada escenario, así como las condiciones operativas del ensayo.

Tabla 3.5 Especificaciones y condiciones de ensayo para materiales compuestos y láminas de GaK.

Material	Dimensiones (l, a, e) (mm)	Número de muestras	Celda de Carga (kN)	Velocidad (mm /min)	Distancia entre soportes (mm)	Normas
Láminas de GaK	160 x 10 x 5	20	10	4	120	GB/T 15780- 1995 [2][15][16]
Compuestos Polímero/GaK	80 x 13 x 3	7	0,2	1,3	48	D790-10 [17]

La Figura 3.9 muestra las probetas de láminas de GaK previas a los ensayos.



Figura 3.9 Probetas de láminas de GaK para ensayos de flexión.

La resistencia a flexión (σ_f) y el módulo de elasticidad (E) se calcularon de acuerdo con la ecuación Ecuación 3.2 y Ecuación 3.4.

Ecuación 3.2

$$\sigma_f = \frac{FL}{CZ}$$

Donde:

σ_f – Resistencia a flexión (MPa)

F - Carga máxima aplicada en el punto de falla (N)

L - Distancia entre los apoyos (mm)

C - Factor de corrección para probetas rectangulares en ensayos a tres puntos, con un valor de 4.

Z – Sección estática del módulo de flexión (mm³). Z en probetas de forma rectangular se calcula de acuerdo con la Ecuación 3.3

Ecuación 3.3

$$Z = \frac{bh^2}{6}$$

Donde:

b - Ancho de la probeta (mm)

h - Espesor de la probeta (mm)

Ecuación 3.4

$$E = \frac{FL^3}{\delta C_1 I}$$

Donde:

E - Módulo de elasticidad (MPa)

F – Máxima carga en la región elástica (N)

L - Distancia entre los apoyos (mm)

δ – Deformación relacionada a la máxima carga en la región elástica (mm)

C₁ - Constante para probetas rectangulares en ensayos a tres puntos, valorada en 48.

I - Momento de inercia, en mm⁴. El momento de inercia para probetas de forma rectangular se calcula de acuerdo con la Ecuación 3.5

Ecuación 3.5

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

I- Momento de inercia, en mm⁴

b - Ancho de la probeta (mm)

h - Espesor de la probeta (mm).

Para el análisis de las propiedades mecánicas de los compuestos de GaK con EB en relación con materiales alternativos del mismo tipo, se comparó el módulo de elasticidad y la densidad del bambú con otros materiales compuestos de EB y fibras cortas de

bambú, empleando el software Ansys GRANTA Selector, proporcionado por ANSYS, Inc., Cambridge, UK, 2024 [18].

3.4.4.2 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción evalúa la resistencia de un material al estiramiento hasta su ruptura. Este procedimiento implica aplicar una fuerza axial a ambos extremos de la muestra, registrando simultáneamente la tensión y la elongación hasta la fractura. Es fundamental para determinar la resistencia a la tracción y el alargamiento porcentual de las probetas. Los ensayos fueron conducidos según la norma ASTM D638-22 [19]. Se utilizó una celda de carga de 10 KN y una velocidad de 500 mm/min. La Figura 3.10 ilustra las probetas ensayadas.

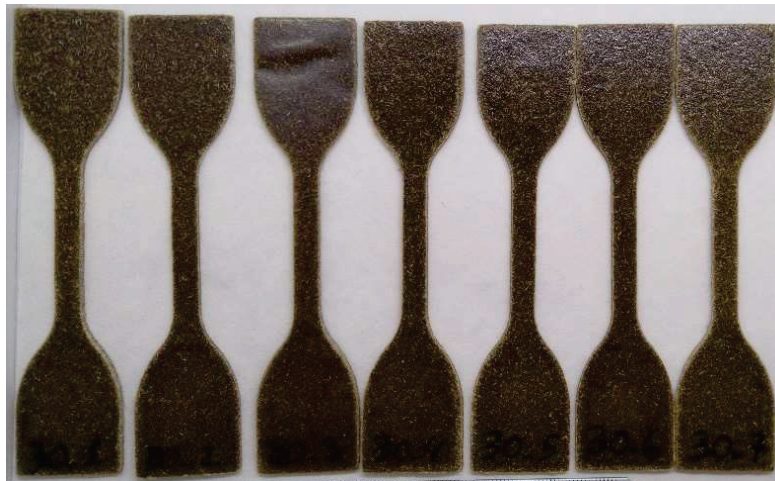


Figura 3.10 Probetas para ensayos de tracción.

3.4.5 Técnica de análisis biológico

Los análisis biológicos son fundamentales para identificar la susceptibilidad del bambú a la contaminación por agentes patógenos, lo que es crucial para determinar la necesidad de aplicar tratamientos preservativos. Estos tratamientos son esenciales para prolongar la vida útil del bambú y mantener su calidad, asegurando así su viabilidad para usos futuros.

En el análisis biológico, las aguas de cocción del bambú tratadas mediante los métodos TT60 y TTQ60 fueron cultivadas en Columbia agar con 5% de sangre de oveja. Se eligió

estos tratamientos para evaluar la técnica del TT y del TTQ durante el mismo tiempo de tratamiento. Este proceso se llevó a cabo en una incubadora con temperatura controlada a 30 °C durante una semana. La metodología experimental se centró en observar las diferencias visibles en el crecimiento bacteriano entre ambos tratamientos a lo largo de varios días [20].

3.5 Análisis de ciclo de vida (ACV)

Para llevar a cabo el análisis de ciclo de vida (ACV) de la producción de tableros de bambú tipo GaK, se ha seguido la normativa ISO 14040:2006 [21], enfocándose en un enfoque Puerta-Puerta (Gate to Gate) [22]-[26] Este enfoque considera exclusivamente el proceso de manufactura. La unidad funcional del ACV es un lote de producción de 12 tableros de GaK.

Los datos utilizados provienen principalmente de registros internos de la empresa y extrapolaciones de experimentos a pequeña escala en laboratorio. El ACV se estructura en siete etapas principales: Corte, Elaboración de Latillas, Tratamiento Térmico, Secado, Cepillado, Ensamblaje y Lijado, con especificaciones detalladas para cada proceso.

Para la elaboración del diagrama de flujos en el análisis del ciclo de vida (ACV), se empleó el software SketchUp Pro 2022, desarrollado por Trimble Inc., 2022 [27] y el Adobe Illustrator versión 24.0 para el diseño gráfico relacionado [28]

La metodología empleada para evaluar los impactos medioambientales fue la CML 2001 [29], utilizando el software GaBi Professional y la base de datos ecoinvent 3.9.1 [30], lo que permitió un análisis detallado en diversas categorías ambientales.

1. Potencial de Calentamiento Global (PCG 100 años) [kg CO₂ eq]: Es una medida del calor que un gas de efecto invernadero puede atrapar en la atmósfera durante un período de 100 años, en comparación con el dióxido de carbono. Se expresa en kg de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq).

2. Potencial de Calentamiento Global (PCG 100 años), excluyendo carbono biogénico [kg CO₂ eq]: Similar al PCG, pero excluye el carbono emitido por fuentes biológicas como plantas y animales. Esto proporciona una medida del impacto de los gases de efecto invernadero antropogénicos, sin contar el carbono que forma parte de los ciclos biológicos naturales
3. Potencial de Ecotoxicidad Acuática en Agua Dulce (PEAAD) [kg DCB-eq]: Evalúa el impacto negativo de las sustancias liberadas al medio ambiente sobre los ecosistemas de agua dulce. Se expresa en kg de diclorobenceno equivalente (kg DCB-eq), indicando la toxicidad relativa al diclorobenceno.
4. Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (PET) [kg DCB-eq]: Evalúa los impactos tóxicos potenciales de las sustancias químicas sobre los ecosistemas terrestres. Se expresa en kg de diclorobenceno equivalente (kg DCB-eq), proporcionando una medida de la toxicidad comparada con la del diclorobenceno.
5. Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (PCOF) [kg eteno-eq]: Mide la capacidad de los contaminantes emitidos para formar ozono a nivel del suelo a través de reacciones fotoquímicas. Se expresa en kg de eteno equivalente (kg eteno-eq), lo que refleja su contribución a la formación de smog fotoquímico en comparación con el eteno.
6. Energía (valor calorífico neto) [MJ]: Indica la cantidad de energía que se puede liberar mediante la combustión de un combustible o que está contenida en un material. Se expresa en mega julios (MJ), siendo una medida directa del potencial energético.

3.6 Bibliografía

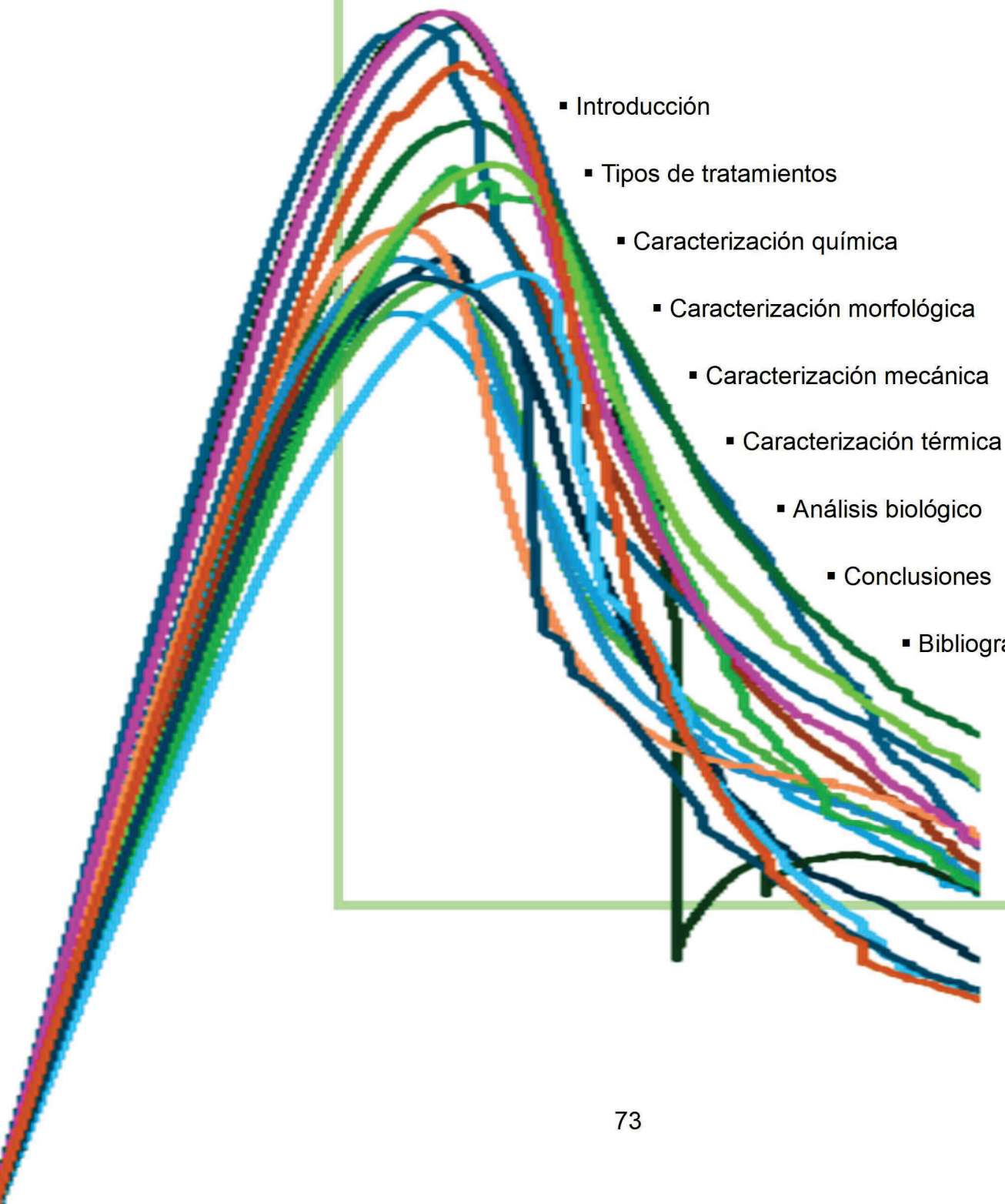
- [1] M. Niubó, "Formulación y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica con polvo de acería en aplicaciones acústicas," Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona, 2011.
- [2] G. B. CNS, "T 15780-1995; Testing Methods for Physical and Mechanical Properties of Bamboos," *China Archit. Build. Press Beijing, China*, 1996.
- [3] A. . Radzi *et al.*, "Bamboo-Fiber-Reinforced Thermoset and Thermoplastic Potential

- Applications,” *Polymers (Basel)*., vol. 14, p. 1387, 2022.
- [4] H. P. S. A. Khalil, I. U. H. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan, and Y. S. Hadi, “Bamboo fibre reinforced biocomposites : A review,” *Mater. Des.*, vol. 42, pp. 353–368, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.015.
- [5] R. M. Abhilash, G. S. Venkatesh, and S. S. Chauhan, “Development of bamboo polymer composites with improved impact resistance,” *Polym. Polym. Compos.*, vol. 29, no. 9_suppl, pp. S464–S474, 2021, doi: 10.1177/09673911211009369.
- [6] K. Zhang, F. Wang, W. Liang, Z. Wang, Z. Duan, and B. Yang, “Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced epoxy composites,” *Polymers (Basel)*., vol. 8, no. 6, 2018, doi: 10.3390/polym10060608.
- [7] J. Li *et al.*, “Dynamic in-situ Formation of Cu₂O Sub-Nanoclusters through Photoinduced pseudo-Fehling’s Reaction for Selective and Efficient Nitrate-to-Ammonia Photosynthesis,” *Angew. Chemie*, p. e202317575, 2023, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266572705>.
- [8] A. W. Coats and J. P. Redfern, “Thermogravimetric analysis. A review,” *Analyst*, vol. 88, no. 1053, pp. 906–924, 1963, doi: 10.1039/AN9638800906.
- [9] E. Freire, “Differential Scanning Calorimetry,” in *Methods in Molecular Biology*TM, vol. 40, no. 1, B. A. Shirley, Ed. Totowa: NJ: Humana Press, 1995, pp. 9–15.
- [10] T. Log and S. E. Gustafsson, “Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials,” *Fire Mater.*, vol. 19, no. 1, pp. 43–49, 1995.
- [11] L. Haurie, A. Avellaneda, and J. Monton, “Fire Behavior of Bamboo, *Guadua angustifolia*,” in *Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety 2020 9*, 2020, pp. 103–108.
- [12] Asociación Española de Normalización., “UNE-EN ISO 4589-2:2017: Determinación del comportamiento al fuego mediante el índice de oxígeno. Parte 2: Ensayo a temperatura ambiente.” Madrid: AENOR, 2017.
- [13] M. I. Nelson, H. S. Sidhu, R. O. Weber, and G. N. Mercer, “A dynamical systems model of the limiting oxygen index test,” *ANZIAM J.*, vol. 43, no. 1, pp. 105–117, 2001, doi: 10.1017/S1446181100011457.
- [14] Asociación Española de Normalización, “UNE 23-725-90: Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Ensayo de goteo aplicable a los materiales fusibles. Ensayo Complementario.” Madrid, 1990.
- [15] Z. Jiang, H. Wang, G. Tian, X. Liu, and Y. Yu, “Properties of Moso Bamboo To Moisture Content,” *BioResources*, vol. 7, pp. 5048–5058, 2012.
- [16] ASTM International, “Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials,” West Conshohocken, 2020. doi: 10.1520/D1037-12.1.

- [17] ASTM INTERNATIONAL, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.,” West Conshohocken, 2002. doi: 10.1520/D0790-10.
- [18] I. ANSYS, “Ansys Granta: Materials Information Management,” *Cambridge, UK*, 2022. <https://www.ansys.com/products/materials> (accessed May 27, 2024).
- [19] ASTM International, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics D-638-22,” West Conshohocken, 2022. doi: 10.1520/D0638-22.1.
- [20] B. A. Forbes, D. F. Sahm, and A. S. Weissfeld, *Diagnostic microbiology*. Mosby St Louis, 2007.
- [21] ISO 14040:2006, “Environmental assessment - Life cycle assessment - Principles and framework,” *Int. Stand. Organ.*, 2006.
- [22] G. Sandin, G. M. Peters, and M. Svanström, *Life Cycle Assessment of Forest Products: Challenges and Solutions*, vol. 72, no. 2. 2016.
- [23] 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 Trans. Built Environ.*, vol. 142, pp. 447–457, 2014, doi: 10.2495/ARC140381.
- [24] A. Restrepo, R. Becerra, and J. E. G. Tibaquirá, “Energetic and carbon footprint analysis in manufacturing process of bamboo boards in Colombia,” *J. Clean. Prod.*, vol. 126, pp. 563–571, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.144.
- [25] J. G. Vogtländer and P. van der Lugt, “The Environmental Impact of Industrial Bamboo Products: Life cycle assessment and carbon sequestration. Technical report No.35.,” no. 35, p. 54, 2014.
- [26] J. Gan, M. Chen, K. Semple, X. Liu, C. Dai, and Q. Tu, “Life cycle assessment of bamboo products: Review and harmonization,” *Sci. Total Environ.*, vol. 849, no. August, p. 157937, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157937.
- [27] Trimble Inc, “SketchUp Pro 2022,” 2022. <https://www.sketchup.com/es> (accessed May 27, 2024).
- [28] Adobe Inc, “Adobe Illustrator Artwork 24,” *Adobe Systems.*, 2021. <https://www.adobe.com/products/illustrator.html> (accessed May 27, 2024).
- [29] CML, “CML-IA Characterisation Factors - Leiden University,” *Institute of Environmental Sciences (CML)*, 2016. <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors> (accessed May 14, 2024).
- [30] Ecoinvent, “ecoinvent Date base,” *ecoinvent.org*. <https://ecoinvent.org/faqs/#available-datasets> (accessed May 27, 2024).

Capítulo 4.

Tratamientos de láminas de GaK

- 
- Introducción
 - Tipos de tratamientos
 - Caracterización química
 - Caracterización morfológica
 - Caracterización mecánica
 - Caracterización térmica
 - Análisis biológico
 - Conclusiones
 - Bibliografía

4 Tratamiento de láminas de *Guadua angustifolia* Kunth (GaK)

4.1 Introducción

En este capítulo, se presenta un estudio detallado sobre el tratamiento de láminas de GaK con el propósito de mejorar su durabilidad, y ofrecer alternativas de tratamiento sostenibles. Se han investigado dos métodos de tratamiento: uno térmico, mediante ebullición en agua con control de la variable tiempo, y otro termoquímico, que consiste en la ebullición en una solución acuosa de bórax y ácido bórico. La selección de estos tratamientos se fundamenta en su potencial para modificar la composición química y la estructura de la GaK, así como en su reducido impacto ambiental.

Para evaluar los efectos de los tratamientos, se realizaron análisis detallados de la composición química de las láminas tratadas. Se empleó la RMN y la FT-IR para identificar variaciones en la proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes clave que influyen en las propiedades físicas y mecánicas de la GaK. También, se utilizó el método de Fehling para cuantificar la cantidad de azúcares reductores extraídos. Estos azúcares pueden originarse principalmente por la degradación de la hemicelulosa, y en menor medida, de la celulosa, debido a que la estructura química de la hemicelulosa es menos cristalina y más amorfa, lo que la hace más susceptible a la hidrólisis térmica.

Además de los análisis químicos, se llevaron a cabo ensayos mecánicos para evaluar el efecto de los tratamientos en las propiedades mecánicas de la GaK. Se realizaron ensayos de flexión a tres puntos para determinar el E y el σ_f de las láminas tratadas, lo que permitió comparar su rigidez y resistencia con las de la GaK no tratada. Asimismo, se analizó mediante SEM, la microestructura de las láminas después del tratamiento para examinar cualquier cambio morfológico inducido por los procesos de tratamiento térmico.

También, se evaluó el comportamiento al fuego de las láminas tratadas mediante pruebas de inflamabilidad utilizando un epirradiator y determinando el LOI. Esta información amplía el conocimiento sobre el comportamiento al fuego de la GaK tratada y su idoneidad para aplicaciones en entornos donde la resistencia al fuego es una consideración importante.

Por último, se llevó a cabo un análisis biológico a través del medio de cultivo Columbia agar para evaluar los tratamientos realizados desde esta perspectiva.

En resumen, en este capítulo se busca proporcionar una comprensión más profunda de los efectos del tratamiento térmico en las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la GaK, con el objetivo de mejorar su durabilidad y efectividad en aplicaciones de construcción sostenible. Los resultados obtenidos contribuyen al desarrollo de métodos de tratamiento más eficaces y sostenibles para este material renovable y versátil.

4.2 Tipos de tratamientos

La Tabla 4.1 presenta el tipo de tratamiento, el tiempo, la nomenclatura asignada, el número de probetas y la masa total de las muestras ensayadas en cada tratamiento.

Tabla 4.1 Descripción de los tratamientos llevados a cabo en el estudio de la optimización de la extracción de azúcares del bambú.

Tipo de tratamiento	Tiempo (min)	Nomenclatura	No. de Probetas	Masa (g)
Grupo de Control	-	GC	20	87,77
Térmico	30	TT30	20	86,94
Térmico	60	TT60	20	84,04
Térmico	90	TT90	20	91,10
Térmico	120	TT120	20	92,59
Térmico – Químico	60	TTQ60	20	90,34

4.3 Caracterización química

Los resultados de los análisis realizados para evaluar las alteraciones en la composición química del bambú conforme a la metodología descrita en el Capítulo 3 se describen a continuación:

4.3.1 Determinación de azúcares reductores

Para la estimación de la concentración de los AR en las muestras experimentales, se generó una curva de calibración usando diluciones seriadas de xilosa en un rango de 1 a 10 mg/ml. La correlación obtenida entre la absorbancia y las concentraciones de xilosa fue modelada por una función lineal, evidenciada por un coeficiente de determinación

(R^2) de 0,9865, reflejando una fuerte linealidad y confiabilidad en la estimación de los AR. La Figura 4.1 exhibe las reacciones de Fehling en función de las concentraciones de xilosa utilizadas. En dicha figura, se observa como la intensidad de color azul de la solución disminuye, con el aumento de concentración de xilosa, debido a una mayor participación del reactivo de Fehling. La Figura 4.2 ilustra la recta de calibración.

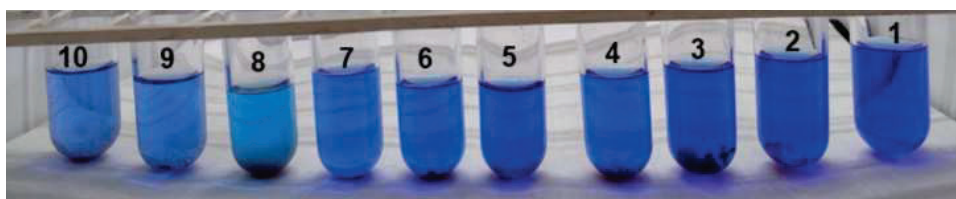


Figura 4.1 Método Fehling A-B concentración de Xilosa.

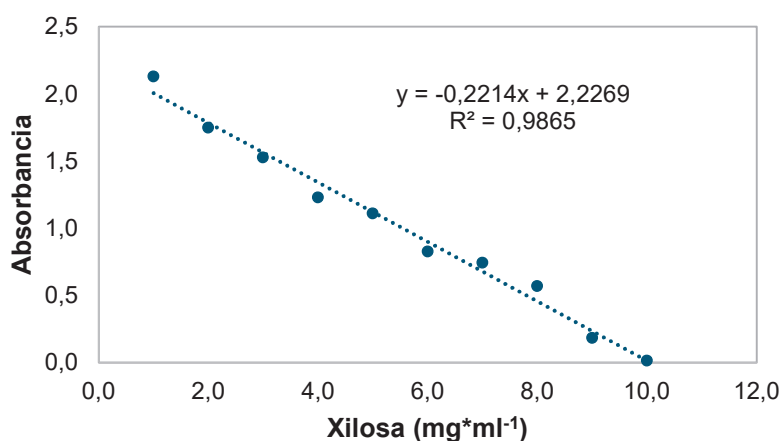


Figura 4.2 Curva de calibración de Xilosa.

La Tabla 4.2 presenta los niveles de AR, expresados en equivalentes de xilosa (mg de AR por ml de disolución), así como también, la relación de equivalentes de xilosa por gramos de bambú (mg de AR por g de bambú) para los diferentes períodos de ebullición.

Tabla 4.2 Cuantificación de AR en equivalentes de Xilosa calculados a partir de la curva de calibración.

Grupo	AR (mg/ml)	DE AR (mg/ml)	AR/bambú (mg/g)	Incremento AR/gramo de bambú (%)
TT30	3,46	0,13	7,97	-
TT60	3,84	0,15	9,10	14,25
TT90	5,98	0,04	13,11	43,98
TT120	8,20	0,18	17,73	35,37

La cuantificación espectrofotométrica de AR en el bambú tras diversos periodos de ebullición revela una tendencia incrementada de concentración de AR en el agua de cocción con el aumento del tiempo de tratamiento. Las muestras de menor tiempo de tratamiento, TT30, evidenciaron un promedio de AR equivalentes de xilosa en el agua de cocción de 3,46 mg/ml, que corresponde 7,97 mg/g bambú. Este valor se determina dividiendo los miligramos totales de AR presentes en la solución para los gramos totales de bambú tratados. Las muestras TT60, TT90 y TT120 mostraron incrementos en la concentración de AR por gramo de bambú del 14,62%, 43,86 % y 34,94% respectivamente. La Figura 4.3 representa el comportamiento de la extracción de AR (mg/g bambú) conforme el tiempo de tratamiento térmico.

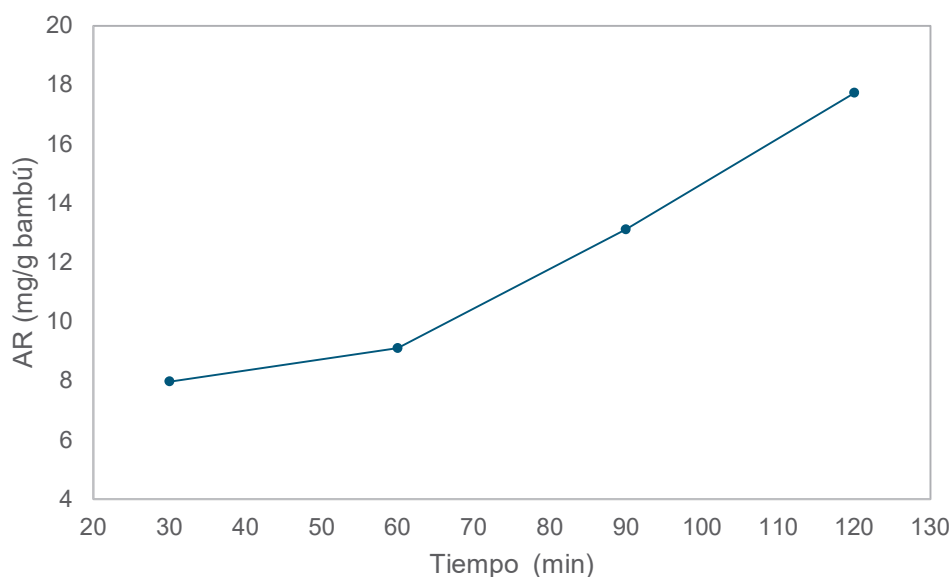


Figura 4.3 Extracción de AR por gramo de bambú y su relación con el tiempo de tratamiento térmico.

Estos resultados sugieren que el proceso de ebullición prolongada induce una degradación más extensiva de la hemicelulosa presente en el bambú, liberando una mayor cantidad de xilosa y otros azúcares reductores solubles, hallazgos similares a los realizados por Li [1]. El incremento en la concentración de AR con cada intervalo de tiempo subsecuente indica una relación directa entre el tiempo de ebullición y la hidrólisis de los componentes de la hemicelulosa. Estos hallazgos aportan una visión cuantitativa sobre la eficacia del tratamiento térmico en la degradación de polisacáridos en bambú y

tienen implicaciones significativas en estudios sobre aplicaciones y durabilidad del bambú, así como también, en el aprovechamiento de estos azúcares en procesos de valorización de biomasa, como la producción de biocombustibles y productos químicos renovables.

4.3.2 Resonancia magnética nuclear de carbono-13 (RMN ^{13}C)

El análisis RMN ^{13}C permitió evaluar las variaciones en la composición química de la GaK, a través del análisis del agua de cocción de los diferentes tratamientos térmicos y químicos. La identificación de los desplazamientos químicos específicos permitió asociarlos con los tipos de carbono presentes en la celulosa, hemicelulosa y lignina descritos en la literatura.

La Figura 4.4 ilustra los espectros obtenidos para las muestras de los diferentes tratamientos, así como también, la asignación de los tipos de carbono conforme los desplazamientos [1]-[7]. Los resultados de RMN de ^{13}C del agua de cocción del bambú ofrecen evidencia directa de la degradación y solubilización de componentes, como lípidos, proteínas, celulosa, hemicelulosa y lignina, bajo las condiciones aplicadas en los diferentes tratamientos térmicos y químicos. Las señales detectadas en los siguientes rangos de desplazamientos químicos son indicativas de la liberación de estos compuestos en el agua:

Dentro del rango de 14,45 a 14,85 ppm, los espectros muestran picos atribuibles a grupos metilo (CH_3), comúnmente derivados de ácidos grasos saturados y estructuras alifáticas simples, sugiriendo la degradación de lípidos. Los tratamientos térmicos no inducen variaciones significativas en la intensidad de estas señales, aunque el TT60 destaca con la mayor intensidad, registrando 134,3 en 14,62 ppm.

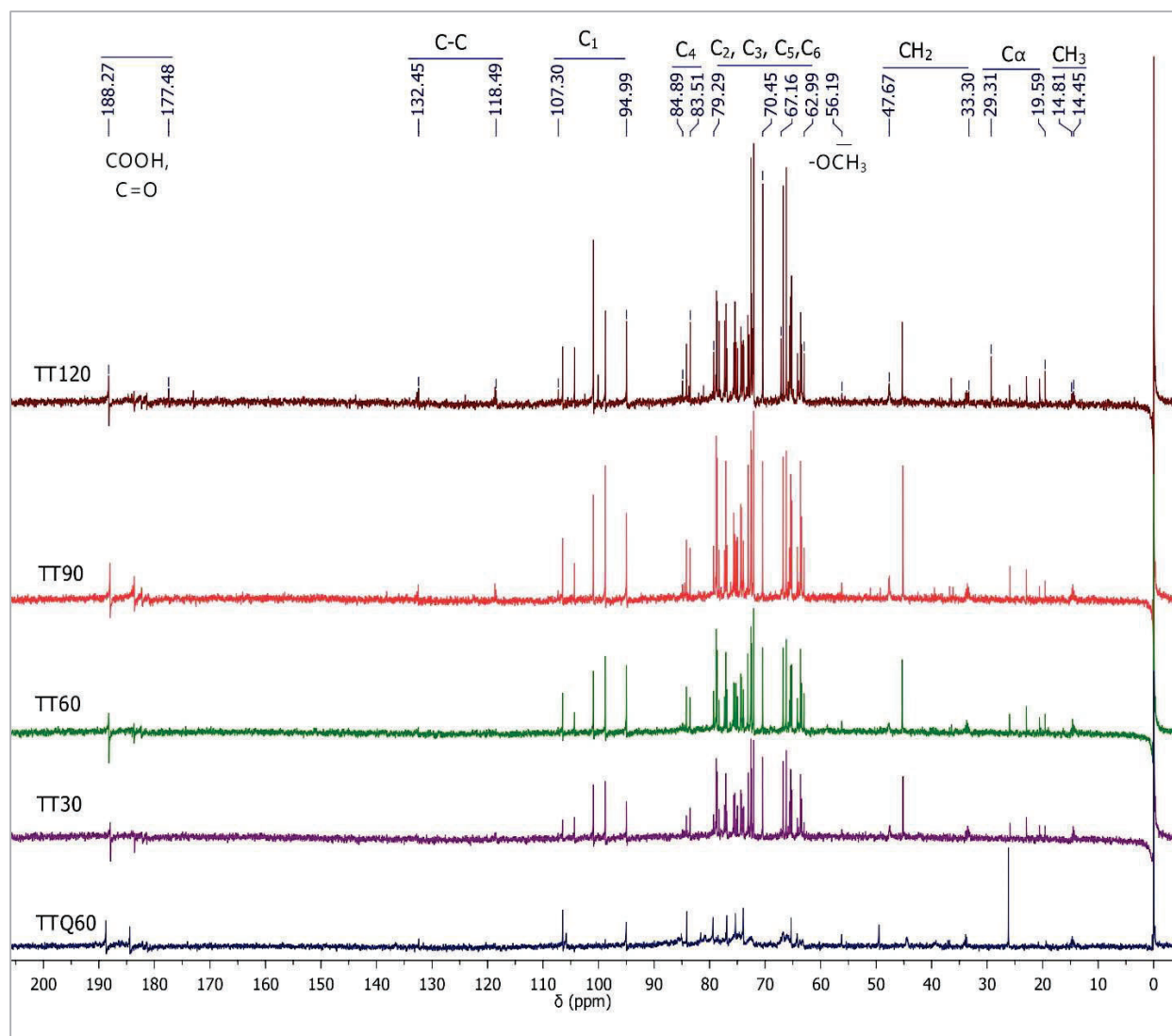


Figura 4.4 Espectros de RMN de ^{13}C para diversos tratamientos térmicos y químicos en láminas de *Guadua angustifolia*: análisis comparativo y asignación espectral de carbonos.

En el intervalo de 19,59 a 29,31 ppm, los espectros indican la presencia predominante de carbonos alifáticos, incluyendo carbonos α adyacentes a grupos carboxilo en ácidos grasos, tanto saturados como insaturados, y potencialmente carbonos en cadenas laterales de aminoácidos proteicos. Estas señales son consistentes con la disolución y posible degradación de componentes lipídicos y proteicos bajo tratamiento térmico. En este rango los TT exhiben desplazamientos similares, aumentando ligeramente la intensidad conforme se incrementa el tiempo de tratamiento. Contrastantemente, el tratamiento TTQ60 manifiesta un notable pico único en 26,17 ppm con una intensidad de

1200,90, que supera por 4,6 veces al pico más intenso de los tratamiento TT en el mismo rango. Esta observación sugiere que el ácido bórico y el bórax pueden promover la formación de esteres o ácidos carboxílicos, posiblemente a través de la transformación química de la lignina y otros constituyentes lipídicos del bambú.

El rango de 33,30 a 49,99 ppm, asociado con carbonos metileno (CH_2) en cadenas alifáticas, muestra un incremento de picos e intensidad con la duración del tratamiento térmico, culminando con una mayor cantidad de picos en el TT120. El TT90 exhibe el pico más intenso a 45,21 ppm, con una intensidad de 1124,1. Este patrón sugiere una progresiva degradación y solubilización de componentes de lípidos y la lignina en estructuras fenólicas y alifáticas.

La región de 56,19 a 56,24 ppm, caracterizada por picos asociados a grupos metoxilo ($-\text{CH}_3$) típicos de la lignina y carbonos alifáticos en lípidos, muestra una singularidad en picos a través de todos los tratamientos, con intensidades comparables. Esta constancia implica que la oxidación térmica de lípidos es un fenómeno temprano y homogéneo en el tratamiento, conduciendo a la generación de radicales libres y derivados carbonílicos. El tratamiento TTQ60, sin embargo, destaca con la mayor intensidad de 142,40 en 56,22 ppm, señalando una posible mayor extensión de la oxidación lipídica o modificación de la lignina en este régimen específico.

Los intervalos de 60-67 ppm y 70-80 ppm sugieren la descomposición de la celulosa y hemicelulosa, evidenciada por la liberación de unidades glucósidas como C2, C3, C5 y C6. Estos picos indican la ruptura de enlaces glicosídicos y la subsiguiente solubilización de fragmentos poliméricos. El tratamiento TT120 sobresale con la mayor cantidad e intensidad de picos, lo que coincide con la menor estabilidad térmica de la hemicelulosa. En contraste, el tratamiento TTQ60 muestra menos picos y menores intensidades, sugiriendo que la combinación de ácido bórico-bórax podría estar estabilizando o modificando la solubilidad de estos componentes estructurales.

Las resonancias situadas entre 83,51 y 84,89 ppm se asocian con los carbonos C4 de la celulosa y hemicelulosa. Estas señales reflejan la integridad estructural residual de

polisacáridos que han experimentado degradación parcial y cuya solubilización ha aumentado con el tratamiento térmico. La similitud en los perfiles de los tratamientos térmicos apunta a una degradación más significativa de la hemicelulosa, consistente con su menor estabilidad térmica en comparación con la celulosa. El TT120 muestra una leve diversificación con un pico adicional, mientras que el TTQ60, con un pico menos, sugiere que la intervención del ácido bórico-bórax podría estar afectando la degradación de estos componentes poliméricos.

Los picos entre 94,99 y 107,30 ppm se asignan a los carbonos C₁ anómeros de la celulosa y de los xilanos en la hemicelulosa, reflejando la presencia de enlaces β -1,4-glicosídicos y la liberación de fragmentos glucósidos al medio acuoso. Conforme aumenta la duración de los tratamientos térmicos, las intensidades de estas señales se intensifican, especialmente en TT90 y TT120. El pico más prominente se observa en TT120 con una intensidad de 1410,30 en 100,95 ppm, evidenciando que la prolongación del tratamiento térmico potencia la degradación y solubilización de estos polímeros estructurales en el bambú.

Las señales entre 118,49 y 132,45 ppm apuntan a modificaciones en la lignina, implicando la ruptura de enlaces éter y la posible formación de nuevos enlaces carbono-carbono (C-C) dentro de los anillos aromáticos, inducidos por la aplicación de calor. Estos cambios se observan únicamente en los tratamientos TT90, TT120 y TTQ60, lo cual indica que la degradación de la lignina es más evidente con tratamientos térmicos prolongados y la presencia de agentes químicos. La intensidad más destacada en este rango se presenta en TT120 con un valor de 124,10 en el desplazamiento de 132,45 ppm, reforzando la noción de una degradación termoquímica de la lignina en condiciones extendidas.

Las resonancias situadas entre 177,48 y 188,27 ppm señalan la presencia de compuestos carbonílicos, reflejando procesos oxidativos o descomposición de la matriz lignocelulósica, con la consecuente liberación de ácidos orgánicos y otros compuestos con grupos carbonilo. Esta caracterización es particularmente relevante en el tratamiento TTQ60, donde se observa la intensidad máxima de 307,2 ppm en un desplazamiento de

188,74 ppm, sobresaliendo este tratamiento en la alteración de estructuras lignocelulósicas.

La Tabla 4.3 ofrece un análisis detallado de la asignación de los tipos de carbono basado en los desplazamientos registrados en los espectros de RMN de ^{13}C .

Tabla 4.3 Asignación de tipos de carbono según los desplazamientos químicos en espectros de RMN ^{13}C para los diversos tratamientos del bambú [1]-[7].

Desplazamiento (ppm)	Tipo de carbono	Asignación
[14,45-14,85]	Carbonos metílicos	CH_3 , asociados con la degradación de lípidos
[19,59-29,31]	Carbonos alfa en grupos carboxilo ($-\text{COOH}$),	C_α , implicados en la degradación de lípidos o proteínas.
[33,30-47,67]	Carbonos alifáticos	CH_2 , en lignina y ácidos grasos
[56,19-56,24]	Carbonos de grupos metoxilo ($-\text{OCH}_3$)	Metoxilo $-\text{OCH}_3$, típicos en lignina
[62,99-67,17]	Carbonos del grupo hidroxilo e hidroximetilo	C_5 , C_6 en celulosa y hemicelulosa
[70,45-79,39]	Carbonos del anillo glucósido	C_2 , C_3 en celulosa y hemicelulosa; C_5 en hemicelulosa
[83,51-85,09]	Carbonos de posición glicósida	C_4 en celulosa, indicativo de celulosa intacta o degradada
[94,99-107,30]	Carbono anómero	C_1 en celulosa y hemicelulosa (xilanos)
[118,49-132,48]	Carbonos de los anillos aromáticos	C-C aromáticos en lignina
[177,48-188,74]	Carbonos carbonílicos en grupos carboxílicos y cetonas	Carbonílicos ($\text{C}=\text{O}$), en lignina y otros componentes que contienen grupos carboxílicos y cetonas

La Tabla 4.4 destaca las intensidades máximas observadas para cada tratamiento, mientras que la Figura 4.5 visualiza gráficamente estas intensidades, facilitando una comparación clara y detallada entre los diferentes tratamientos.

Tabla 4.4 Máximas intensidades relativas de resonancia en diversos intervalos de desplazamiento químico para muestras de agua de cocción de GaK, según espectros de RMN de ^{13}C .

Desplazamiento (ppm)	TT30	TT60	TT90	TT120	TTQ60
[14,45-14,85]	11,1	134,3	125,4	97,4	121,6
[19,59-29,31]	196,2	259,6	275,5	400,4	1200,9
[33,30-47,67]	591,6	720,3	1124,1	686,5	256,2
[56,19-56,24]	82,7	114,7	136,7	81,8	142,4
[62,99-67,17]	845,9	837,5	1249,9	2005,9	342,1
[70,45-79,39]	944,2	1227,1	1577,9	2214,4	460,2
[83,51-85,09]	288,0	452,2	495,3	691,2	418,1
[94,99-107,30]	545,2	754,4	1116,5	1410,3	438,9
[118,49-132,48]	-	-	130,8	131,4	92,0
[177,48-188,74]	148,6	193,9	301,9	227,8	307,2

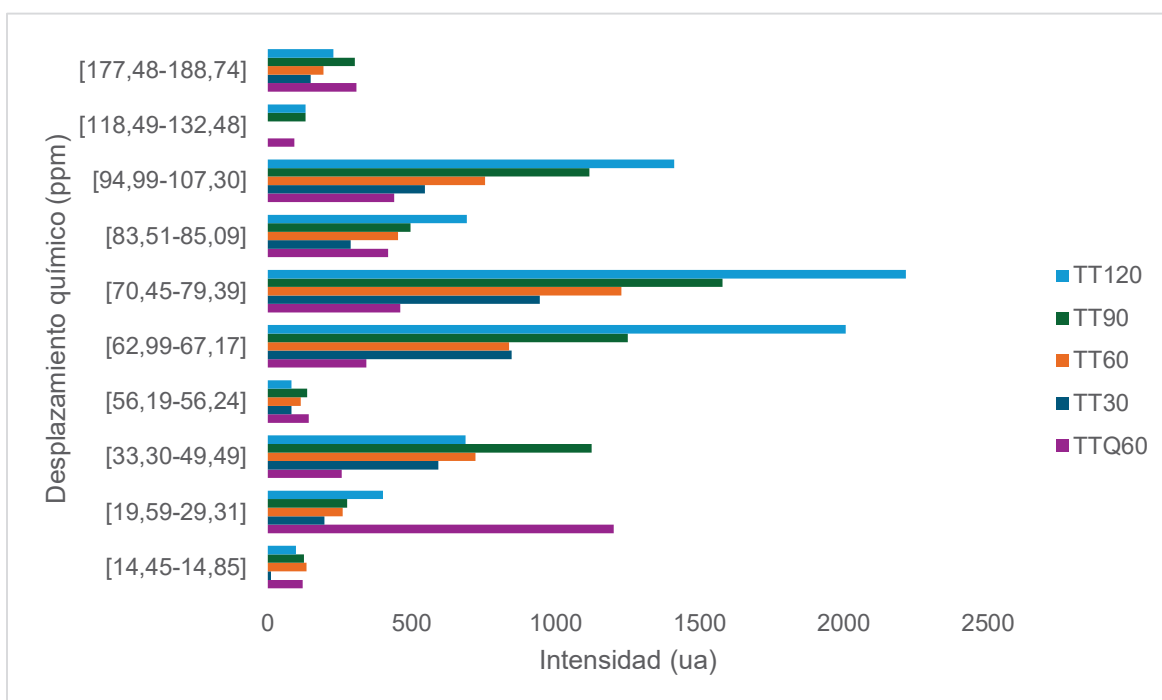


Figura 4.5 Máximas intensidades relativas de los picos para los desplazamientos químicos singulares de los espectros de RMN ^{13}C en los tratamientos TT30, TT60, TT90, TT120 y TTQ60.

En conclusión, la evaluación de los espectros de RMN de ^{13}C del agua de cocción de bambú, tras someterlo a diversos tratamientos térmicos y químicos, revela una notable descomposición y solubilización de componentes estructurales clave como la celulosa, hemicelulosa y lignina. Mientras que la celulosa y la lignina muestran cierta resistencia, liberando principalmente oligómeros más cortos, la hemicelulosa se degrada de manera

más extensa, resultando en la liberación de azúcares simples y compuestos fenólicos y alifáticos solubles en agua. Estos resultados son consistentes con los obtenidos mediante las metodologías de Fehling A y B para determinar azúcares reductores en el agua de cocción, como se describe en la sección 4.3.1 del documento. Los hallazgos también se alinean con estudios previos de investigadores como Li [1], Sun [3], Huang [4] y Yang [6], ampliando el entendimiento sobre la respuesta del bambú a tratamientos térmicos y químicos bajo condiciones de ebullición a presión atmosférica, con especial atención al efecto del tiempo.

4.3.3 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

La FT-IR se empleó para investigar las alteraciones químicas en muestras de GaK tras los diversos tratamientos térmicos y químicos.

La Figura 4.6 compara los espectros FT-IR estándar de celulosa, lignina y xilano con el de una muestra de GaK sin tratamiento. Destaca la presencia de grupos hidroxilo en 3339 cm^{-1} y enlaces glucopiranosidos en 1033 cm^{-1} , para celulosa. Los espectros de lignina resaltan los enlaces C=C y C-H en 1603 y 1513 cm^{-1} , mientras que el xilano muestra la predominancia de enlaces C-O y C-O-C en 1033 cm^{-1} .

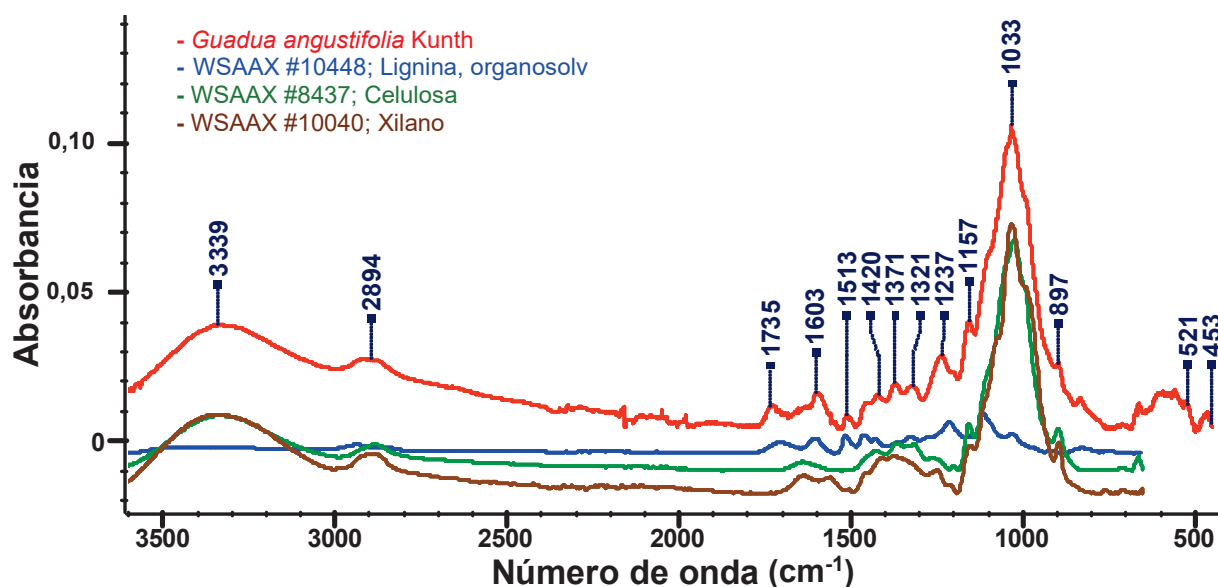


Figura 4.6 Comparativa de espectros FT-IR entre GaK, celulosa, hemicelulosa y lignina organosolv.

Esta comparativa facilita la identificación de los cambios estructurales y composicionales en el bambú debido a los tratamientos aplicados, reflejando cómo estas componentes biomoleculares reaccionan y se transforman bajo condiciones específicas.

La Figura 4.7 compara los espectros FT-IR de muestras tratadas y no tratadas, evidenciando los cambios en los grupos funcionales esenciales. Alrededor de la banda 3339 cm^{-1} atribuido al estiramiento de grupos hidroxilo (OH) de la celulosa y hemicelulosa, se observa una disminución en la intensidad y una ampliación de los picos posterior al tratamiento, lo que indica una reducción en el número de grupos O-H y una modificación en la estructura de enlaces de hidrógeno, con la mayor variación observada en el tratamiento TTQ60.

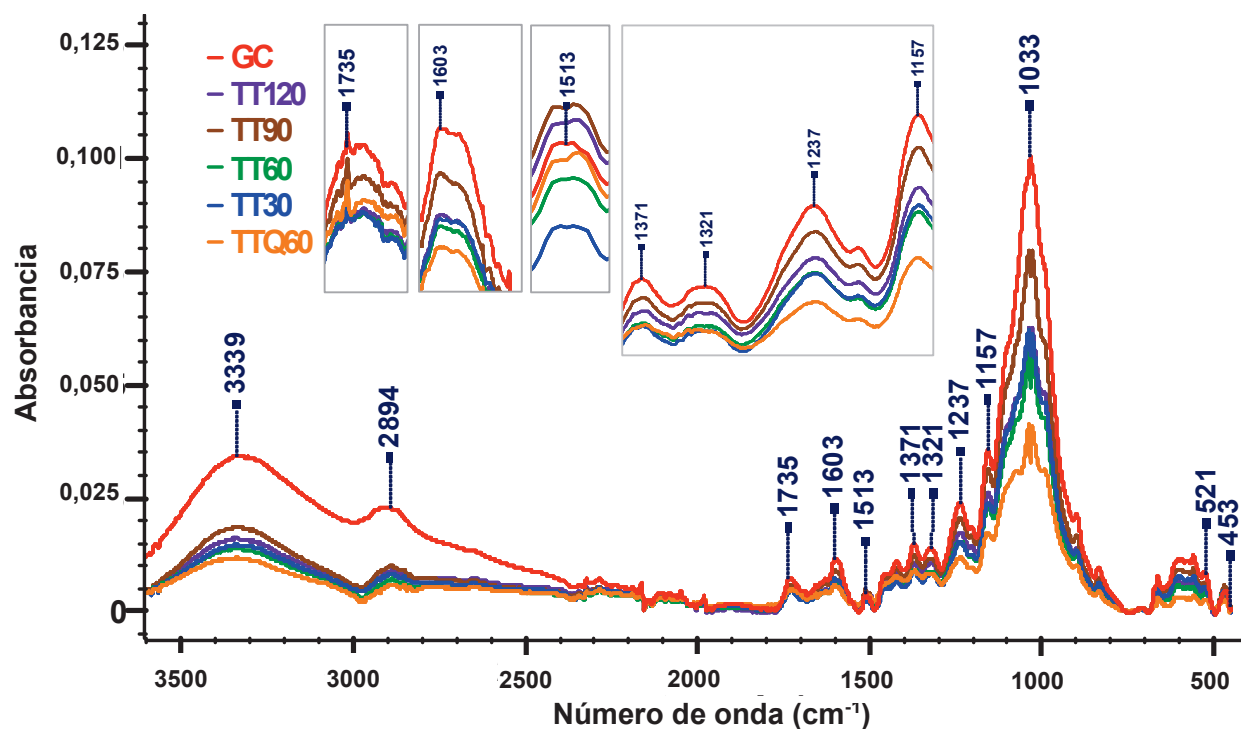


Figura 4.7 Comparativa de espectros FT-IR entre GaK tratada y no tratada.

Coherentes con la presencia de celulosa y hemicelulosa en las muestras los rangos $[2940-2915\text{ cm}^{-1}]$ y $[2890-2880\text{ cm}^{-1}]$ corresponden a los estiramientos antisimétricos y simétricos de los grupos metileno (CH_2) y metilo (CH) respectivamente. La banda

alrededor de 2894 cm^{-1} sugiere una presencia disminuida de estos grupos en todas las muestras tratadas, siendo el más afectado el TTQ60.

La banda 1735 cm^{-1} se relaciona con estiramientos de grupos carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), típicamente en acetilos de hemicelulosa o celulosa acetato modificada. La reducción en esta banda indica degradación de hemicelulosa o alteración de celulosa, especialmente en el tratamiento TT120.

La banda en 1603 cm^{-1} refleja estiramientos de enlaces $\text{C}=\text{C}$ en anillos aromáticos de la lignina. El TT90 presenta un mayor valor respecto a los otros tratamientos, indicando posiblemente una mayor accesibilidad o concentración de lignina.

El pico en 1513 cm^{-1} , asociado con estiramientos $\text{C}-\text{H}$ de estructuras aromáticas en lignina, muestra un incremento en los tratamientos TT90 y TT120, sugiriendo cambios en la concentración relativa o en la estructura de la lignina que resultan en una mayor detectabilidad por FT-IR.

Los picos 1371 cm^{-1} , 1321 cm^{-1} , 1237 cm^{-1} picos pueden deberse a vibraciones de deformación en los grupos CH y CH_2 y vibraciones de estiramiento en los enlaces $\text{C}-\text{O}$ y $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, que son típicos de celulosa y hemicelulosa. En el tratamiento TTQ60 se observan las variaciones más significativas.

Las bandas 1157 cm^{-1} y 1033 cm^{-1} son indicativos de estiramientos de éteres y alcoholes, consistentes con los derivados de celulosa y hemicelulosa. La presencia de enlaces $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ es típica en el esqueleto glucopiranosido de la celulosa. El hecho de que el tratamiento TTQ60 muestre la mayor variación en estas bandas puede sugerir cambios significativos en la estructura de estos polisacáridos, posiblemente debido a una mayor despolimerización o alteración de las hemicelulosas y celulosa. Esto podría ser resultado de la interacción con los agentes químicos del tratamiento, como el bórax y el ácido bórico, que pueden facilitar la ruptura de enlaces glucosídicos y alterar la accesibilidad y estabilidad de estos biopolímeros.

En la Tabla 4.5 se muestra el resumen de la asignación del grupo funcional para las láminas de GaK.

Tabla 4.5 Asignación de grupos funcionales a GaK en espectros FT-IR.

Rango	Banda	Grupo funcional	Asignación
3400-3300	3339	Grupo hidroxilo (OH)	Presente en celulosa y hemicelulosa; involucrado en enlaces de hidrógeno
2940-2915	2894	Grupo metileno (CH ₂)	Antisimétrico, común en celulosa y hemicelulosa
2890-2880	2894	Grupo metilo (CH)	Simétrico, puede estar en celulosa y lignina
1750-1725	1735	Grupo carbonilo (C=O)	En acetil o urónicos de hemicelulosa; también en celulosa acetato si se ha modificado químicamente
1603-1597	1603	C=C en anillos aromáticos.	Lignina; señal de estructuras aromáticas
1513	1513	C-H en anillos aromáticos, lignina	Lignina; específicamente señales de anillos aromáticos
1480-1420	1420	Deformación CH ₂	Indicativo de enlaces CH ₂ en celulosa y hemicelulosa
1390-1350	1371	Grupo metilo (CH)	Deformación en celulosa acetato o posiblemente lignina
1330-1300	1321	Deformación CH ₂	Común en celulosa
1250-1200	1237	Esteres o ácidos carboxílicos CO	En hemicelulosa modificada o celulosa acetato si está presente
1170-1130	1157	Éteres C-O-C	Celulosa; enlace glucosídico entre monómeros de glucosa
1100-1000	1033	Estiramiento C-O	Celulosa y hemicelulosa; enlaces C-O en la estructura glucopiranosida
830-870	833	C-H aromático	Lignina; deformación fuera del plano de enlaces C-H aromáticos

La disminución en la intensidad de ciertas bandas en los espectros de las muestras tratadas, comparadas con la muestra de control (GC), podría indicar la degradación o reorganización de los componentes lignocelulósicos. Los TT y TTQ afectan principalmente a la hemicelulosa y celulosa, y en menor medida a la lignina, lo que podría explicar cambios en las propiedades mecánicas y la estabilidad dimensional del bambú tratado. Estos resultados se alinean con los descritos por Zhang [8] y Li [9]. El espectro del tratamiento TTQ60 muestra diferencias significativas, posiblemente debido a la interacción de los componentes del bambú con el bórax y el ácido bórico, sugiriendo una alteración química que podría contribuir a las propiedades retardantes de llama.

4.4 Caracterización morfológica

El análisis morfológico se lo realizó mediante microscopio electrónico de barrido (SEM)

4.4.1 Descripción general de la microestructura de la GaK

Las imágenes obtenidas mediante SEM revelan características distintivas de la microestructura [10] de la GaK sin tratamiento. En la Figura 4.8 a), se observan claramente los haces vasculares y el parénquima, elementos estructurales fundamentales para el transporte de nutrientes y almacenamiento de energía en la planta. La Figura 4.8 b) detalla los componentes del haz vascular, identificándose específicamente las fibras (1), el metaxilema (2), el floema (3), el protoxilema (4) y el tejido parenquimático (5).

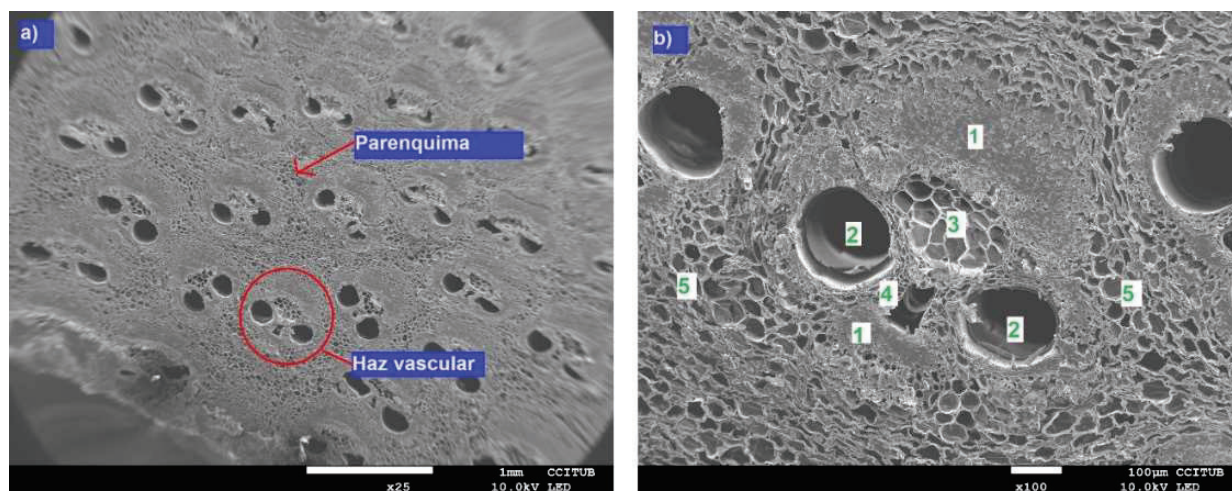


Figura 4.8 Imágenes de microscopía electrónica a) Estructura microscópica del grupo de control en GaK: haces vasculares y parénquima; b) Detalle del haz vascular: fibras (1), metaxilema (2), floema (3), protoxilema (4) y parénquima (5).

4.4.2 Efectos de los Tratamientos Térmicos y Térmico-Químico.

El análisis transversal del haz vascular para los diferentes tratamientos muestra variaciones significativas en la integridad estructural y composición química del material. La muestra GC (Figura 4.9a) exhibe haces vasculares intactos, indicando la preservación estructural en ausencia de tratamiento. Contrariamente, la muestra TT30 (Figura 4.9b) muestra una ligera deformación en el protoxilema, indicando el inicio de descomposición

o deshidratación de las células debido al calor; mientras que en TT60 (Figura 4.9c) la deformación es más extensa, afectando todas las partes del haz vascular. La muestra TT90 (Figura 4.9d) presenta deformaciones notables, especialmente en el floema y protoxilema. Sin embargo, la degradación más pronunciada se observa en TT120 (Figura 4.9e), donde todos los componentes del haz vascular muestran signos evidentes de un mayor deterioro. Aunque TTQ60 (Figura 4.9f) también muestra deformaciones, estas son menos severas que en TT60, sugiriendo una protección parcial proporcionada por el tratamiento químico.

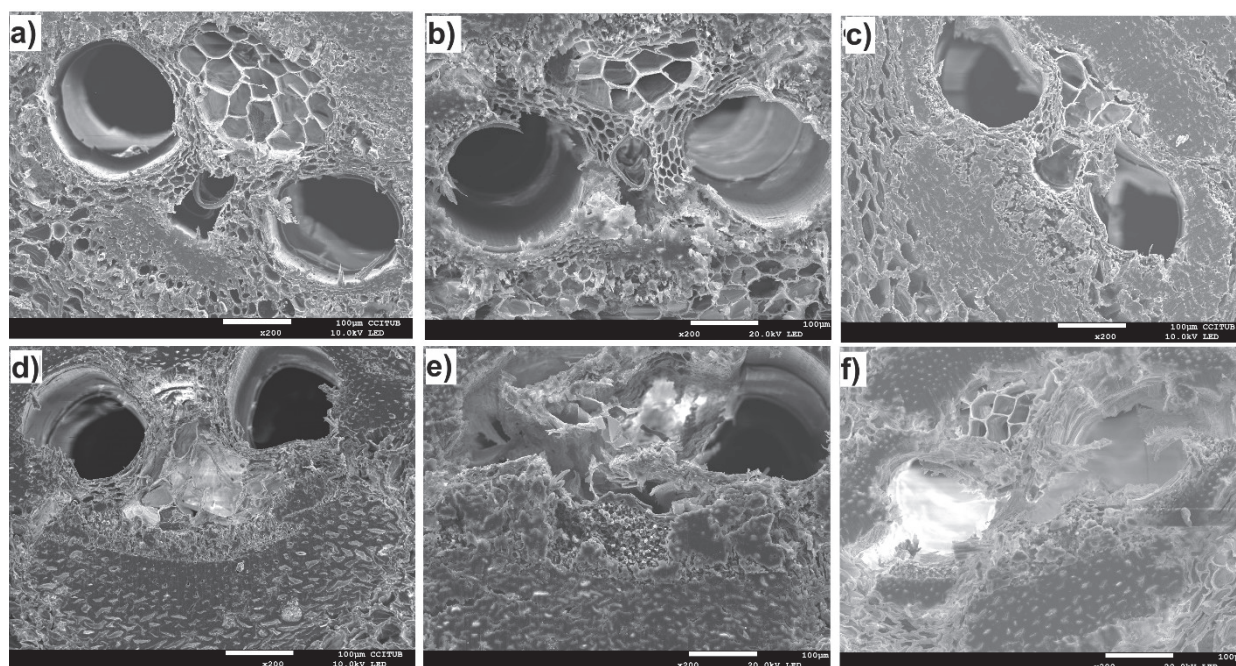


Figura 4.9 Análisis transversal del haz vascular para los diferentes tratamientos a) GC, b) TT30, c) TT60, d) TT90, e) TT120 y f) TTQ60

En cuanto al contenido de almidón y la estructura del tejido parenquimático, se observa que TT30 (Figura 4.10b) mantiene una estructura celular y contenidos de almidón similares al grupo de control (Figura 4.10a), lo que implica una menor afectación por el tratamiento. A partir de TT60 (Figuras 4.10 c, d, e y f), no se detecta almidón y la estructura del parénquima muestra deformaciones marcadas, evidenciando el impacto negativo del calor prolongado sobre la capacidad de almacenamiento y la integridad celular del culmo.

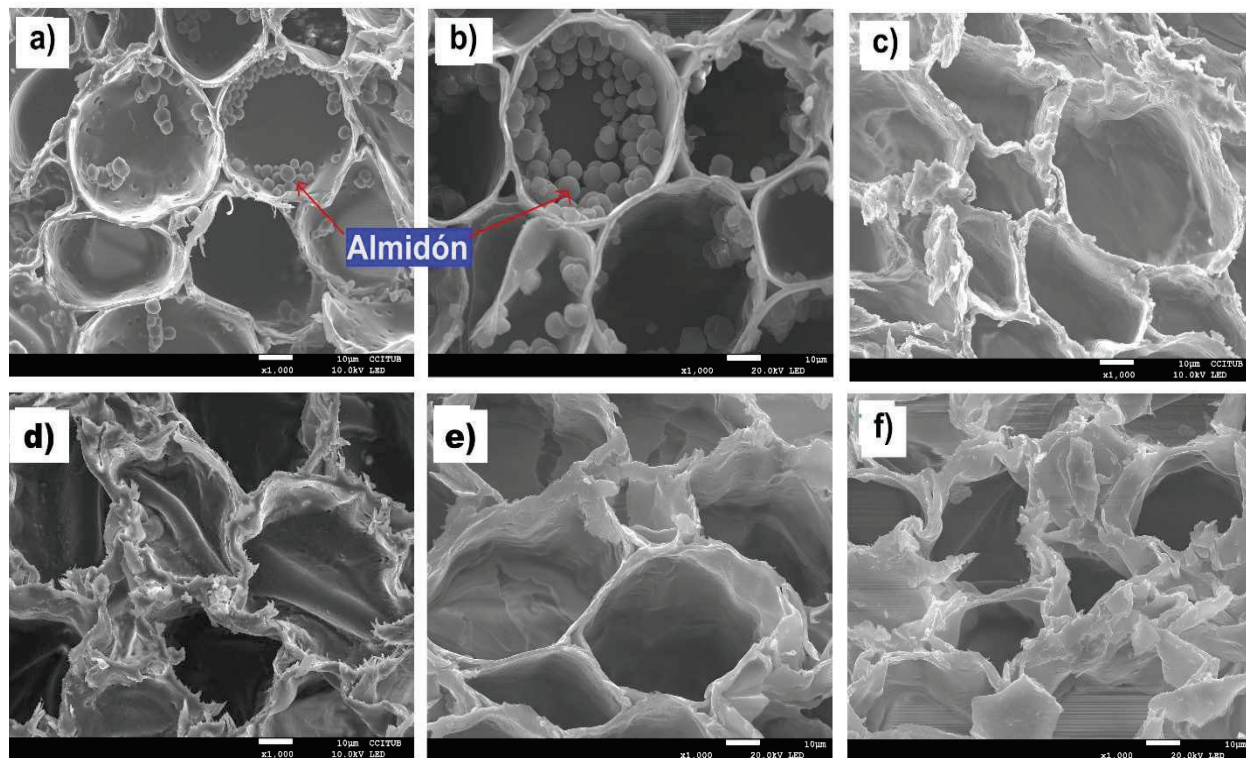


Figura 4.10 Comparación del tejido parenquimático y almidón de láminas de GaK tratadas y no tratadas a) GC, b) TT30, c) TT60, d) TT90, e) TT120 y f) TTQ60

El análisis detallado de la formación de grietas bajo los tratamientos térmicos y térmico-químicos revela un aumento en la aparición de estas bajo condiciones de mayor tiempo de exposición al TT. Lo cual se puede evidenciar claramente en el TT120 (Figura 4.11 2). En el TTQ60 (Figura 4.11 3), esta característica fue menos evidenciada respecto a los TT de mayor o igual tiempo de duración.

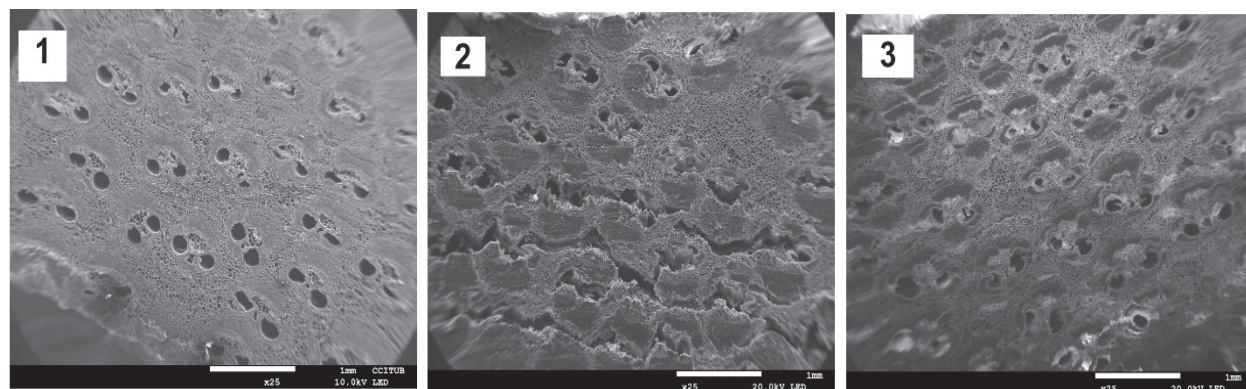


Figura 4.11 Comparación de grietas entre los tratamientos 1 (GC), 2 (TT120) y 3 (TTQ60).

Este fenómeno puede atribuirse a la expansión térmica y la posterior contracción durante el enfriamiento, lo que resulta en una pérdida de cohesión entre las fibras celulares y la matriz que las rodea.

Estos resultados son coherentes con los descritos en la sección 4.3, donde se evidencia la degradación de los componentes de la GaK, especialmente la hemicelulosa conforme se incrementa el tiempo del tratamiento térmico. Los cambios observados en la microestructura del bambú, especialmente en el cambio de forma de las paredes celulares y la desaparición de gránulos de almidón con tratamientos térmicos, coinciden con los resultados reportados por Li [1], Chen [11], quienes también notaron una degradación significativa en las células del parénquima y en los haces vasculares después de tratamientos térmicos intensos. Esta similitud refuerza la validez de los tratamientos térmicos considerando como un factor crítico a la variable tiempo que influye negativamente en la estabilidad estructural del bambú, a través de la descomposición térmica de componentes celulares clave como la hemicelulosa, celulosa y la lignina [8][12].

Los resultados indican que los tratamientos térmicos provocan cambios estructurales en la GaK, con un deterioro progresivo a medida que aumenta la duración del tratamiento. El tratamiento térmico-químico ofrece cierta mitigación de estos efectos, posiblemente debido a la estabilización de las estructuras celulares por los agentes químicos. Estos hallazgos son fundamentales para comprender las limitaciones y potenciales de la GaK en aplicaciones que requieren resistencia a condiciones ambientales extremas o procesamiento industrial

4.5 Caracterización Mecánica.

4.5.1 Análisis de flexión

Se utilizó la prueba de flexión a tres puntos para analizar los efectos de los tratamientos térmicos y una solución de bórax y ácido bórico en las propiedades mecánicas de láminas de GaK, específicamente en términos de densidad (δ), módulo de elasticidad (E) y

resistencia a la flexión (σ). La Figura 4.12 ilustra las variaciones del E entre tratamientos, resaltando cambios en la rigidez estructural.

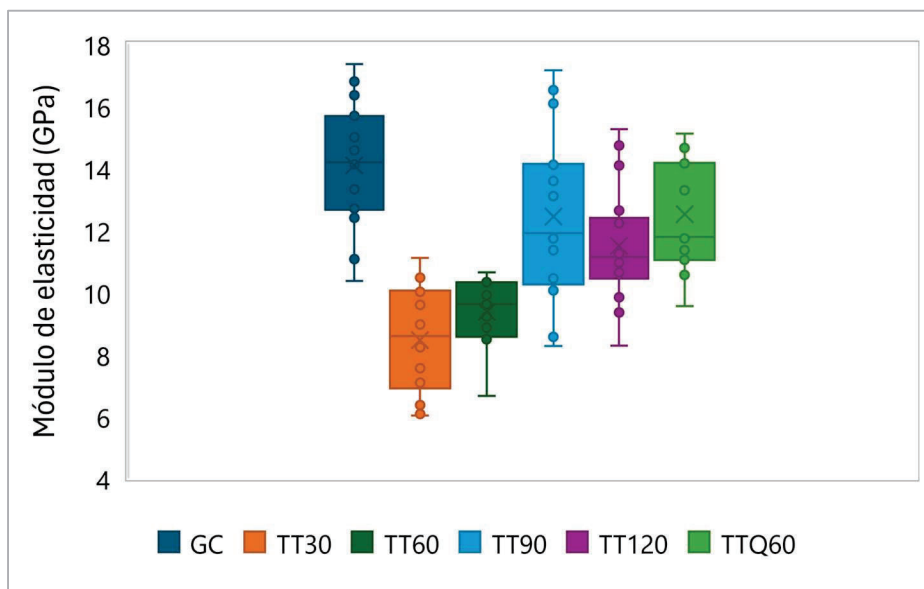


Figura 4.12 Variaciones del módulo de elasticidad entre tratamientos.

La Figura 4.13 compara la resistencia a la flexión, evidenciando cómo los tratamientos afectan la capacidad del bambú para soportar cargas flexionales.

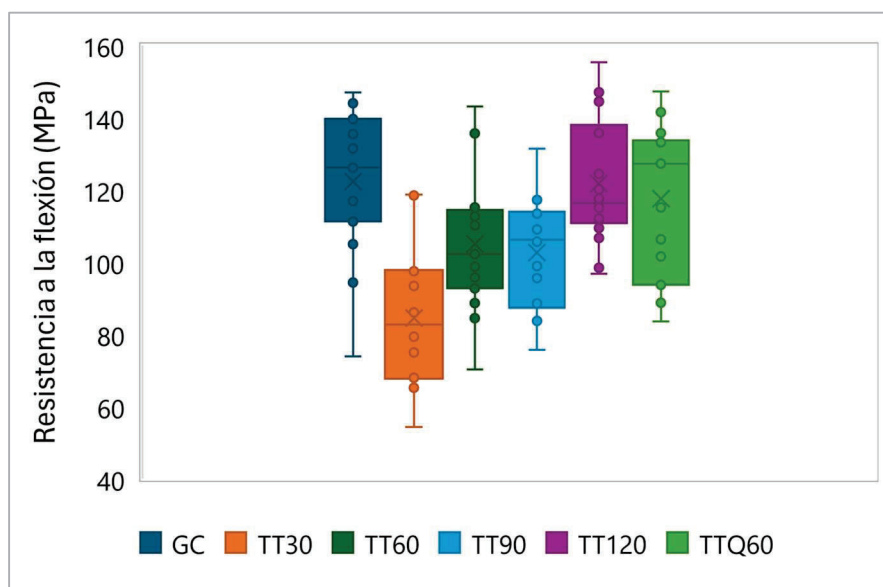


Figura 4.13 Comparación de la resistencia a la flexión entre tratamientos.

La Tabla 4.6 detalla los valores promedio y desviaciones estándar de estas propiedades mecánicas.

Tabla 4.6 Resumen de Propiedades Mecánicas de Láminas de Bambú respecto al ensayo de flexión de tres puntos.

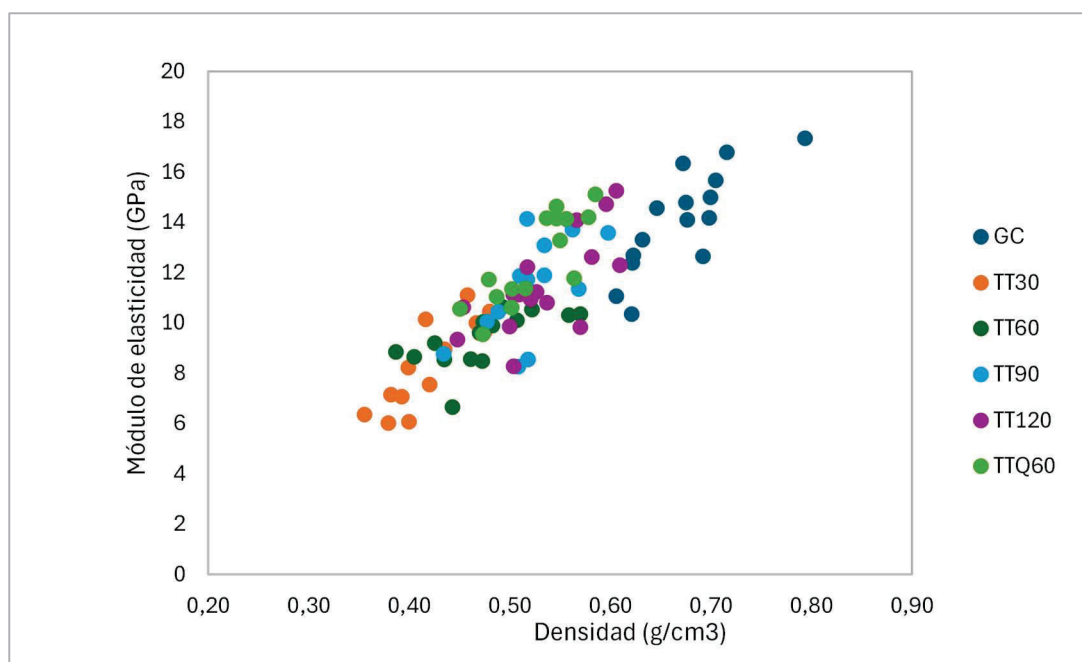
Grupo	Nº de probetas	δ (g/cm ³)	DE (g/cm ³)	E (GPa)	DE (GPa)	σ_f (MPa)	DE (MPa)
GC	20	0,67	0,05	14,08	2,03	122,31	20,13
TT30	20	0,42	0,04	8,45	1,75	84,57	19,80
TT60	20	0,47	0,05	9,36	1,08	105,07	18,86
TT90	20	0,52	0,04	11,54	2,07	102,70	15,65
TT120	20	0,53	0,05	11,48	1,82	121,74	17,38
TTQ60	20	0,52	0,04	12,51	1,79	117,60	21,73

En todos los casos la δ promedio de los tratamientos es menor a la del grupo de control (0,67 g/cm³). El tratamiento TT30 muestra el valor más bajo (0,42 g/cm³), aumentando gradualmente hasta estabilizarse en TT90 (0,52 g/cm³), y manteniéndose similar en TT120 y TTQ60. Esta reducción inicial en TT30 puede indicar la pérdida de humedad y volátiles debido al tratamiento térmico, lo cual reduce la masa sin afectar significativamente el volumen de las láminas. El aumento progresivo de la δ en los tratamientos subsiguientes sugiere una reorganización o compactación de la estructura interna del material, así como la intervención de sustancias químicas como el bórax o ácido bórico en TTQ60.

El E, comparado con el grupo de control muestra una notable disminución con el tratamiento térmico más corto (TT30), seguido de una recuperación progresiva con tratamientos prolongados hasta estabilizarse en TT120. Estos tratamientos más prolongados (TT90 y TT120) pueden inducir la cristalización de la celulosa y la condensación de la lignina, lo que fortalece y ordena la estructura del bambú, evidenciándose en un mayor E. Además, la remoción de extractos solubles y otros componentes de baja molecularidad que actúan como plastificantes naturales durante estos tratamientos largos contribuye a un aumento en la rigidez del material. Lo cual es coherente con el análisis de morfología, dónde se evidenció la remoción de estos componentes conforme se incrementa el tiempo de tratamiento.

Investigaciones de S. Li[1] y X. Li [13] indican que los tratamientos hidrotermales a altas temperaturas y tiempos más prolongados impactan negativamente en las propiedades mecánicas del bambú Moso, principalmente debido a la degradación de la hemicelulosa y despolimerización de la lignina, comprometiendo su resistencia y estabilidad. El tratamiento térmico-químico (TTQ60) parece estabilizar o incluso mejorar esta rigidez comparado con los tratamientos puramente térmicos.

Al comparar el E con la δ se evidencia una relación directa a mayor δ mayor es el E. La Figura 4.14 ilustra el comportamiento del E de la GaK respecto a la densidad entre el grupo de control y los diferentes tratamientos.



sugiere que el tratamiento con bórax ácido bórico por 60 min puede estabilizar el material de manera similar a los tratamientos de 90 y 120 min de ebullición en agua.

Estos hallazgos presentados son esenciales para entender cómo los diferentes tratamientos térmicos y químicos pueden ser utilizados para modificar las propiedades del bambú, aspecto crucial para su uso potencial en aplicaciones estructurales y de construcción.

4.6 Caracterización térmica

La caracterización térmica de las láminas de GaK tratadas y sin tratar se llevó a cabo mediante la medición del LOI y la aplicación de una fuente de calor constante (epirradiator) para evaluar el comportamiento al fuego del material.

4.6.1 Determinación del índice de oxígeno limitante (LOI)

La Figura 4.15 presenta los resultados de LOI en los diferentes grupos de interés.

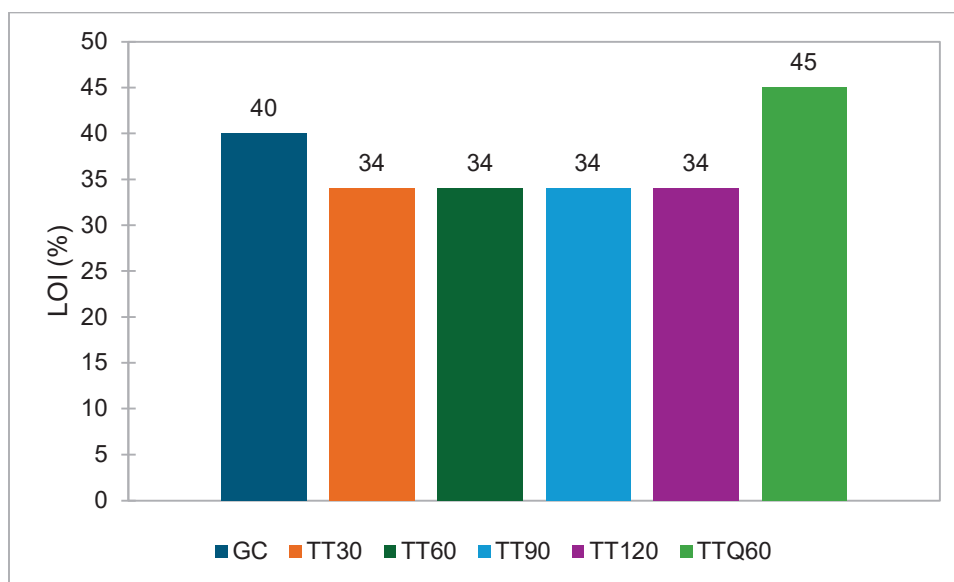


Figura 4.15 Impacto de tratamientos térmicos y químicos en el LOI de láminas de GaK.

Todos los tratamientos térmicos coinciden con el mismo valor de LOI obteniendo el valor más bajo, lo que sugiere una mayor facilidad para la ignición del material, posiblemente debido a la pérdida de componentes que actúan como barreras o retardantes de llama,

como la humedad y ciertos extractos volátiles, además de la descomposición de otros compuestos como la hemicelulosa que podría dejar poros o cavidades mejorando la transferencia de calor a través del material y permitiendo una mayor penetración y circulación del oxígeno

El hecho de que el TTQ60 muestre un LOI más alto sugiere que el bórax y el ácido bórico podrían estar contribuyendo a la formación de una barrera física o química que inhibe la combustión, o incluso cambiando la composición química de la superficie del bambú para hacerla menos inflamable. La presencia de boro [14] promueve la producción de residuos de carbono en el de bambú y disminuyen la pérdida de masa durante el incendio.

4.6.2 Prueba de epirradiator.

Este procedimiento implica someter las muestras a una fuente de calor constante durante 5 min, lo que provoca la posible ignición de gases combustibles y, en última instancia, inicia una reacción de llama. La Figura 4.16 muestra el estado de las probetas antes y después de la prueba



Figura 4.16 Probetas a) antes y b) después de la prueba de epirradiator.

Se examinó la inflamabilidad y la estabilidad térmica de muestras no tratadas y aquellas sometidas a tratamientos térmicos y térmico-químicos a través de los parámetros claves de: número de igniciones (N), tiempo hasta la primera ignición (t_0), duración de la ignición (t_m) y pérdida de masa (PM). Estos parámetros proporcionan información valiosa sobre la capacidad del material para resistir la propagación y autoextinguir las llamas. La Tabla 4.7 recoge las evaluaciones en términos del promedio y la desviación estándar (DE) de las respuestas de las láminas de GaK frente a la exposición al fuego de una fuente de 500 W.

Tabla 4.7 Efectos de tratamientos térmicos y químicos sobre la inflamabilidad y estabilidad térmica de láminas de bambú en pruebas de epirradiator.

Grupo	N	DE (N)	t_0 (s)	DE (t_0)	t_m (s)	DE (t_m)	PM (%)	DE PM
GC	6,67	2,08	21,67	3,79	8,86	2,91	85,00	4,00
TT30	7,00	0,00	14,00	2,65	9,29	0,65	88,00	2,00
TT60	6,67	0,58	16,00	1,00	10,14	1,87	90,00	3,00
TT90	6,67	1,15	19,00	6,93	13,18	4,47	90,30	0,40
TT120	6,00	0,00	18,00	5,20	16,11	7,28	89,60	2,20
TTQ60	5,67	0,58	25,67	5,13	8,72	4,86	77,50	2,80

El número promedio de igniciones apenas varía entre los tratamientos, lo que indica que todos los tratamientos, incluido el grupo de control, poseen una tendencia similar hacia la re-ignición bajo exposición directa al fuego.

Se observa que las láminas tratadas térmicamente (TT30) alcanzan la primera ignición más rápidamente que el grupo de control, sugiriendo una mayor susceptibilidad inicial a la ignición. Sin embargo, el tratamiento térmico-químico (TTQ60) retrasa este tiempo, lo que podría indicar una mayor resistencia a la inflamación inicial tras la adición de bórax y ácido bórico.

La duración de la ignición aumenta progresivamente con la duración del tratamiento térmico, alcanzando su punto máximo en TT120. Esto refleja una mayor cantidad de material combustible o un cambio en la composición que prolonga la combustión activa. Curiosamente, el TTQ60 exhibe una duración menor, lo que sugiere una efectividad del tratamiento químico en la reducción de la combustión sostenida.

La pérdida de masa se incrementa levemente con los tratamientos térmicos, indicando una progresiva degradación y volatilización del material. No obstante, el tratamiento TTQ60 muestra una reducción en la pérdida de masa, lo cual es indicativo de una mayor estabilidad térmica o de la formación de un residuo carbonoso [14] más resistente a la degradación.

La Figura 4.16 muestra el estado de las probetas antes y después de la prueba.

Los datos sugieren que los tratamientos térmicos influyen marginalmente en la tendencia del bambú a re-ignición, pero alteran significativamente el comportamiento de la combustión una vez que se inicia la ignición. En contraste, el tratamiento con bórax y ácido bórico parece mejorar las características de resistencia al fuego del bambú, dilatando la iniciación de la ignición y abreviando la duración de la combustión, además de aumentar la masa residual. Estos hallazgos son consistentes con los estudios de Haurie [15] y Yu [16], este último resalta la capacidad del ácido bórico para fomentar la carbonización y del bórax para restringir la emisión de calor. Este estudio enriquece la comprensión de las repercusiones de los tratamientos aplicados a la GaK en la resistencia al fuego, contribuyendo a la seguridad y sustentabilidad en la aplicación de estos materiales.

4.7 Análisis biológico

La Figura 4.17 muestra los resultados de un seguimiento durante una semana del cultivo en Columbia agar con 5% de sangre de oveja de las aguas de cocción del bambú tratadas con los métodos TT60 y TTQ60. Aquí, el análisis se enfoca en las diferencias visibles de crecimiento bacteriano entre ambos tratamientos en varios días.

En el Día 0, ambos platos (TT60 y TTQ60) presentan un agar limpio y sin crecimiento visible, indicando que inicialmente no había contaminación o crecimiento bacteriano activo en las muestras.

Para el Día 3, se observa un cambio notable, el plato correspondiente al tratamiento TT60 muestra signos de colonización bacteriana, evidenciado por las colonias de color rojo y

amarillo. En contraste, el plato TTQ60 sigue mostrando un aspecto limpio sin signos visibles de crecimiento.

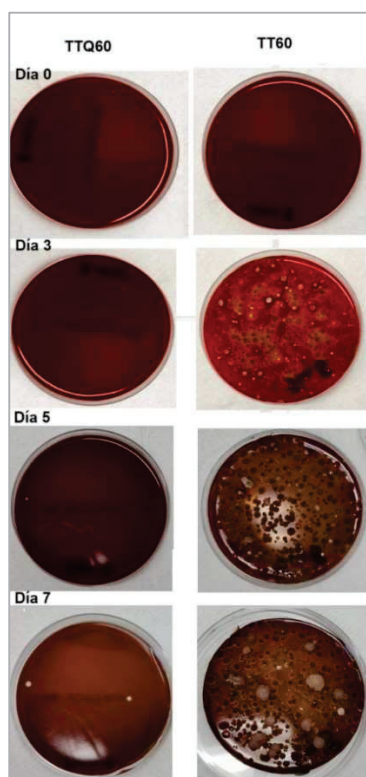


Figura 4.17 Comparación del crecimiento bacteriano en aguas de cocción de bambú tratadas (TT60 y TTQ60) cultivadas en Columbia agar con 5% de sangre de oveja a lo largo de una semana.

En el Día 5, el plato TT60 muestra un incremento en la cantidad y diversidad de las colonias, con una proliferación más extensa de bacterias. El plato TTQ60 aún permanece relativamente claro, pero comienza a mostrar unas pocas colonias, indicando un inicio tardío de crecimiento bacteriano.

Para el Día 7, el plato TT60 está densamente colonizado por diversas colonias bacterianas, sugiriendo una alta biocarga o menor efectividad del tratamiento térmico en suprimir o retardar el crecimiento bacteriano. En cambio, el plato TTQ60 muestra un aumento en el número de colonias, aunque en mucha menor cantidad comparado con TT60, lo que podría indicar que el tratamiento químico con bórax y ácido bórico en TTQ60 tiene un efecto bacteriostático o bactericida, retrasando significativamente el crecimiento bacteriano.

Estos resultados sugieren que el tratamiento TTQ60 podría ofrecer propiedades antibacterianas o retardantes del crecimiento bacteriano más efectivas que el tratamiento térmico solo (TT60), posiblemente debido a la presencia de bórax y ácido bórico que alteran la viabilidad o el crecimiento de los microorganismos.

4.8 Conclusiones

Los tratamientos térmicos y termoquímicos aplicados a las láminas de GaK demostraron influir significativamente en la degradación de hemicelulosas y en menor medida de la celulosa y lignina conforme el incremento del tiempo del tratamiento, lo cual fue evidenciado por la alteración de sus estructuras químicas, morfología y la disminución de la resistencia y estabilidad mecánica. La inclusión de bórax y ácido bórico en el tratamiento termoquímico mostró mejores propiedades mecánicas que los tratamientos térmicos y potencial para mejorar la resistencia al fuego y retardar la degradación bacteriana.

Los hallazgos del estudio subrayan la viabilidad de utilizar tratamientos modificados para mejorar la durabilidad y funcionalidad del bambú en aplicaciones de construcción sostenible, ofreciendo un equilibrio entre mejora de propiedades y minimización del impacto ambiental.

Este capítulo contribuye al entendimiento científico de cómo los tratamientos térmicos y químicos afectan la GaK, una materia prima ampliamente utilizada en muchas regiones tropicales como en el caso de Ecuador. Los resultados ayudan a definir parámetros óptimos para el procesamiento del bambú que maximizan su utilidad mientras se preserva su carácter renovable y ecológico.

4.9 Bibliografía

- [1] S. N. Li, Y. M. Zhang, Y. L. Yu, and W. J. Yu, “Effect of Boiling Treatment on Physical and Mechanical Properties of Moso Bamboo,” *Chinese J. Wood Sci. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 59–64, 2021, doi: 10.12326/j.2096-9694.2020158.
- [2] J. L. Wen *et al.*, “Comparative study of alkali-soluble hemicelluloses isolated from bamboo (*Bambusa rigida*),” *Carbohydr. Res.*, vol. 346, no. 1, pp. 111–120, 2011,

- doi: 10.1016/j.carres.2010.10.006.
- [3] S. N. Sun, T. Q. Yuan, M. F. Li, X. F. Cao, F. Xu, and Q. Y. Liu, "Structural characterization of hemicelluloses from bamboo culms (*neosinocalamusaffinis*)," *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 46, no. 3–4, pp. 165–176, 2012.
 - [4] Y. Huang, F. Meng, R. Liu, Y. Yu, and W. Yu, "Morphology and supramolecular structure characterization of cellulose isolated from heat-treated moso bamboo," *Cellulose*, vol. 26, no. 12, pp. 7067–7078, 2019, doi: 10.1007/s10570-019-02614-7.
 - [5] C. Huang, J. He, L. Du, D. Min, and Q. Yong, "Structural Characterization of the Lignins from the Green and Yellow Bamboo of Bamboo Culm (*Phyllostachys pubescens*)," *J. Wood Chem. Technol.*, vol. 36, no. 3, pp. 157–172, 2016, doi: 10.1080/02773813.2015.1104544.
 - [6] D. Yang, L. X. Zhong, T. Q. Yuan, X. W. Peng, and R. C. Sun, "Studies on the structural characterization of lignin, hemicelluloses and cellulose fractionated by ionic liquid followed by alkaline extraction from bamboo," *Ind. Crops Prod.*, vol. 43, no. 1, pp. 141–149, 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2012.07.024.
 - [7] Y. Zhang, H. Wang, X. Sun, Y. Wang, and Z. Liu, "Separation and Characterization of Biomass Components (Cellulose, Hemicellulose, and Lignin) from Corn Stalk," *BioResources*, vol. 16, no. 4, pp. 7205–7219, 2021, doi: 10.15376/biores.16.4.7205-7219.
 - [8] Y. Zhang, Y. Yu, Y. Lu, W. Yu, and S. Wang, "Effects of heat treatment on surface physicochemical properties and sorption behavior of bamboo (*Phyllostachys edulis*)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 282, p. 122683, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122683.
 - [9] D. Li, S. Yang, Z. Liu, Z. Wang, N. Ji, and J. Liu, "Effects of Heat Treatment under Different Pressures on the Properties of Bamboo," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 14, 2023, doi: 10.3390/polym15143074.
 - [10] L. Osorio, E. Trujillo, F. Lens, J. Ivens, I. Verpoest, and A. W. Van Vuure, "In-depth study of the microstructure of bamboo fibres and their relation to the mechanical properties," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 37, no. 17, pp. 1099–1113, 2018, doi: 10.1177/0731684418783055.
 - [11] H. Chen, Y. Zhang, X. Yang, H. Ji, T. Zhong, and G. Wang, "A comparative study of the microstructure and water permeability between flattened bamboo and bamboo culm," *J. Wood Sci.*, vol. 65, no. 1, pp. 0–14, 2019, doi: 10.1186/s10086-019-1842-0.
 - [12] X. Wang *et al.*, "Effect of high-temperature saturated steam treatment on the physical, chemical, and mechanical properties of moso bamboo," *J. Wood Sci.*, vol. 66, no. 1, 2020, doi: 10.1186/s10086-020-01899-8.
 - [13] X. Li, H. Peng, S. Niu, X. Liu, and Y. Li, "Effect of High-Temperature Hydrothermal Treatment on Chemical, Mechanical, Physical, and Surface Properties of Moso

- Bamboo,” *Forests*, vol. 13, no. 5, 2022, doi: 10.3390/f13050712.
- [14] L. L. Yu, F. Lu, D. C. Qin, H. Q. Ren, and B. H. Fei, “Combustibility of boron-containing fire retardant treated bamboo filaments,” *Wood Fiber Sci.*, vol. 49, no. 2, pp. 125–133, 2017.
- [15] L. Haurie, A. Avellaneda, and J. Monton, “Fire Behavior of Bamboo, *Guadua angustifolia*,” in *Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety 2020 9*, 2020, pp. 103–108.
- [16] L. Yu, J. Cai, H. Li, F. Lu, D. Qin, and B. Fei, “Effects of boric acid and/or borax treatments on the fire resistance of bamboo filament,” *BioResources*, vol. 12, no. 3, pp. 5296–5307, 2017, doi: 10.15376/biores.12.3.5296-5307.

A vertical image of wooden planks with a natural grain pattern, showing various shades of brown and tan. The planks are arranged horizontally, creating a textured background.

Capítulo 5.

Análisis del ciclo de vida de tableros laminados de GaK

- Introducción
- Descripción del proceso
- Escenarios
- Análisis del ciclo de vida
- Conclusiones
- Referencias bibliográficas

5 Análisis del ciclo de vida (ACV) de tableros laminados de GaK

5.1 Introducción

En este capítulo, se presenta el análisis de la sostenibilidad de tableros laminados de GaK, producidos en la comunidad de Dos Mangas, Provincia de Santa Elena, a través de la evaluación del análisis del ciclo de vida (ACV), metodología descrita en el capítulo 3 de este documento. Se analizaron los efectos del potencial de calentamiento global (PCG) para un período de 100 años, considerando y excluyendo el carbono biogénico, así como el potencial de ecotoxicidad acuática en agua dulce (PEAAD), el potencial de creación de ozono fotoquímico (PCOF), el potencial de ecotoxicidad terrestre (PET) y el valor calorífico neto.

5.2 Descripción del proceso

Los tableros se ensamblan a partir de láminas tratadas térmicamente de GaK, utilizando prensado en caliente y resina de urea formaldehído como adhesivo. Un lote de producción de 60 culmos de GaK (medidas: 6000 x 125 mm) produce 12 tableros, cada uno formado por 50 láminas (2400 x 20 x 5 mm). La Tabla 5.1 resume las principales actividades de cada etapa que se enumeran de forma cronológica.

Tabla 5.1 Resumen de las actividades de los procesos.

Nº Etapa	Proceso	Actividad
1	Corte	Se cortan los culmos a 2400 mm de longitud
2	Elaboración de Latillas	Los culmos se cortan longitudinalmente, retirando los nudos para obtener latillas de 2400 mm x 30 mm
3	Tratamiento térmico	Las latillas se tratan en agua en ebullición durante 120 min (TT120)
4	Secado	Después de escurrir a temperatura ambiente, las latillas se secan en una cámara por siete días
5	Cepillado	Se cepillan las latillas para convertirlas en láminas
6	Ensamblaje	Las láminas se prensan en caliente durante 30 min
7	Lijado	Se lija el tablero para obtener el acabado final

La Figura 5.1 detalla el flujo del proceso de fabricación de tableros laminados de GaK.

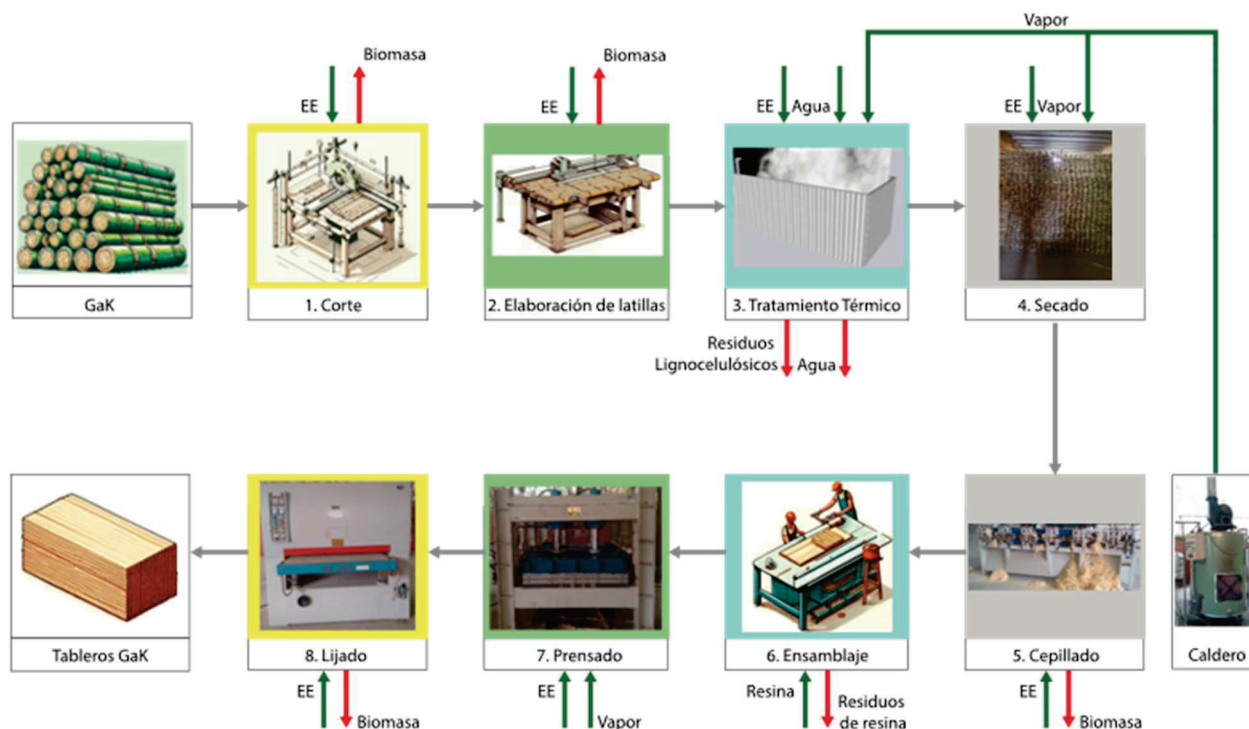


Figura 5.1 Flujo del proceso de elaboración de tableros de GaK.

La Tabla 5.2 muestra las especificaciones de los tableros.

Tabla 5.2 Especificaciones del tablero de GaK.

Producto	Tablero laminado de bambú prensado en caliente
Materia pima	<i>Guadua angustifolia Kunth</i> (GaK)
Tamaño	2400 x 1000 x 5 mm
Peso	8,4 kg
Volumen	$1,2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$
Densidad aprox.	700 kg/m ³
Ubicación	Santa Elena, Ecuador
Acabado	Color natural, lijado sin recubrimiento

5.3 Escenarios

Para comprender los diferentes enfoques y estrategias potenciales en la producción de tableros laminados de GaK y su impacto ambiental asociado, se diseñaron dos escenarios dentro del marco del análisis del ciclo de vida (ACV). Cada escenario refleja diferentes enfoques en la gestión de recursos y residuos, permitiendo comparar las implicaciones ambientales de las prácticas actuales frente a una posible optimización del

proceso. La Tabla 5.3 muestra resume las características fundamentales de cada escenario.

Estos escenarios permiten una evaluación comparativa del desempeño ambiental de los procesos de producción de tableros laminados bajo diferentes condiciones operativas y de gestión de residuos.

Tabla 5.3 Descripción de los escenarios de estudio.

Escenario	Descripción
E01	Representa el proceso actual sin recirculación de flujos. En este escenario, el tratamiento térmico se lleva a cabo en un recipiente abierto, lo que facilita la evaporación excesiva y las pérdidas de calor. Los residuos generados se dejan degradar en la naturaleza, sin ningún tratamiento o aprovechamiento posterior.
E02	Este escenario propone mejoras en la gestión de recursos y residuos. Los residuos de biomasa generados en el proceso se incineran y la energía resultante se utiliza para generar vapor, que se reintroduce en el sistema. Adicionalmente, el recipiente utilizado para el tratamiento térmico se cierra para minimizar las pérdidas de calor y evaporación. El agua empleada en el tratamiento térmico se filtra y se recicla en el sistema, optimizando el uso de este recurso vital.

5.4 Análisis del ciclo de vida

Para el ACV se usó como unidad funcional 600 láminas de GaK (12 tableros) que corresponden a un lote de producción. El límite del análisis fue el proceso de manufactura, desde la entrega de la materia prima hasta la entrega de los tableros. La mayoría de los datos fueron obtenidos de la empresa productora de la Prefectura de Santa Elena (Ecuador) o extrapolados de procesos experimentales a pequeña escala. Para ciertos procesos o flujos, se hicieron aproximaciones detalladas en la Tabla 5.4. La energía utilizada para producir vapor proviene de biomasa, y la energía eléctrica es generada exclusivamente a partir de fuentes hidroeléctricas [1].

Tabla 5.4 Aproximaciones de los procesos.

Proceso	Aproximaciones
Tratamiento Térmico	La humedad relativa es del 80% y la temperatura ambiental es de 25 °C. El consumo de vapor se estimó equivalente a la cantidad de agua evaporada [2].
Secado	Las condiciones ambientales son las mismas que para el cocido. La energía para calentar se estimó asumiendo un intercambiador de calor.
Ensamblaje	Se utilizó un genérico para la resina.

La Tabla 5.5 muestra los flujos de masa y energía asociadas a la unidad funcional para el escenario E01. Los valores parámetros de entrada y salida que presentan un * se aproximaron de acuerdo con lo indicado en la Tabla 5.4

Los resultados y discusión de los factores de impacto evaluados se presentan a continuación.

Tabla 5.5 Flujos de masa y energía del escenario E01.

Entrada	Valor	Unidades	Proceso	Salida	Valor	Unidades
GaK	375,50	kg	Corte	GaK	300,40	kg
Electricidad	40,50	MJ		Biomasa GaK	75,10	kg
GaK	300,00	kg	Latillas	GaK	241,92	kg
Electricidad	76,90	MJ		Biomasa GaK	58,48	kg
GaK	241,92	kg	Tratamiento térmico	GaK	233,17	kg
Agua	750,00	kg		Agua	750,00	kg
Vapor de agua*		kg		Residuos lignocelulósicos GaK	18,75	kg
Electricidad*		MJ		Vapor de agua*		kg
GaK	233,17	kg	Secado	GaK	183,37	kg
Vapor de agua*		kg		Vapor de agua	39,80	kg
Electricidad*		MJ				
GaK	183,37	kg	Cepillado	GaK	138,6	kg
Electricidad	98,70	MJ		Biomasa GaK	44,77	kg
GaK	138,60	kg	Ensamblaje	GaK	139,60	kg
Resina urea formaldehído	1,05	kg		Residuos de resina urea formaldehído	0,05	kg
GaK	139,60	kg	Prensado	GaK	139,60	kg
Electricidad	75,60	MJ				
GaK	139,60	kg	Lijado	GaK	126,00	kg
Electricidad	55,80	MJ		Biomasa GaK	13,60	kg

5.4.1 Potencial de calentamiento global (PCG 100 años), considerando y excluyendo el carbono biogénico

La Figura 5.2 presenta el PCG en kg de CO₂ equivalente de los dos escenarios durante un periodo de 100 años. Tanto considerando como excluyendo el carbono biogénico.

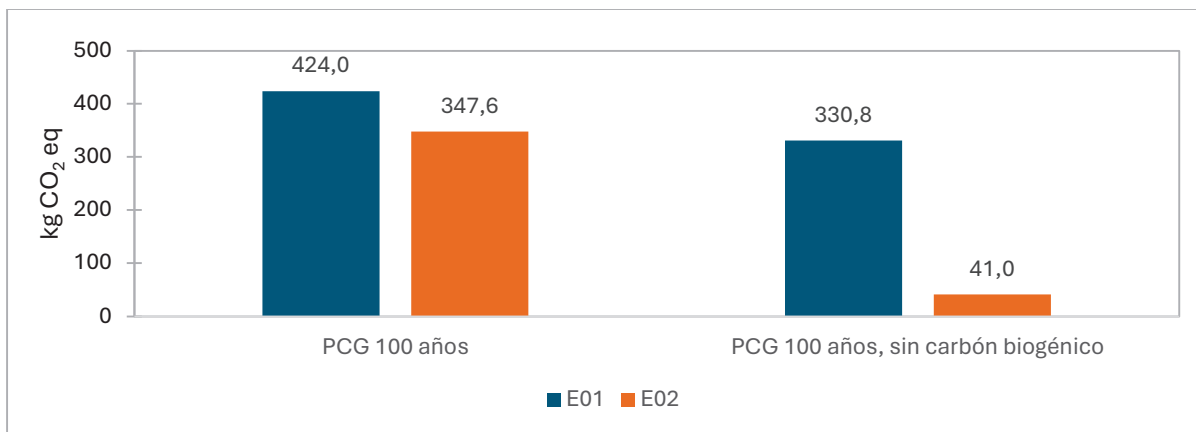


Figura 5.2 Potencial de calentamiento global (PCG 100 años), considerando y excluyendo el carbono biogénico.

PCG con carbono biogénico incluido:

El escenario E01 indica una mayor emisión de gases de efecto invernadero (GEI) asociada al proceso actual (424,0 kg CO₂ eq), donde no se recirculan flujos y el tratamiento térmico se realiza en un recipiente abierto. La evaporación y las pérdidas de calor, junto con la degradación de residuos en la naturaleza, contribuyen significativamente a estas emisiones.

El escenario E02 refleja una reducción del 18 % en las emisiones de GEI en comparación con E01. Este escenario integra la incineración de residuos para generar energía y el uso de un sistema cerrado para el tratamiento térmico, que mejora la eficiencia energética y reduce las pérdidas térmicas. Además, la reutilización del agua contribuye a menor generación de GEI.

PCG excluyendo carbono biogénico

Al excluir el carbono biogénico, las emisiones de GEI en E01 disminuyen el 21% en comparación con el total incluyendo este carbono, lo que indica que una parte significativa de las emisiones en E01 proviene de fuentes no biogénicas, como la energía fósil utilizada en el proceso abierto.

El escenario E02 exhibe una reducción drástica del 88% de las emisiones de GEI cuando se excluye el carbono biogénico. Esto sugiere que la mayoría de las emisiones en E02 son biogénicas, y el cambio a técnicas de incineración de residuos y reciclaje de agua ha minimizado las emisiones de fuentes fósiles.

La diferencia significativa entre las emisiones de GEI con y sin carbono biogénico en E02 demuestra el impacto positivo de las prácticas sostenibles, como la incineración de residuos para generar energía, que se traduce en una menor dependencia de fuentes energéticas fósiles y una reducción de la huella de carbono del proceso.

La considerable reducción de emisiones en E02, incluso al considerar el carbono biogénico, resalta la efectividad de cerrar el recipiente durante el tratamiento térmico y reciclar el agua, lo que no solo mejora la eficiencia energética, sino que también contribuye a una gestión más sostenible de los residuos.

Los resultados indican que optimizar los procesos productivos en la fabricación de tableros laminados no solo es viable sino necesario para disminuir las emisiones de GEI y mejorar la sostenibilidad general de la producción.

A pesar de la escasa información sobre ACV en tableros de bambú, el estudio de Restrepo [3] sobre tableros de esteras de GaK reporta un PCG de -117 kg CO₂ eq. La diferencia podría radicar en el proceso tecnológico y en la consideración de las emisiones evitadas. Esta comparación es útil ya que destaca el impacto positivo de una gestión eficiente de residuos.

5.4.2 Potencial de ecotoxicidad acuática en agua dulce (PEAAD)

La Figura 5.3 presenta el potencial de ecotoxicidad acuática en agua dulce (PEAAD) en kg DCB-eq, para los dos escenarios.

El valor positivo (0.239 kg DCB-eq) en E01 indica una carga ecotóxica significativa asociada al aditivo de urea formaldehído que se utiliza en el proceso. Las pérdidas de aditivo y la falta de control sobre los desechos contribuyen a una mayor liberación de

contaminantes en ambientes acuáticos. El valor negativo del PEAAD en el escenario E02 es indicativo de una mejora significativa en el manejo de residuos y optimización del proceso de ensamblaje para reducir pérdidas de. La contención y tratamiento adecuado de los efluentes minimizan su impacto tóxico en los ecosistemas acuáticos.

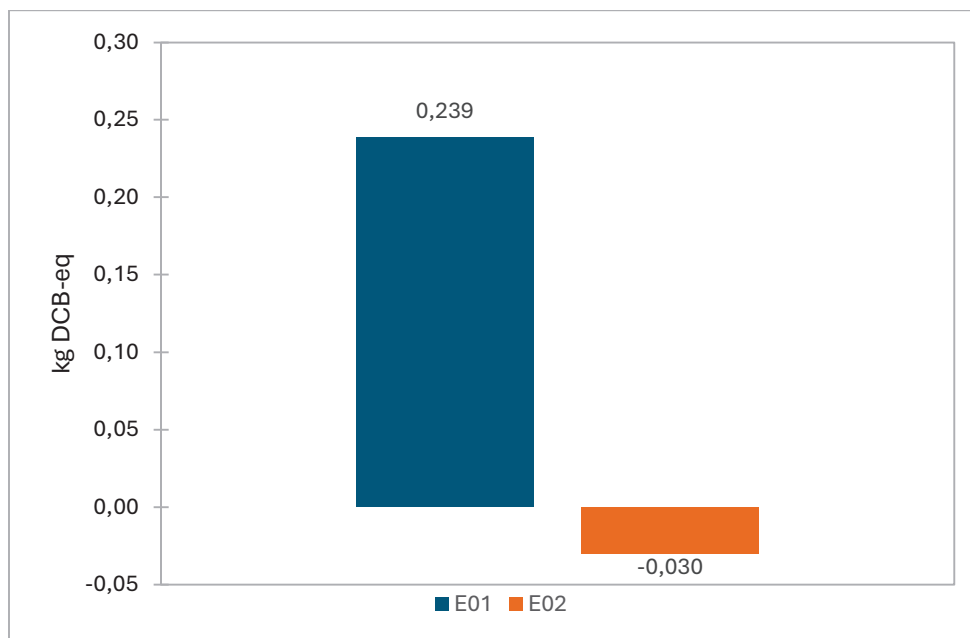


Figura 5.3 Potencial de ecotoxicidad acuática en agua dulce (PEAAD).

Estos resultados abogan fuertemente por la revisión y mejora de los procesos industriales, especialmente en industrias que interactúan intensivamente con recursos naturales y ecosistemas sensibles.

5.4.3 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (PET)

La Figura 5.4 muestra el Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (PET) expresado en kilogramos de diclorobenceno equivalente (kg DCB-eq) para los dos escenarios.

Al igual que en el análisis del PEAAD, las principales causas del elevado valor del PET se asocian directamente con la gestión ineficaz de residuos y las pérdidas de aditivos durante el proceso de producción.

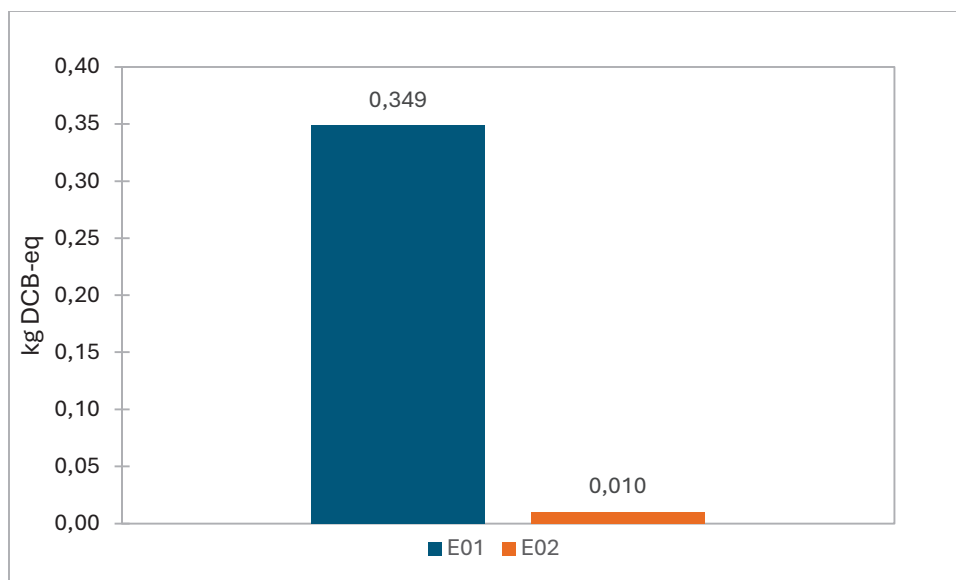


Figura 5.4 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (PET).

En el escenario mejorado E02, donde se han implementado prácticas mejoradas de gestión de residuos y reducción de las pérdidas de aditivo, se observa un notable decremento en el valor de PET en comparación con el escenario E01. Sin embargo, el hecho de que el valor de PET aún registre una cifra positiva subraya la necesidad de seguir avanzando en la mejora de estas prácticas. Esto indica que, a pesar de los progresos logrados, es esencial continuar optimizando el manejo de residuos y la eficiencia en el uso de aditivos para minimizar aún más el impacto ecotóxico en los ecosistemas terrestres.

5.4.4 Potencial de creación de ozono fotoquímico (PCOF)

La Figura 5.5 muestra el PCOF, medido en kilogramos de eteno equivalente (kg eteno-eq), para los dos escenarios de producción. Este indicador es esencial para evaluar cómo las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros precursores de ozono afectan la formación de ozono a nivel del suelo, un componente clave del smog fotoquímico.

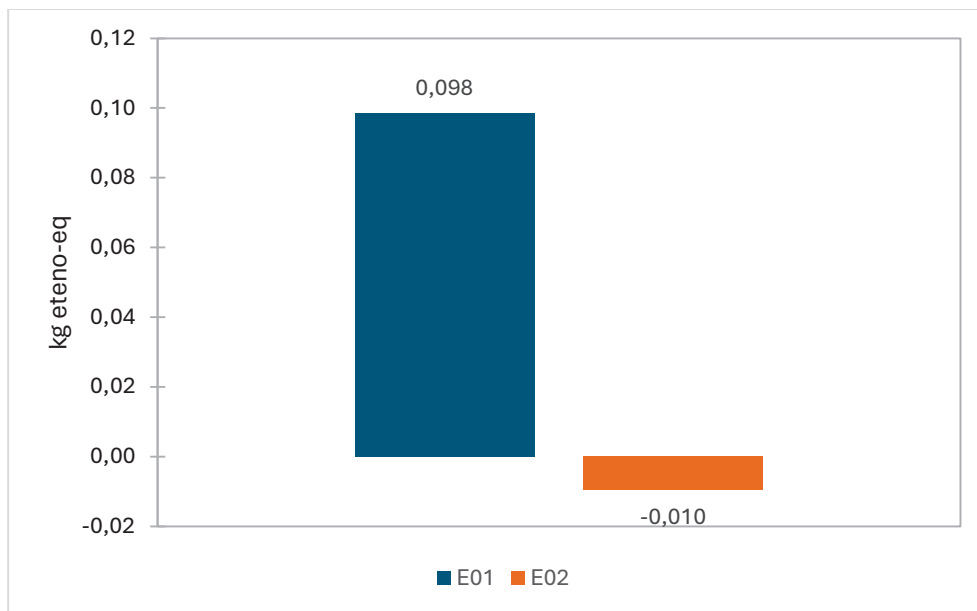


Figura 5.5 Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (PCOF).

El valor de 0.098 kg eteno-eq indica una carga significativa de precursores de ozono liberados en el escenario E01, donde el proceso de producción es menos controlado y los sistemas de captura de emisiones pueden ser inadecuados. Esto puede incluir la liberación de COV desde los residuos que se dejan degradar en condiciones que no impiden la volatilización de compuestos nocivos.

Un valor negativo en este contexto sugiere que el escenario E02 no solo reduce sino potencialmente compensa la creación de ozono fotoquímico. Esto implica que las mejoras implementadas en E02, como la incineración controlada de residuos, el uso de sistemas cerrados para el tratamiento térmico, son efectivas en reducir o capturar las emisiones de precursores de ozono antes de que puedan liberarse al ambiente.

La considerable diferencia entre los dos escenarios subraya la importancia de gestionar y controlar las emisiones de COV durante la producción de tableros. Los resultados destacan la efectividad de adoptar prácticas sostenibles en la producción industrial.

5.4.5 Energía (Valor calorífico de la red).

La Figura 5.6 compara el consumo energético neto en megajulios (MJ) de los dos escenarios propuestos. El escenario E01, que carece de optimizaciones energéticas, muestra un consumo considerablemente alto, aproximadamente 3919 MJ, reflejando el uso intensivo de energía en un proceso de fabricación tradicional. Por otro lado, el escenario E02, que incorpora mejoras como la reutilización de vapor y la valorización de residuos, reduce significativamente el consumo energético a cerca de 2322 MJ. Estos resultados resaltan el beneficio de implementar tecnologías de eficiencia energética y reciclaje en la fabricación industrial. En comparación con un estudio previo de Restrepo [3] que reporta un rango de consumo de 100 a 400 MJ por tablero, los valores por tablero ajustados para E01 y E02 son 327 MJ y 194 MJ, respectivamente, situándose dentro de los rangos observados, lo que subraya la variabilidad del consumo energético según el volumen de producción y las técnicas aplicadas.

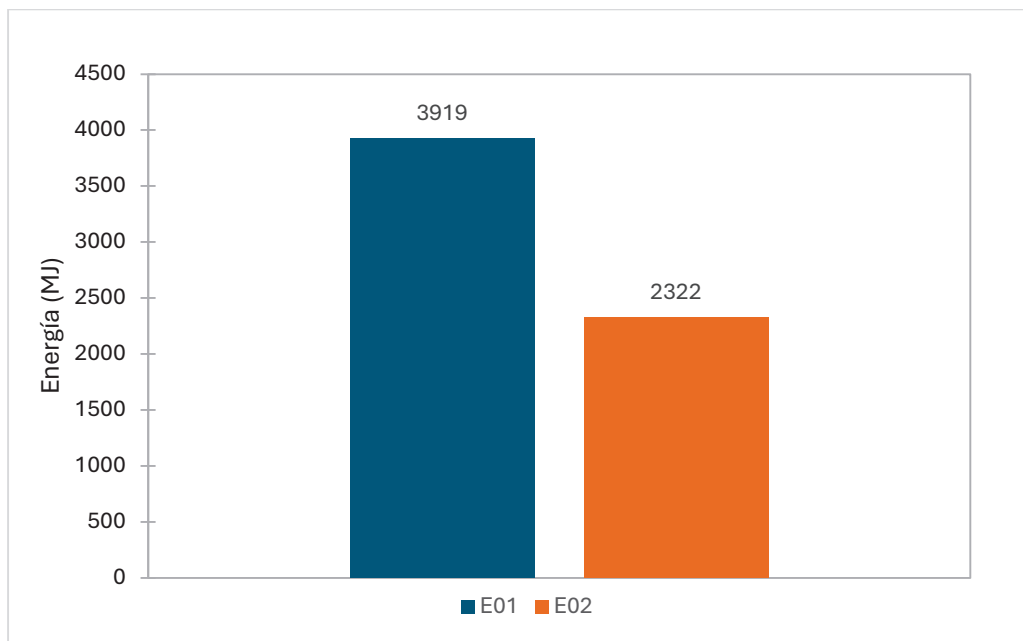


Figura 5.6 Energía (Valor calorífico de la red).

5.5 Conclusiones

El análisis del PCG resalta la importancia de la gestión de residuos y la eficiencia energética en la fabricación de tableros de bambú. Las estrategias para recircular y reutilizar flujos de energía y materiales son cruciales para reducir el impacto ambiental, como se evidencia en los escenarios de menor PCG.

Los resultados evidencian que las mejoras en el proceso de fabricación pueden tener un impacto positivo significativo en la ecotoxicidad acuática y terrestre, especialmente en la gestión de residuos y optimización del proceso de ensamblaje que involucra reducción de pérdidas de aditivo.

El valor negativo de algunos escenarios sugiere que se podrían estar evitando emisiones, probablemente mediante el uso de materiales renovables y el reciclaje, logrando un balance neto que ayuda a reducir la formación de ozono fotoquímico en la atmósfera.

En general, el análisis sugiere que mejoras en la gestión de residuos y la eficiencia del proceso, como se implementan en el escenario E02, son cruciales para reducir el impacto ambiental en la producción de tableros laminados. Esto debería animar a más empresas y sectores a adoptar prácticas similares para mitigar su impacto en el cambio climático. Este enfoque no solo es beneficioso para el medio ambiente, sino que también podría ofrecer beneficios económicos a largo plazo mediante la reducción de costes operativos y la mejora de la imagen corporativa ante consumidores cada vez más conscientes del medio ambiente.

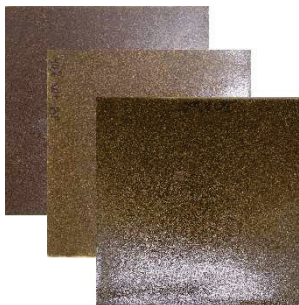
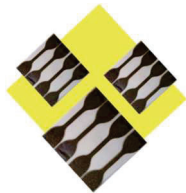
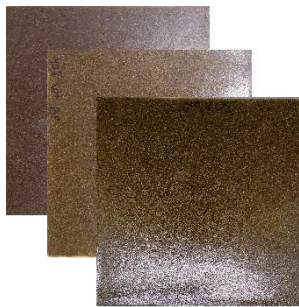
5.6 Bibliografía

- [1] Ministerio de Energía y Minas, “ECUADOR CONSOLIDA LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES,” 2023. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/> (accessed May 02, 2024).
- [2] Climate-data, “Clima Montañita: Temperatura, Climograma y Temperatura del agua de Montañita,” *Climate-Data.org*, 2015. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-del-guayas/guayaquil-2962/> (accessed May 02, 2024).
- [3] A. Restrepo, R. Becerra, and J. E. G. Tibaquirá, “Energetic and carbon footprint

analysis in manufacturing process of bamboo boards in Colombia,” *J. Clean. Prod.*, vol. 126, pp. 563–571, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.144.

Capítulo 6.

Aprovechamiento de los residuos del bambú: Elaboración de materiales compuestos



- Introducción
- Integración de las fibras de GaK en una matriz de etileno-1-buteno
- Caracterización térmica
- Caracterización mecánica
- Análisis de flexión
- Análisis de tracción
- Conclusiones
- Bibliografía

6 Aprovechamiento de los residuos del bambú: Elaboración de materiales compuestos

6.1 Introducción

En el Capítulo 6, se explora el aprovechamiento de los residuos del bambú para la elaboración de materiales compuestos. Esta investigación se enmarca dentro de los principios de la economía circular, buscando no solo mitigar los impactos ambientales asociados a la gestión de residuos y disminución de la huella de carbono, sino también valorizar estos subproductos agregando valor a la cadena productiva de la GaK.

6.2 Integración de las fibras de GaK en una matriz de etileno-1-buteno

Dentro del marco de la economía circular del bambú, se llevó a cabo un estudio sobre la utilización de fibras de GaK, derivadas de los residuos generados en el proceso de fabricación de tableros laminados de guadua, descrito en el Capítulo 5. Estas fibras se incorporaron en una matriz polimérica de etileno-1-buteno (EB), preparando diversas mezclas con variaciones en los porcentajes de fibra y polímero, procedimiento que se detalla en el Capítulo 3. La Tabla 6.1 expone la nomenclatura utilizada y los porcentajes en peso de las materias primas y las mezclas obtenidas. Se estableció como referencia para la nomenclatura el porcentaje del bambú en la mezcla (M30, M40 y M50).

Tabla 6.1 Nomenclatura de las materias primas y las mezclas realizadas.

Referencia Muestra	EB (p/p)	GaK (p/p)
EB	100	0
GaK	0	100
M30	70	30
M40	60	40
M50	50	50

Como resultado, se obtuvieron láminas de color marrón y textura homogénea, con dimensiones aproximadas de 15 x 15 x 3 mm (largo, ancho y espesor). La Figura 6.1 presenta una imagen de estas láminas.

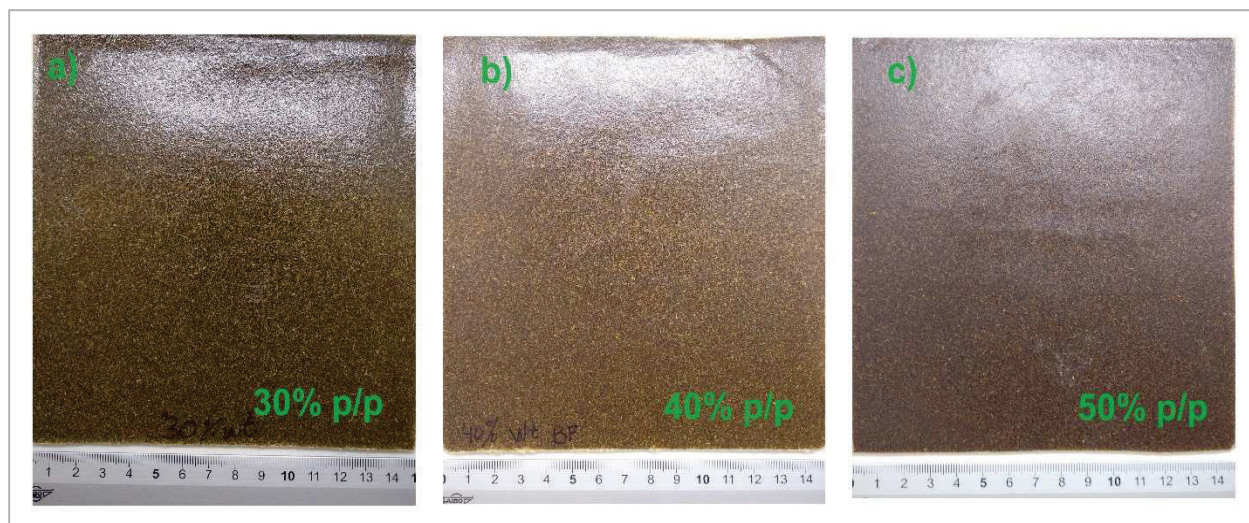


Figura 6.1 Láminas de polímero y fibras de GaK a) 30% GaK, M30, b) 40% GaK, M40 y c) 50% GaK, M50.

6.3 Caracterización térmica

La caracterización térmica de las materias primas y las láminas resultantes de las mezclas se llevó a cabo mediante análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría diferencial de barrido (DSC), medición del índice de oxígeno limitante (LOI), ensayo de epirradiator y conductividad térmica. La metodología de los ensayos se describe en el Capítulo 3.

6.3.1 Análisis termogravimétrico (TGA)

La Figura 6.2 ilustra la pérdida de masa de las materias primas y sus mezclas, las cuales fueron sometidas a un régimen de calentamiento desde 25 °C hasta 1000 °C a una tasa de 10 °C/min en atmósfera de nitrógeno. La Figura 6.3 muestra las curvas de la derivada de la pérdida de masa que proporcionan una visión más detallada de la temperatura específica donde ocurre la mayor pérdida del material.

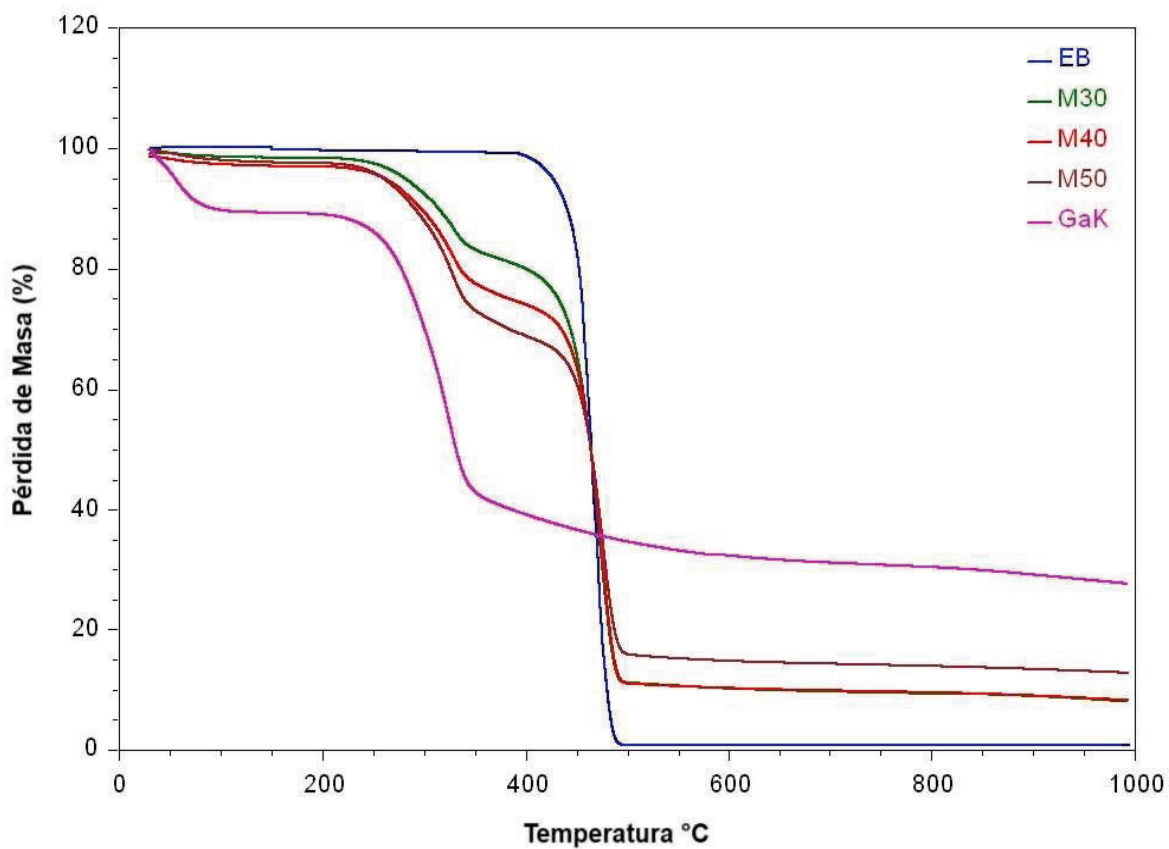


Figura 6.2 Análisis termogravimétrico de copolímero de EB, GaK y las mezclas M30, M40 y M50.

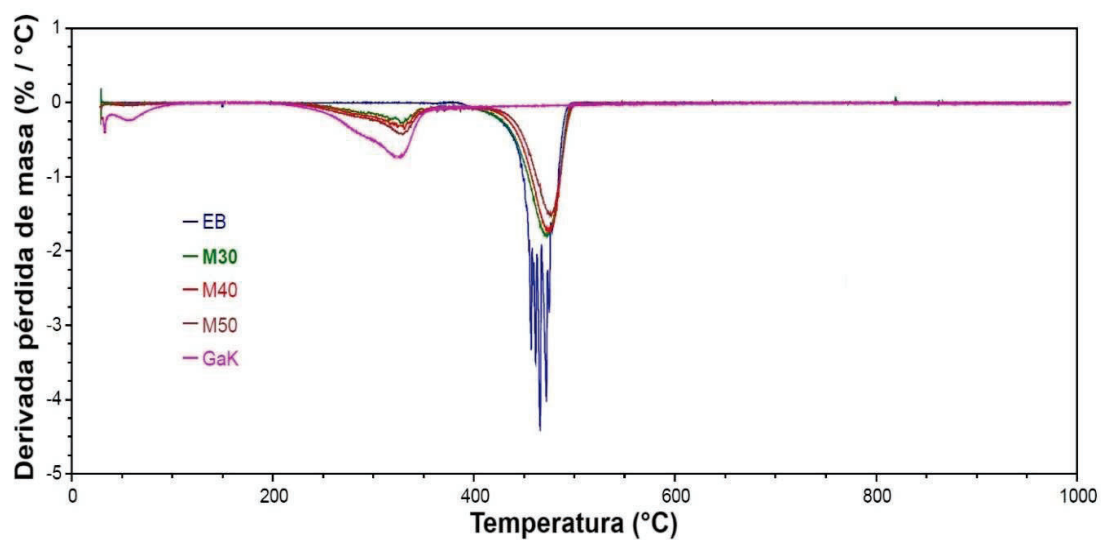


Figura 6.3 Derivada de la pérdida de masa de EB, GaK y las mezclas M30, M40 y M50.

La Tabla 6.2 aporta los detalles específicos sobre las etapas de descomposición térmica para las materias primas y las mezclas. Estos datos permiten un análisis más detallado y técnico de los resultados obtenidos del TGA y DTGA presentados previamente en las gráficas.

Tabla 6.2 Detalles de las etapas de descomposición térmica para EB y sus mezclas con fibras de GaK.

Referencia Muestra	Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3		Residuo
	Pico (°C)	%pérdida	Pico (°C)	%pérdida	Pico (°C)	%pérdida	%
EB	-	-	-	-	465,98	99,15	0,85
GaK	32,54	10,65	322,90	61,73	-	-	27,62
M30	72,17	0,80	329,90	16,73	472,74	73,68	8,79
M40	80,16	1,76	329,90	22,31	474,72	66,48	9,45
M50	161,15	2,20	329,90	28,89	476,25	55,94	12,94

El EB exhibe una única etapa significativa de descomposición térmica a 465,98 °C, con una pérdida del 99,15% de su masa, lo que indica la ruptura de las cadenas etilénicas. Este comportamiento demuestra una excelente estabilidad térmica con un residuo mínimo post-descomposición (0,85%), característico de estos materiales [1].

La GaK manifiesta una descomposición inicial a 32,54 °C, con una pérdida de masa del 10,65%, que se atribuye principalmente a la evaporación de agua y compuestos volátiles. Este comportamiento es típico en materiales naturales que contienen humedad y otros volátiles fácilmente liberables a bajas temperaturas. En una segunda etapa más crítica, se observa un pico máximo de temperatura a 322,90 °C, con una pérdida significativa del 61,73% del peso, indicando la descomposición secuencial de hemicelulosa, celulosa y lignina entre 200 °C y 450 °C [2]. Finalmente, la GaK deja un residuo considerable del 27,62%, que probablemente incluye componentes inorgánicos que no se descomponen a estas temperaturas. Este perfil de descomposición es corroborado también por los hallazgos de Ardila [3], quien describe patrones similares en materiales comparables.

Las mezclas M30, M40 y M50 exhiben múltiples etapas de descomposición:

Primera Etapa: Las pérdidas de masa iniciales son bajas (entre 0,80% y 2,23%) y ocurren a temperaturas relativamente bajas (entre 72,17 °C y 161,15 °C), que sugieren la pérdida de humedad o volátiles ligeros presentes en las fibras de la GaK

Segunda Etapa: Se observan pérdidas de masa moderadas en todas las mezclas a 329,90 °C, que aumentan proporcionalmente con la cantidad de bambú en la mezcla (desde 16,73% en M30 hasta 28,89% en M50). Esto indica que el aumento de fibras de bambú conlleva una mayor descomposición a esta temperatura, relacionada con la descomposición de la celulosa y hemicelulosa.

Tercera Etapa: A temperaturas ligeramente superiores a 470 °C, donde la pérdida de peso es más significativa (entre 55,94% y 73,68%), correspondiente en su mayor parte a la descomposición de los componentes del EB y una parte muy pequeña de los componentes más estables de la GaK.

El residuo después de la descomposición aumenta con la cantidad de bambú en la mezcla, desde 8,79% en M30 hasta 12,94% en M50. Este residuo podría actuar como una barrera que retarda la transferencia de calor y la propagación de la descomposición en el material, ofreciendo potenciales beneficios en términos de resistencia al fuego o en aplicaciones donde se requiere un cierto grado de integridad estructural post-exposición térmica.

Aunque los compuestos se descompusieron a temperaturas más bajas en comparación con el EB puro, los compuestos de EB-fibra de GaK todavía presentan una buena estabilidad térmica, evidenciando potencial para aplicaciones de ingeniería. Estos hallazgos se alinean con los descritos por Zhang [2] en estudios similares.

6.3.2 Análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El estudio DSC se realizó en el copolímero de EB y sus mezclas con fibras de bambú en diferentes concentraciones (M30, M40, M50), registrando las temperaturas y entalpías de fusión (ΔH_f) y cristalización (ΔH_c). Este análisis se efectuó a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min en un rango de temperatura de -30 °C a 150 °C bajo atmósfera

de nitrógeno. Las temperaturas de fusión (t_f) y cristalización (t_c) se identificaron a partir de los picos endotérmicos y exotérmicos respectivamente, mientras que las ΔH_f y ΔH_c se determinaron mediante la integración de estos picos desde el inicio hasta el final de las reacciones. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 6.3

Tabla 6.3 Temperaturas de fusión t_f y recristalización t_c así como las entalpías de fusión ΔH_f y cristalización ΔH_c para EB y sus mezclas con fibras de GaK.

Referencia Muestra	t_f (°C)	ΔH_f (J/g)	t_c (°C)	ΔH_c (J/g)
EB	73,20	58,66	60,10	67,90
M30	70,61	42,09	57,56	46,74
M40	71,08	35,09	57,75	38,14
M50	71,07	30,07	58,43	30,81

La Figura 6.4 muestra las curvas de DSC durante las reacciones endotérmicas en el copolímero de EB y las mezclas con fibras de GaK estudiadas. El EB presenta una t_f de 73,20 °C y una ΔH_f de 58,66 J/g. La adición de fibra de GaK reduce ligeramente el valor de la t_f entre 70,61 °C para M30 y 71,08 °C para M40. La entalpia también disminuye y lo hace de forma progresiva conforme se incrementa el número de fibras, presentando el valor más bajo 30,07 J/g para M50. Esto sugiere una reducción en la cristalinidad y podría atribuirse a las fibras de bambú que actúan como barreras físicas dentro de la matriz polimérica.

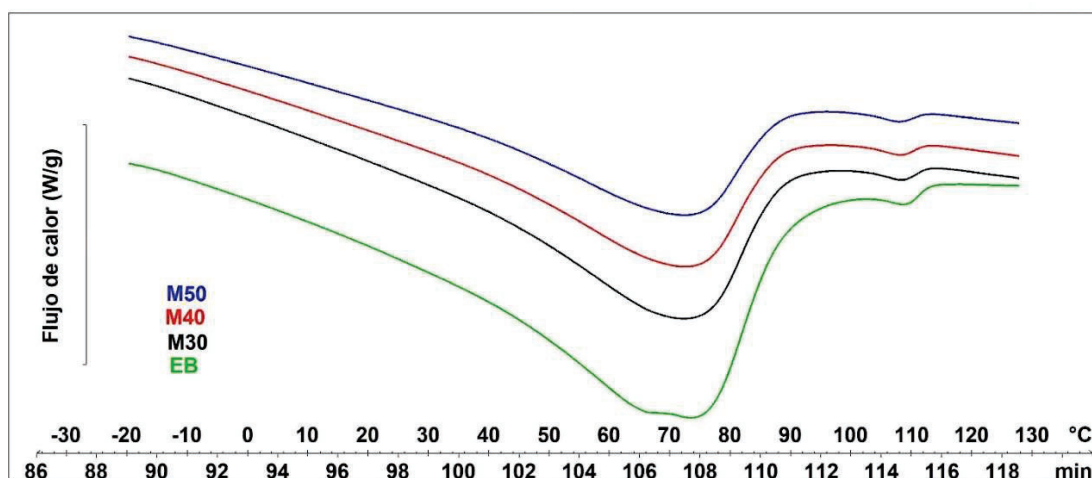


Figura 6.4 Curvas DSC correspondientes a la etapa de fusión del copolímero de EB y mezclas con fibras de GaK.

Similar a la fusión, la cristalización sigue un patrón decreciente en entalpía con el aumento del contenido de bambú. En la Figura 6.5 se puede observar la disminución progresiva del flujo de calor alrededor de los 60 °C conforme se incrementan las fibras, indicando una cristalinidad reducida.

También, la t_c en las mezclas disminuye respecto al EB, aunque lo hace ligeramente, lo que podría reflejar la homogeneidad relativamente estable de las mezclas.

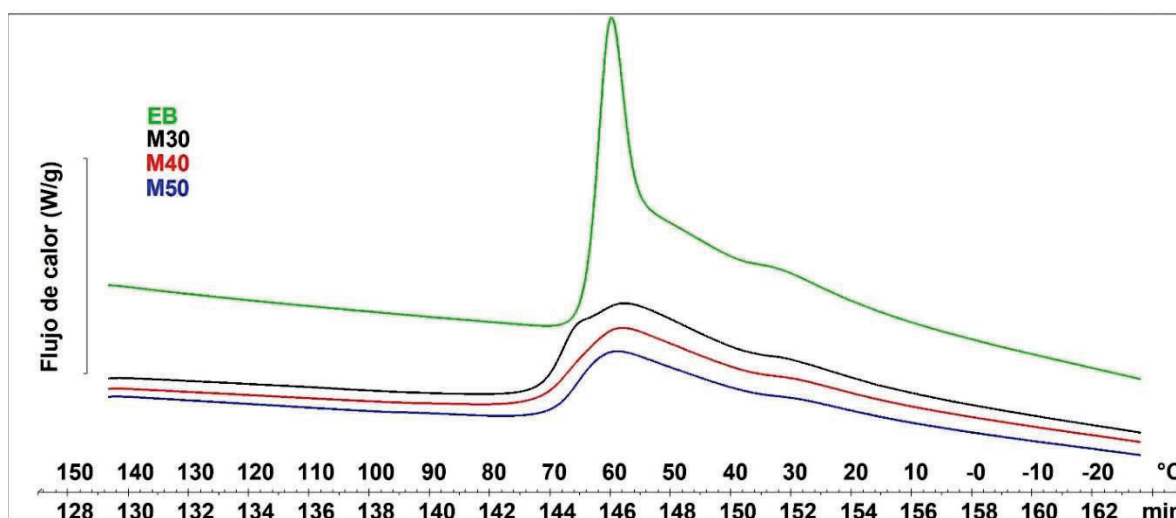


Figura 6.5 Curvas DSC correspondientes a la etapa de cristalización del copolímero de etileno-buteno y de las mezclas con fibras de bambú.

La disminución en las temperaturas de fusión y cristalización puede tener efectos significativos en las propiedades mecánicas de las mezclas, como una posible mejora en la ductilidad y una disminución en la rigidez, sin embargo, el efecto de las fibras como refuerzo de la matriz polimérica podría contrarrestar esa disminución en la rigidez. Estos cambios deben evaluarse cuidadosamente para optimizar las propiedades del material compuesto, equilibrando la procesabilidad con las necesidades funcionales del producto final. Xu [4], afirma que los compuestos de polímero termoestable reforzados con fibra de bambú se caracterizan por su gran dureza, alta rigidez, resistencia a altas temperaturas y no son fáciles de deformar. La comprensión detallada de estas interacciones facilita el diseño de nuevos materiales con propiedades específicas

ajustadas para diversas aplicaciones en diferentes campos entre ellos el de la construcción.

6.3.3 Análisis de epirradiator.

Los ensayos de exposición al fuego mediante pruebas de epirradiator evaluaron la inflamabilidad y la estabilidad térmica de las láminas de EB, GaK y mezclas del copolímero con fibras de GaK (M30, M40, M50). La evaluación se centró en medir el número de igniciones (N), el tiempo hasta la primera ignición (t_0) y la duración de la ignición (t_m), cuyos resultados se presentan en la Tabla 6.4

Tabla 6.4 Inflamabilidad y estabilidad térmica de láminas de EB, GaK, y mezclas del copolímero con fibras de GaK sometidas a pruebas de epirradiator.

Referencia Muestra	N	DE (N)	t_0 (s)	DE (t_0)	t_m (s)	DE (t_m)
GaK	6,67	2,08	21,67	3,79	8,86	2,91
EB	1,00	-	42,67	2,08	34,67	2,89
M30	1,00	-	23,00	1,00	73,33	5,86
M40	1,00	-	22,33	0,58	83,33	5,51
M50	1,00	-	23,67	1,53	106,33	7,09

La GaK registró un promedio de 6,67 igniciones con una breve duración media de 8,86 segundos por evento, lo que subraya su capacidad para autoextinguirse rápidamente después de cada ignición. El EB y las mezclas cada uno mostró una única ignición, que persistió hasta la consumición total del material, corroborando su clasificación como materiales altamente combustibles según los resultados del análisis del LOI que se detallan en la siguiente sección 6.3.4.

La GaK presentó el menor tiempo hasta la primera ignición (21,67 s), reflejando una susceptibilidad inicial al fuego potencialmente atribuible a su composición y propiedades físicas naturales. El EB mostró mayor resistencia a la ignición con un tiempo prolongado de 42,67 s, indicando una mejor resistencia inicial al fuego. Las mezclas exhibieron tiempos de ignición reducidos (entre 22,33 y 23,67 s), acercándose más a los tiempos

observados para GaK y sugiriendo que la inclusión de fibras de bambú disminuye la resistencia a la ignición del copolímero.

La incorporación de fibras de GaK en el copolímero de EB reduce drásticamente el tiempo hasta la primera ignición en comparación con el EB puro y extiende la duración de la ignición, lo que puede representar un riesgo en aplicaciones donde la resistencia al fuego es esencial. Aunque las fibras de GaK pueden ofrecer ventajas en términos de mejora de propiedades mecánicas y procesabilidad, su impacto en aumentar la vulnerabilidad del material a la ignición y al fuego sostenido debe ser cuidadosamente evaluado. Estos hallazgos son fundamentales para el diseño de materiales compuestos, donde se debe alcanzar un equilibrio óptimo entre las mejoras de rendimiento deseado y los requisitos de seguridad contra incendios.

6.3.4 Determinación del índice de oxígeno limitante, LOI

La Figura 6.6 presenta los resultados del ensayo de LOI de las materias primas y las mezclas M30, M40 y M50.

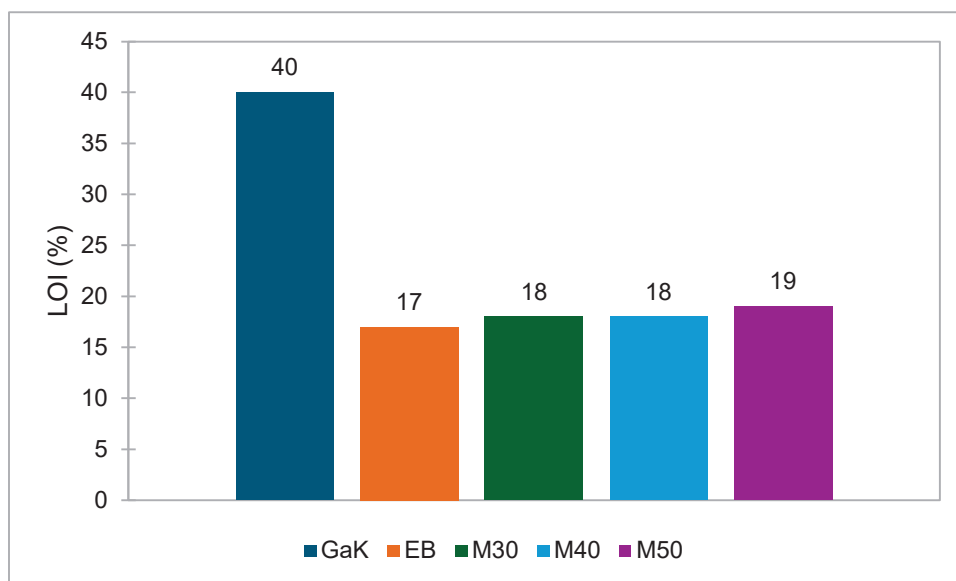


Figura 6.6 Representación del índice de oxígeno limitante (LOI) de las materias primas y las mezclas.

El análisis del LOI revela diferencias significativas en la resistencia al fuego entre la GaK y el EB, así como sus respectivas mezclas con fibras de bambú. La GaK muestra un LOI

de 40%, clasificándola dentro de la categoría de materiales "auto-extinguibles", según los criterios que establecen un umbral de 28% para esta clasificación [5]. Este elevado nivel de resistencia al fuego puede atribuirse a la presencia de compuestos inorgánicos como el silicio en la GaK, que actúan como retardantes naturales de llama [6].

En contraste, el EB puro y las mezclas que incorporan fibras de bambú exhiben valores de LOI significativamente más bajos, variando desde 17% para el EB hasta 19% para la mezcla M50. Estos valores sitúan al EB y sus mezclas en la categoría de materiales combustibles, definidos por un LOI menor a 20.95% [5]. Esto lo ratificó la prueba de epirradeador, dónde una vez iniciada la primera ignición la llama se mantuvo hasta que todo el material fue consumido. La incorporación de fibras de bambú en el copolímero resulta en una mejora modesta en la resistencia al fuego, aunque insuficiente para alcanzar el umbral de autoextinción. Esta limitación puede ser consecuencia de la heterogeneidad en la distribución y la interacción de las fibras de bambú dentro de la matriz polimérica, lo que impide alcanzar los niveles de resistencia al fuego observados en la guadua en su estado puro.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de explorar estrategias adicionales para mejorar la resistencia al fuego de las mezclas de EB con bambú, posiblemente mediante la optimización de las formulaciones con aditivos retardantes de llama específicos o mediante el tratamiento previo de las fibras de bambú antes de su integración en la matriz polimérica. Tales enfoques podrían permitir el desarrollo de compuestos poliméricos con propiedades mejoradas de resistencia al fuego, adecuados para aplicaciones en entornos donde los requisitos de seguridad contra incendios son más exigentes.

6.3.5 Conductividad térmica.

La Figura 6.7 presenta los resultados del análisis de conductividad térmica para el copolímero EB y sus mezclas con diferentes concentraciones de fibras de GaK. Los datos están presentados en función de la proporción de GaK incorporadas en las mezclas, variando desde 0 (solo EB) hasta aproximadamente 0,5 p.u.

El EB puro muestra una conductividad térmica de 0,305 W/mK. Este valor sirve como referencia base para evaluar el efecto de la adición de fibras de GaK. Las mezclas muestran un ligero incremento con respecto al EB, los valores varían desde 0,311 W/mK para M30 hasta 0,323 W/mK para M40. Estas variaciones podrían atribuirse a la red de distribución de las fibras de GaK en la matriz.

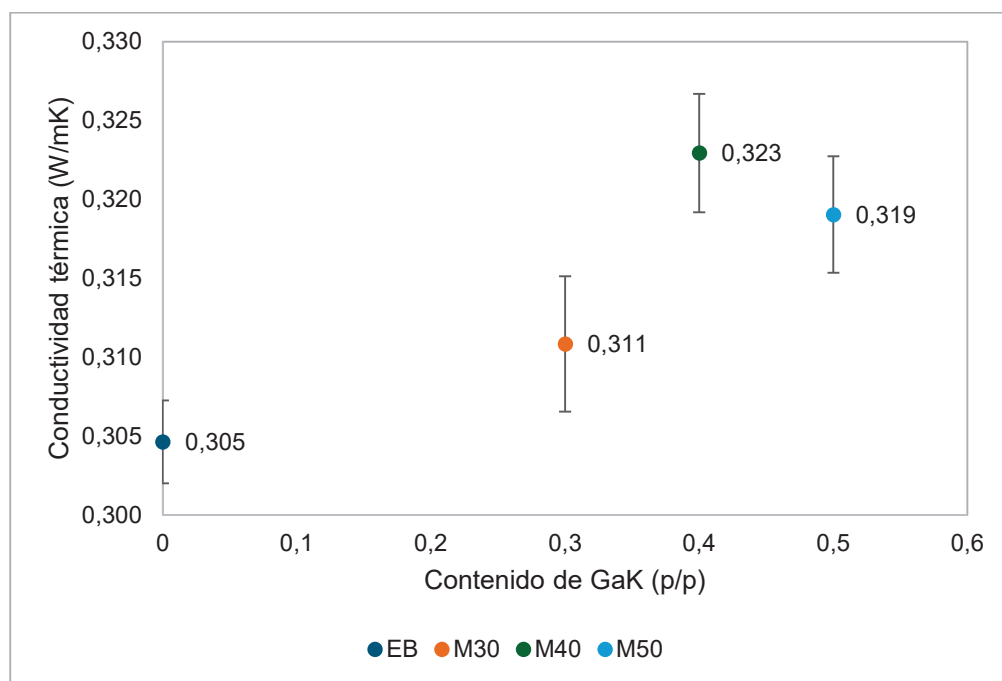


Figura 6.7 Conductividad térmica del EB y las mezclas M30, M40 y M50.

La adición de fibras de GaK parece incrementar la conductividad térmica del material compuesto en comparación con el polímero puro. Este fenómeno se puede atribuir a las propiedades intrínsecas de las fibras de GaK. Shah [7], Liu [8] reportan valores de 0,20 a 0,35 W/mK para productos de bambú seleccionados. Además, este último, indica que la estructura del lumen juega un papel importante, en la conductividad térmica transversal de los compuestos unidireccionales. Varios autores coinciden [7][9] en que la densidad del material tiene una influencia clara y sustancial en la conductividad térmica. Estas consideraciones son útiles para un mayor desarrollo y diseño de compuestos reforzados con fibras naturales para aplicaciones con mejores propiedades de aislamiento térmico.

6.4 Caracterización mecánica

La comprensión integral de las propiedades mecánicas de los compuestos de polímeros reforzados con fibras de bambú es esencial para evaluar su aplicabilidad en diversos campos industriales. En esta sección, se detallan los ensayos de flexión y tracción llevados a cabo para investigar el comportamiento mecánico de estos materiales innovadores.

Los ensayos mecánicos fueron realizados utilizando una máquina universal Zwick/Roell SmartPro, donde se evaluaron tanto el E como la σ_f y la σ_t de las mezclas de polímero con fibras de bambú, comparándolas con el polímero base de EB. Los materiales y metodología de los ensayos se describen en el Capítulo 3. Estos ensayos proporcionan datos cruciales sobre la interacción entre las fibras y la matriz polimérica, permitiendo un análisis detallado de cómo la inclusión de fibras afecta la resistencia estructural y la ductilidad de los compuestos.

6.4.1 Ensayo de flexión

Se realizaron ensayos de flexión a tres puntos para evaluar el E y analizar sus implicaciones respecto al porcentaje de fibras y la densidad. Los ensayos se realizaron a una velocidad de 1,3 mm/min, conforme la norma D790–10[10]. Los resultados de los ensayos se presentan en términos de valores promedio y la desviación estándar (DE) en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Modulo de elasticidad (E) y densidad (δ) correspondientes al ensayo de flexión.

Referencia Muestra	E (MPa)	DE (MPa)	δ (g/cm ³)
EB	33,09	2,84	0,87
GaK	14080,00	2,03	0,67
M30	94,20	2,48	0,80
M40	100,83	1,49	0,78
M50	152,46	3,36	0,76

La Figura 6.8 ilustra la relación entre el contenido de fibras GaK en un copolímero de EB y el E de las mezclas resultantes. Esta visualización facilita la comprensión de cómo la adición de fibras naturales afecta las propiedades mecánicas del material compuesto.

Se observa un aumento significativo en el E a medida que aumenta la proporción de GaK en las mezclas. El EB puro muestra el E más bajo (33,09 MPa), mientras que la mezcla M50, con el mayor contenido de GaK, exhibe el valor más alto (152,46 MPa). El notable aumento en el E con la incorporación de GaK sugiere que las fibras de bambú actúan como refuerzo eficaz dentro de la matriz polimérica. Las fibras mejoran la rigidez del material, lo cual es indicativo de una interacción favorable entre las fibras y la matriz, posiblemente debido a una buena adhesión y distribución de las fibras.

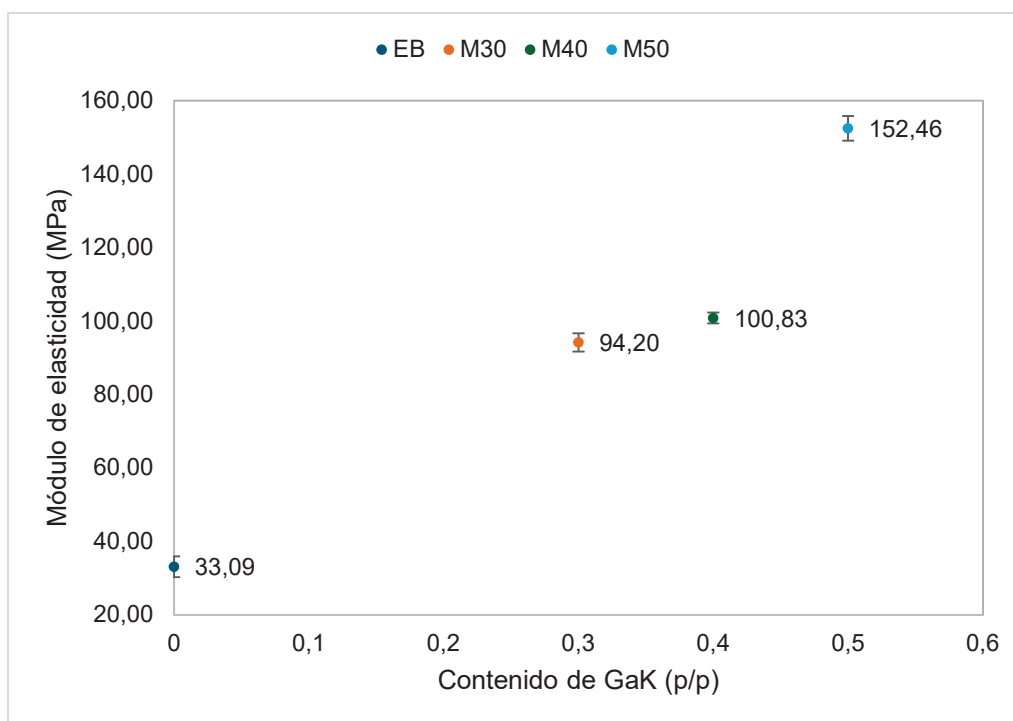


Figura 6.8 Valor de E respecto a la proporción en peso (p/p) de fibras.

El incremento en el E implica que las mezclas con mayor contenido de GaK son más rígidas y menos susceptibles a deformarse bajo carga. Este comportamiento es ventajoso en aplicaciones estructurales donde se requiere mayor resistencia mecánica.

Estudios previos han encontrado que el uso de fibras naturales en polímeros puede mejorar significativamente las propiedades mecánicas como el módulo de flexión [11][12]. Específicamente compuestos con fibras de bambú han presentados mejoras notables con el aumento en la longitud y el contenido de las fibras [2][13].

La Figura 6.9 muestra la relación entre la δ y el E de diferentes mezclas del copolímero de EB con variadas proporciones de GaK, identificadas como M30, M40 y M50, además del EB puro.

El E y la δ en las mezclas presentan una relación inversa. A medida que la δ disminuye, el E aumenta. Esto es contrario a lo que se podría esperar comúnmente, ya que una mayor δ suele asociarse con materiales más rígidos y, por ende, con un mayor E.

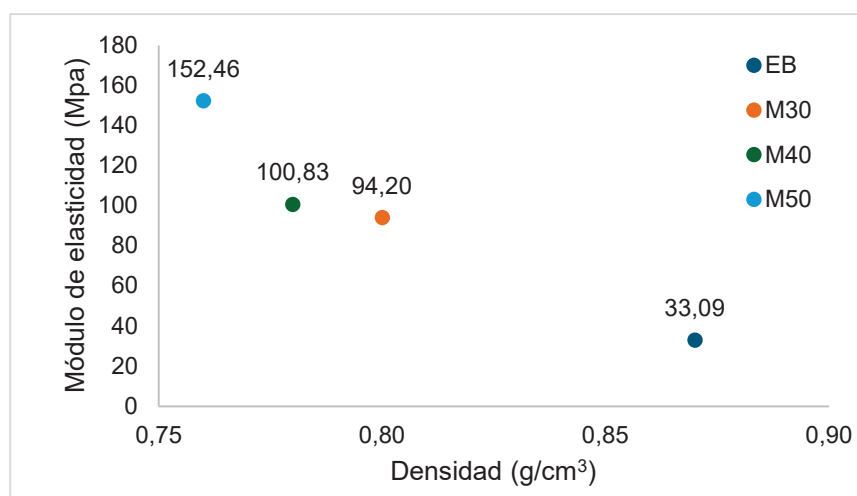


Figura 6.9 Módulo de elasticidad versus densidad.

La incorporación de fibras de bambú en las mezclas parece reducir la δ del material mientras mejora significativamente su E. Esto puede deberse a la estructura ligera pero rígida de las fibras de bambú, que, al estar bien distribuidas y adheridas a la matriz polimérica, contribuyen a una mayor resistencia mecánica sin aumentar proporcionalmente la masa del material.

La notable mejora en el E con la adición de fibras de bambú, especialmente en M50, sugiere que la interacción entre las fibras y la matriz es óptima en esta proporción. La baja δ combinada con alta rigidez puede indicar que las fibras están actuando eficazmente como refuerzos dentro de la matriz, optimizando la transferencia de carga y la distribución del estrés bajo condiciones mecánicas [4].

La reducción en δ con un incremento en el E es altamente deseable en muchas aplicaciones de ingeniería donde la reducción del peso es crítica sin comprometer la integridad estructural. Esto amplía su uso potencial en diversas aplicaciones industriales.

En el análisis presentado en la Figura 6.10, que correlaciona el módulo de elasticidad con la densidad, se observa que los compuestos experimentales derivados de la mezcla de EB con fibras cortas de GaK se posicionan por debajo de los valores teóricos estimados por la regla de las mezclas.

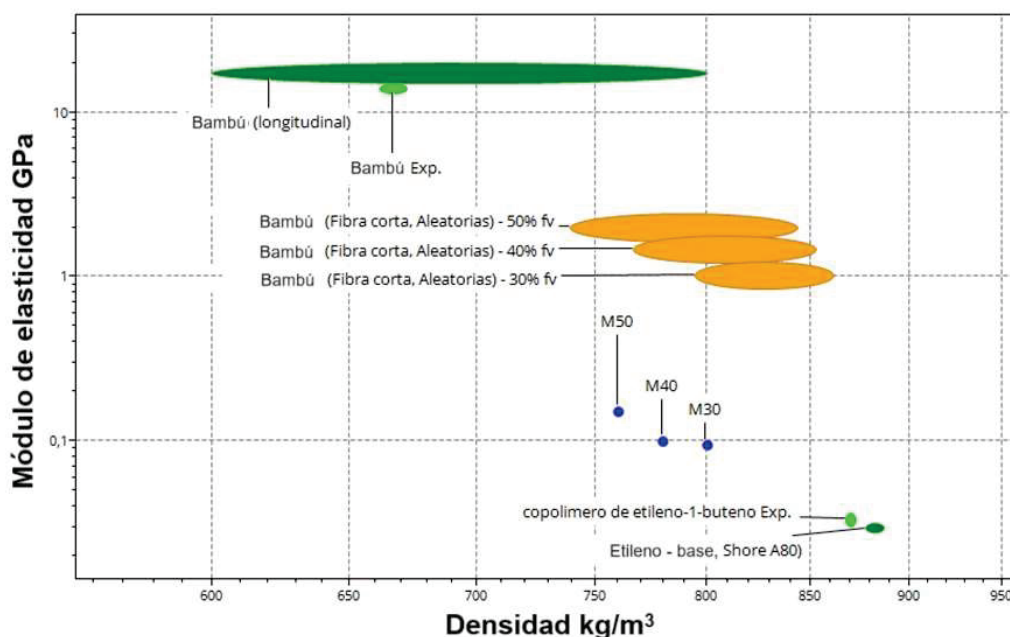


Figura 6.10 Comparación de los valores teóricos y experimentales del E y δ en compuestos de EB reforzados con fibras de GaK.

Sin embargo, estos se mantienen dentro del intervalo definido por las propiedades intrínsecas del copolímero y las del bambú puro. Este comportamiento sugiere una interacción material-fibra que podría moderar la rigidez del compuesto final, a la vez que mantiene una densidad manejable. Estos hallazgos son cruciales, ya que ofrecen una perspectiva alentadora para el desarrollo de nuevos materiales compuestos que no solo son eficientes en términos de recursos, sino también más sostenibles, aprovechando las propiedades naturales y renovables del bambú como material de refuerzo en polímeros.

Estos resultados instan a profundizar en investigaciones futuras que exploren las aplicaciones prácticas y la optimización de estas mezclas.

6.4.2 Ensayo de tracción

La Tabla 6.6 detalla los resultados de los ensayos de tracción realizados sobre el polímero base (EB) y sus mezclas con fibras de bambú (M30, M40, M50). Estos ensayos se llevaron a una velocidad de 500 mm/min, conforme a la norma ASTM D638-22 [14]. Los datos recopilados incluyen la tensión máxima (σ_{tmax}) y la elongación a rotura (ϵ_r) en formato decimal, junto con sus respectivas desviaciones estándar (DE). ilustra ejemplos del comportamiento de los materiales durante los ensayos.

El EB evidenció el mayor valor de σ_{tmax} con un valor de 15,21 MPa y una elongación a rotura de 11,32, indicando una buena resistencia y ductilidad. Todas las mezclas mostraron una disminución significativa en la σ_{tmax} , con valores que varían de 3,72 MPa en M40 a 5,10 MPa en M30. La ϵ_r de rotura también se redujo considerablemente conforme el incremento de las fibras llegando a presentar un valor de sólo 0,25 en M50.

Tabla 6.6 Valores promedios y desviación estándar (DE) de la tensión máxima y la elongación de rotura del polímero EB y sus mezclas con fibras de GaK en pruebas de tracción.

Referencia Muestra	σ_{tmax} (MPa)	DE (MPa)	ϵ_r (s.u)	DE
EB	15,21	3,25	11,32	2,07
M30	5,10	0,57	5,88	0,80
M40	3,72	0,30	4,20	0,87
M50	4,26	0,22	0,25	0,06

Estos hallazgos están en concordancia con los realizados por Abhilash [15], que indica el refuerzo de polímeros termoplásticos con fibras naturales tiende a mejorar la resistencia a la flexión, pero afecta negativamente al alargamiento. También resalta que los compuestos a base de copolímeros exhiben un alargamiento superior comparados con los compuestos a base de homopolímeros.

El notable decremento en la σ_{tmax} y la ϵ_r con el aumento del contenido de fibras de bambú en las mezclas sugiere una interacción compleja entre las fibras y la matriz polimérica que involucra variables como a orientación dispersión y adición de fibras en la matriz.

Estos aspectos pueden crear sitios de concentración de esfuerzos que facilitan la iniciación de grietas bajo carga, especialmente en mezclas con altas proporciones de fibras. Sin embargo, Khalil [16] resalta la ventaja de las fibras de bambú en la resistencia a la tracción y al impacto de los compuestos poliméricos frente a otros materiales.

6.5 Conclusiones

Los resultados del análisis TGA demuestran que mientras el copolímero de EB muestra una excelente estabilidad térmica en comparación con la GaK, la incorporación de fibras de bambú reduce esta estabilidad a temperaturas más bajas, aunque mejora la resistencia a la descomposición a temperaturas más altas en comparación con la guadua pura. Esto subraya la importancia de optimizar las proporciones de bambú en los compuestos para equilibrar la estabilidad térmica con otras propiedades deseadas del material.

El estudio de DSC revela que las fibras de bambú influyen significativamente en la estructura y las propiedades térmicas del copolímero de etileno-buteno. La reducción observada en las entalpías que indica reducción de la cristalinidad de las mezclas con fibras de bambú sugiere que las interacciones entre el bambú y la matriz polimérica son complejas y afectan directamente las propiedades térmicas del compuesto. Este conocimiento es esencial para ajustar las propiedades del material para cumplir con requisitos específicos de aplicación, facilitando así el diseño de nuevos materiales compuestos más sostenibles y funcionales.

Los datos de LOI y pirradiator reflejan la complejidad de mejorar la resistencia al fuego de los composites poliméricos y la necesidad de un enfoque cuidadoso en la selección y el diseño de los componentes de la mezcla.

La incorporación de fibras de guadua en la matriz de EB evidencia poca influencia en la conductividad térmica del compuesto. Característica que podría ser aprovechada para aplicaciones constructivas donde se requiera recubrimientos de aislamiento térmico. Este estudio contribuye al entendimiento de cómo las modificaciones en los compuestos

poliméricos pueden ser utilizadas para ajustar sus propiedades térmicas, una consideración vital para aplicaciones donde la gestión térmica es crítica.

El estudio revela que la adición de fibras de GaK al copolímero de EB mejora la rigidez del material. Este aumento en el módulo de elasticidad y menor densidad con el contenido de GaK resalta el potencial de las fibras naturales como refuerzos en materiales poliméricos para aplicaciones que exigen materiales más ligeros y resistentes. Estos hallazgos son fundamentales para el desarrollo futuro de compuestos basados en polímeros reforzados con materiales naturales, optimizando su diseño para aplicaciones específicas en la industria y la tecnología.

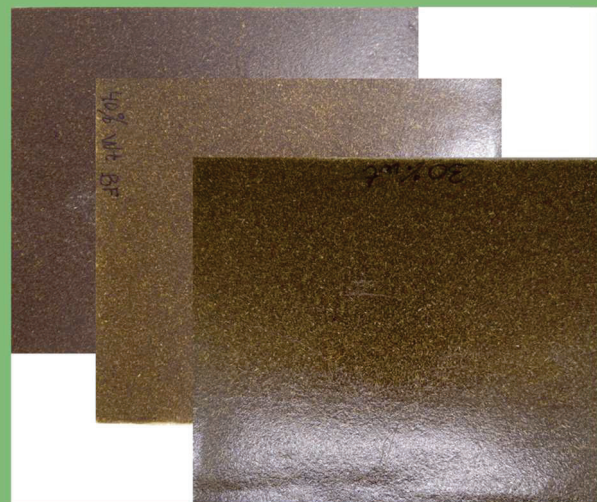
Los resultados del estudio presentado en este capítulo demuestran el potencial de los residuos del bambú como reforzantes en matrices poliméricas. Las propiedades térmicas y mecánicas de los composites resultantes indican que, con la adecuada optimización de las proporciones y tratamiento de las fibras, estos materiales pueden ser adecuados para una variedad de aplicaciones industriales. La integración de estos materiales o específicamente el aprovechamiento de polímeros reciclados podría ser una solución viable y sostenible con el uso que contribuye a la economía circular y al desarrollo de nuevos materiales compuestos ecológicos. Esta investigación amplía el conocimiento y sugiere seguir investigando en este ámbito.

6.6 Bibliografía

- [1] M. Niubó, “Formulación y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica con polvo de acería en aplicaciones acústicas,” Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona, 2011.
- [2] K. Zhang, F. Wang, W. Liang, Z. Wang, Z. Duan, and B. Yang, “Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced epoxy composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 8, no. 6, 2018, doi: 10.3390/polym10060608.
- [3] C. R. Ardila, M. B. Folgueras, and F. J. Fernández, “Oxidative pyrolysis of *Guadua angustifolia* Kunth,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 738–743, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2019.09.057.
- [4] D. Xu, S. He, W. Leng, Y. Chen, and Z. Wu, “Replacing Plastic with Bamboo: A Review of the Properties and Green Applications of Bamboo-Fiber-Reinforced Polymer Composites,” *Polymers*, vol. 15, no. 21, 2023, doi:

10.3390/polym15214276.

- [5] M. I. Nelson, H. S. Sidhu, R. O. Weber, and G. N. Mercer, "A dynamical systems model of the limiting oxygen index test," *ANZIAM J.*, vol. 43, no. 1, pp. 105–117, 2001, doi: 10.1017/S1446181100011457.
- [6] L. Haurie, A. Avellaneda, and J. Monton, "Fire Behavior of Bamboo, *Guadua angustifolia*," in *Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety 2020 9*, 2020, pp. 103–108.
- [7] D. U. Shah, M. C. D. Bock, H. Mulligan, and M. H. Ramage, "Thermal conductivity of engineered bamboo composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 51, no. 6, pp. 2991–3002, 2016, doi: 10.1007/s10853-015-9610-z.
- [8] K. Liu, H. Takagi, R. Osugi, and Z. Yang, "Effect of physicochemical structure of natural fiber on transverse thermal conductivity of unidirectional abaca/bamboo fiber composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 1234–1241, 2012, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.02.020.
- [9] H. Takagi, S. Kako, K. Kusano, and A. Ousaka, "Thermal conductivity of PLA-bamboo fiber composites," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 16, no. 4, pp. 377–384, 2007, doi: 10.1163/156855107782325186.
- [10] ASTM INTERNATIONAL, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.," West Conshohocken, 2002. doi: 10.1520/D0790-10.
- [11] D. Ray, B. K. Sarkar, A. K. Rana, and N. R. Bose, "Mechanical properties of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibres," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 1, pp. 119–127, 2001, doi: 10.1016/S1359-835X(00)00101-9.
- [12] S. Subramonian, A. Ali, M. Amran, L. D. Sivakumar, S. Salleh, and A. Rajaizam, "Effect of fiber loading on the mechanical properties of bagasse fiber-reinforced polypropylene composites," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 8, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1177/1687814016664258.
- [13] M. Martijanti, S. Sutarno, and A. L. Juwono, "Polymer composite fabrication reinforced with bamboo fiber for particle board product raw material application," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 24, 2021, doi: 10.3390/polym13244377.
- [14] ASTM International, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," West Conshohocken, 2022. doi: 10.1520/D0638-22.1.
- [15] R. M. Abhilash, G. S. Venkatesh, and S. S. Chauhan, "Development of bamboo polymer composites with improved impact resistance," *Polym. Polym. Compos.*, vol. 29, no. 9_suppl, pp. S464–S474, 2021, doi: 10.1177/09673911211009369.
- [16] H. P. S. A. Khalil, I. U. H. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan, and Y. S. Hadi, "Bamboo fibre reinforced biocomposites : A review," *Mater. Des.*, vol. 42, pp. 353–368, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.015.



Capítulo 7.

Conclusiones Generales

- Conclusiones generales

7 Conclusiones generales

Los tratamientos térmicos y termoquímicos en la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK) demostraron una influencia significativa en la alteración de las estructuras químicas y morfológicas, particularmente en la degradación de la hemicelulosa al ser térmicamente menos estable y, en menor medida, de la celulosa y la lignina. Lo observado se refleja en la reducción del módulo de elasticidad (E) y la resistencia a la flexión (σ_f) en comparación con el grupo de control. No obstante, con el aumento del tiempo de tratamiento hasta los 120 min, se observó una recuperación y estabilización de estas propiedades. Los tratamientos prolongados pueden inducir la cristalización de la celulosa y la condensación de la lignina, fortaleciendo y ordenando la estructura del bambú, lo que se traduce en un incremento del módulo de elasticidad. Asimismo, la remoción de extractos solubles y otros componentes de baja molecularidad que actúan como plastificantes naturales durante estos tratamientos largos contribuye a aumentar la rigidez del material. Los análisis morfológicos corroboran la eliminación de estos componentes a medida que se extiende el tiempo de tratamiento.

El tratamiento termoquímico de 60 minutos con bórax y ácido bórico mostró una mejora significativa en el módulo de elasticidad y una resistencia a la flexión comparable al mejor resultado obtenido con los tratamientos térmicos. Este tratamiento también mostró potencial para aumentar la resistencia al fuego y retardar la degradación bacteriana, apoyando así el objetivo de optimización de tratamientos.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los tableros de bambú producidos en Santa Elena, Ecuador, reveló que mejoras en los procesos de producción podrían reducir significativamente los impactos ambientales negativos, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero en un 88% y el consumo de energía en un 41%. Estrategias orientadas a la recirculación y reutilización de flujos de materiales y energía emergen como cruciales para minimizar el impacto ambiental, enfatizando la importancia de una gestión eficiente de residuos y de la energía.

El desarrollo de materiales compuestos utilizando residuos de bambú indicó que la integración de fibras de bambú en matrices poliméricas altera las propiedades térmicas y mecánicas del material compuesto. La adición de estas fibras, aunque reduce la estabilidad térmica a temperaturas más bajas, mejora la resistencia a la descomposición a temperaturas más altas, proporcionando un equilibrio óptimo entre la estabilidad térmica y otras propiedades deseadas del material. Además, se observó un aumento en la rigidez y una reducción en la densidad del material con la inclusión de fibras de bambú, destacando el potencial de estos refuerzos naturales en aplicaciones que demandan materiales más ligeros y resistentes.

Estos hallazgos son esenciales para el desarrollo futuro de compuestos basados en polímeros reforzados con materiales naturales, optimizando su diseño para aplicaciones específicas en la industria y la tecnología.

En conjunto, los hallazgos de esta investigación resaltan la viabilidad de utilizar la GaK en aplicaciones de construcción sostenible, ofreciendo un equilibrio entre la mejora de propiedades y la minimización del impacto ambiental.



Capítulo 8. Recomendaciones

- Recomendaciones

8 Recomendaciones

La presente tesis ha explorado la viabilidad de la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK) en el contexto de la economía circular y su aplicación en la construcción sostenible. A partir de los resultados obtenidos y las perspectivas emergentes en el campo de los materiales de construcción sostenibles, se recomienda la exploración de diversas líneas de investigación que podrían fortalecer y ampliar el uso del bambú, contribuyendo así al desarrollo tecnológico, ambiental y social. Las siguientes áreas de investigación se presentan como recomendaciones para futuros estudios doctorales y proyectos de investigación.

1. Optimización de Tratamientos con Bórax y Ácido Bórico

El tratamiento térmico y termoquímico con bórax y ácido bórico ha mostrado resultados prometedores en la mejora de la resistencia mecánica y al fuego del bambú. Sin embargo, la fijación de estos químicos en la fibra de bambú y la prevención de su lixiviación en condiciones ambientales variadas requieren una investigación más detallada. Se sugiere profundizar en:

- Investigar cómo las variaciones en la concentración de bórax y ácido bórico afectan la resistencia y durabilidad del bambú, incluyendo estudios a largo plazo sobre la estabilidad de estas modificaciones químicas bajo diferentes condiciones climáticas.
- Determinar el tiempo de fijación óptimo que maximiza la penetración y efectividad de estos tratamientos, evaluando su impacto en las propiedades mecánicas y de resistencia al fuego del material.

2. Desarrollo de Materiales Compuestos con Polímeros Reciclados

El uso de polímeros reciclados en la elaboración de materiales compuestos abre un camino hacia la reducción del impacto ambiental y la promoción de la sostenibilidad en la industria de la construcción. Las investigaciones futuras podrían centrarse en:

- Explorar la sinergia entre las fibras de bambú y diferentes tipos de polímeros reciclados para desarrollar compuestos con propiedades mecánicas mejoradas, evaluando también su comportamiento térmico y su durabilidad.
- Desarrollar prototipos de productos constructivos utilizando estos materiales compuestos y realizar pruebas de campo para validar su desempeño en condiciones reales.

3. Mejora de la Resistencia al Fuego con Aditivos Ecológicos

La resistencia al fuego es crucial en materiales de construcción. Para mejorar esta propiedad en los compuestos de bambú, se recomienda:

- Identificar y testar nuevos aditivos retardantes de llama que sean menos nocivos para el medio ambiente que los tradicionales. Esto incluye la evaluación de su efectividad y su impacto en otras propiedades físicas y químicas del bambú.
- Investigar la interacción entre diferentes tratamientos y aditivos para optimizar tanto la resistencia al fuego como otras propiedades deseables, como la resistencia mecánica y la estabilidad térmica.

4. Estandarización del Bambú para Fomentar la Economía Local

El desarrollo de estándares para los subproductos del bambú puede facilitar su adopción en mercados locales e internacionales, fomentando la economía local y la sostenibilidad.

- Trabajar en conjunto con organismos reguladores para desarrollar normativas que estandaricen las características del bambú tratado y sus derivados, asegurando calidad y seguridad.
- Explorar modelos de negocio que integren a las comunidades locales en la producción y comercialización de bambú y sus derivados, evaluando el impacto socioeconómico de estos modelos.

Estas líneas de investigación no solo amplían el conocimiento científico y técnico sobre la GaK y sus aplicaciones, sino que también contribuyen a la sostenibilidad ambiental y

al desarrollo económico. Se anima a futuros investigadores a abordar estas áreas con un enfoque interdisciplinario que integre aspectos tecnológicos, ambientales y socioeconómicos, para maximizar el impacto positivo de la investigación en la sociedad y en el medio ambiente. La implementación de estos estudios podría liderar a innovaciones significativas en el campo de los materiales de construcción sostenibles y en la valorización de recursos naturales como el bambú.

APÉNDICE

A1 Contribuciones en congresos y publicaciones científicas

A1.1 Mejora de las prestaciones mecánicas y frente al fuego de laminas de bambú mediante la optimización del proceso de cocción



Mejora de las prestaciones mecánicas y frente al fuego de láminas de bambú mediante la optimización del proceso de cocción

Bismark Torres Ruilova^{a,b}, José Antonio Padilla Sánchez^{a,c}, Joaquim Serra Radaa, Mónica Martínez López^a, Elena Xuriguera Martí^a, Mercè Segarra Rubí^{a,*}

^a Departament de Ciència de Materials i Química Física, Facultat de Química, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès 1-11, 08028 Barcelona, Spain

^b Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Guayaquil, Guayaquil 090510, Ecuador.

^c Departament d'Enginyeria Mecànica, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Diagonal 647, 08028, Barcelona, Spain

Ecuador es actualmente un país productor de bambú con aproximadamente 15.000 ha explotables y una producción aproximada de 10.000 tm dedicadas a la exportación, principalmente a Japón y China. La principal especie de bambú explotable en Ecuador es la *Guadua angustifolia* Kunth (GAK). Es importante resaltar que Ecuador es un país con actividad sísmica por lo que los requerimientos de construcción deben tener en cuenta la construcción sismoresistente. Es en este apartado donde el bambú puede ser clave tanto para el desarrollo del país como para la mejora de las estructuras de los edificios.

El bambú por su estructura interna y por ser un material que se produce en Ecuador es un excelente material alternativo para la construcción sostenible en el país debido a su ligereza, elevada resistencia mecánica y flexibilidad. No obstante, es propenso al ataque por microorganismos, lo que provoca cierto rechazo social a su uso.

Con el objetivo de optimizar las propiedades mecánicas y de durabilidad (resistencia al agua y a los microorganismos), el presente trabajo muestra el efecto del tiempo (30, 60, 90 y 120 min) y del medio de cocción (agua destilada con o sin aditivos) en las propiedades a flexión de las láminas de bambú GAK y su estabilidad dimensional. Las muestras estudiadas provienen de la zona de producción de bambú del Sector Dos Mangas en la provincia Santa Elena.

Se ha determinado la cantidad de azúcares extraídos durante la cocción, mediante el reactivo de Fehling, con el objetivo de evaluar su resistencia al ataque de los microorganismos y de manera cualitativa la composición química de las probetas mediante FT-IR. Para mejorar su comportamiento frente al ataque de los microorganismos y su comportamiento al fuego, se han realizado ensayos de cocción añadiendo al agua una mezcla de ácido bórico/bórax. El comportamiento mecánico (rigidez y módulo de rotura) de las láminas se ha evaluado mediante ensayos de flexión a 3 puntos. Mediante Microscopía Electrónica de Barrido se han evaluado los cambios a nivel microestructural y el comportamiento frente al fuego se ha estimado mediante medidas del índice de oxígeno límite (LOI).

A1.2 El bambú como alternativa de construcción sostenible

EXTENSIONISMO, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA - CLAVES PARA EL DESARROLLO - VOLUMEN 5

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, Guimarães, 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⁻¹ año⁻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 *Gua-dúa 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 quinch / 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 reemplazar 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 de 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 de 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 Guadua 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 Carbone, "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. Vogtlander, 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. Bhardwaj 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 Ingeniería 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.