

Análisis comparativo de las propiedades y viabilidad del uso de materiales propios de la bioconstrucción respecto al uso del concreto dentro de la realidad nacional

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Análisis comparativo de las propiedades y viabilidad del uso de materiales propios de la Bioconstrucción respecto al uso del concreto dentro de la realidad nacional

Llevado a cabo por el estudiante:

Rodríguez Comandini Andrés

Carné: 2015182247

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el martes 25 de marzo de 2025 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Firmado digitalmente por
JOSE ANDRES ARAYA
OBANDO (FIRMA)
Fecha: 2025.04.02
08:49:34 -06'00'

Dr. José Andrés Araya Obando
Director de Escuela

CARLOS MANUEL UGALDE
UGALDE
HERNANDEZ (FIRMA)
2025.03.31 11:03:03
-06'00'

Arq. Carlos Ugalde Hernández, MDU
Profesor Guía

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Firmado digitalmente
por WILLIAM ALONSO
POVEDA MONTOYA
(FIRMA)
Fecha: 2025.03.25
15:12:38 -06'00'

Ing. Alonso Poveda Montoya MSc.
Profesor Lector

MILTON ANTONIO SANDOVAL QUIROS
SANDOVAL QUIROS (FIRMA)
Fecha: 2025.03.25 14:47:49 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MAE
Profesor Observador

Resumen

Se observa que el concreto es el material más ampliamente disponible en la Gran Área Metropolitana (GAM), representando el 66 % de los puntos de venta identificados, en contraste con el 33 % de la madera y un 6 % del bambú.

El concreto es el material más económico, con un valor referido de 82 998,5 colones por metro cúbico, seguido por el bambú, con 357 743,13 colones por metro cúbico, y la madera de teca, siendo la más costosa, con un valor de 1 386 000,0 colones por metro cúbico. En la sección de resultados se explican las conversiones realizadas para obtener estos datos. Aquí también se evalúa la capacidad mecánica reportada por los autores consultados. Se observa que el bambú exhibe una resistencia a la compresión mayor que la madera y el concreto, con un valor de 571,9 kg/cm², seguido por la madera, con 491 kg/cm², en comparación con la resistencia mínima requerida para el concreto estructural, según el CSCR, de 210 kg/cm².

En términos de sostenibilidad ambiental, la madera presenta en su producción una captación neta de 1,72 kg CO₂/kg de madera. Para el bambú se encontró una captación de 1,62 kg CO₂/kg de bambú, en contraste con la producción de cemento para el concreto, que emite 0,59 kg CO₂/kg de cemento producido en 2021.

Si bien la madera y el bambú presentan ventajas en términos de resistencia y sostenibilidad ambiental, su disponibilidad limitada y su alto costo en comparación con el concreto plantean desafíos en su adopción generalizada en proyectos de construcción en la GAM.

Palabras clave: Concreto, clínker, madera, bambú, captación y emisión dióxido de carbono.

Abstract

The analysis of the results reveals important information about the availability, mechanical capacity (in terms of compressive strength), and ecological considerations of three construction materials: concrete, *Tectona grandis* wood, and *Guadua angustifolia* bamboo.

In terms of availability, it is observed that concrete is the most widely available material in the Greater Metropolitan Area (GMA) of Costa Rica, representing 66% of the identified points of sale, in contrast to 33% for wood and just 6% for bamboo.

Regarding the price per cubic meter, it is highlighted that concrete is the most economical material, with a referenced value of 82,998.5 colones per cubic meter, followed by bamboo at 357,743.13 colones per cubic meter, and teak wood being the most expensive at 1,386,000,00 colones per cubic meter. However, when evaluating mechanical capacity, it is observed that bamboo exhibits significantly greater compressive strength than wood and concrete, with a value of 571.9 kg/cm², followed by wood with 491 kg/cm², compared to the minimum required strength for structural concrete according to the CSCR of 210 kg/cm².

In terms of environmental sustainability, wood shows a net carbon capture of 1.72 kg CO₂ per kg of wood during its production. For bamboo, a capture of 1.62 kg CO₂ per kg of bamboo was found, in contrast with cement production for concrete, which emits 0,59 kg CO₂ per kg of cement produced as of 2021.

While wood and bamboo offer advantages in terms of strength and environmental sustainability, their limited availability and higher cost compared to concrete present challenges for their widespread adoption in construction projects in the Greater Metropolitan Area (GMA).

Key words: Concrete, clinker, wood, bamboo, carbon dioxide capture and emission.

Análisis comparativo de las propiedades y viabilidad del uso de materiales propios de la bioconstrucción respecto al uso del concreto dentro de la realidad nacional

ANDRÉS RODRÍGUEZ COMANDINI

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Abril de 2025

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Resumen	I
Abstract.....	II
Contenido	IV
Resumen ejecutivo	8
Introducción	12
Capítulo 1: Marco teórico	15
1.1 DISPONIBILIDAD EN LA GAM	15
1.5.1 Disponibilidad de concreto dentro de la GAM	16
1.5.2 Disponibilidad de madera estructural	17
1.5.3 Disponibilidad de bambú estructural.....	20
1.2 PROPIEDADES FÍSICAS	21
1.1.1 Propiedades físicas del concreto.....	22
1.1.2 Propiedades físicas de la madera	25
1.1.3 Propiedades físicas del bambú.....	28
1.3 PROPIEDADES CONSTRUCTIVAS.....	31
1.2.1 Propiedades constructivas del concreto.....	32
1.2.2 Propiedades constructivas de la madera	35
1.2.3 Propiedades constructivas del bambú.....	40
1.4 PROPIEDADES MECÁNICAS	43
1.3.1 Propiedades mecánicas del concreto.....	44
1.3.2 Propiedades mecánicas de la madera	49
1.3.3 Propiedades mecánicas del bambú.....	53
1.5 EMISIÓN O CAPTACIÓN DE CO₂ RELACIONADAS CON LA PRODUCCIÓN	58
1.4.1 Emisiones de CO ₂ relacionadas con la producción de concreto.....	59

1.4.2 Captación de CO ₂ relacionadas con la producción de madera.....	64
1.4.3 Emisiones de CO ₂ relacionadas con la producción de bambú	67
Capítulo 2: Metodología	72
2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	72
2.1.1 Enfoque de la investigación.....	72
2.1.2 Forma de recolección de información	73
2.1.3 Propósito.....	73
2.2 DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS Y VARIABLES	74
2.2.1 Propiedades mecánicas	75
2.2.2 Propiedades constructivas.....	75
2.2.3 Disponibilidad en el mercado.....	76
2.2.4 Emisiones y sostenibilidad.....	77
2.4 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	78
2.4.1 Recursos digitales.....	78
2.4.2 Páginas web de empresas	78
2.4.3 Contacto con las empresas	79
2.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN	80
2.5.1 Revisión de documentación técnica	80
2.5.2 Investigación en línea	80
2.5.3 Contacto directo con las empresas	81
2.5.4 Conversiones de unidades	81
2.6 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	82
2.6.1 Presentación de resultados	82
2.6.2 Descripción del proceso de análisis	83
Capítulo 3: Análisis y resultados	84
3.1 DISPONIBILIDAD EN LA GAM	85
3.2 PROPIEDADES FÍSICAS	95
3.2.1 Densidad.....	95
3.2.2 Conductividad térmica	96
3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS	99
3.4 EMISIÓN O CAPTACIÓN DE CO₂.....	104

Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones 117

CONCLUSIONES **117**

RECOMENDACIONES **119**

Referencias..... 121

Anexos 124

Resumen ejecutivo

Desde hace décadas, se presentan múltiples estudios científicos que evidencian la realidad del cambio climático. Por ejemplo, el estudio de Marcott et al. (2013) utiliza registros de núcleos de hielo para reconstruir las temperaturas de la superficie terrestre de los últimos 10 000 años y demuestra que la tasa de calentamiento global en el siglo XX es sin precedentes en al menos los últimos 10 000 años. Actualmente, existen alternativas a procesos y productos incompatibles con un desarrollo sostenible a largo plazo. Algunas de estas alternativas son prácticas y accesibles, aunque muchas no se consideran por la falta de información y la escasez en el mercado actual, especialmente en la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica, donde se concentra el desarrollo económico y de la obra civil del país.

En el sector de la construcción, el material más comúnmente utilizado por su abundancia, trabajabilidad y alta resistencia a la compresión es el concreto. Sin embargo, la producción de cemento, necesario para el concreto, requiere la combustión en gran escala de combustibles fósiles, representando un 26 % de las emisiones de CO₂ a la atmósfera por parte del sector industrial a nivel global (International Energy Agency [IEA], 2020). El uso de materiales alternativos, como la madera y el bambú, puede reemplazar al concreto en elementos estructurales de las edificaciones, ya que no solo requieren de pocas emisiones de dióxido de carbono para su procesamiento, sino que también retienen carbono en su estructura, teniendo una huella de carbono positiva (Hernández y Jiménez, 2021).

Este estudio se relaciona con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) del plan Agenda 2030, específicamente con los siguientes:

1. Industria, innovación e infraestructura:
 - Meta 9.1: Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad.
 - Meta 9.4: Modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles.

2. Ciudades y comunidades sostenibles:

- Meta 11.3: Aumentar la urbanización inclusiva y sostenible.
- Meta 11.6: Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades.

3. Producción y consumo responsables:

- Meta 12.2: Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
- Meta 12.8: Asegurar que las personas tengan la información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible.

Aunque Costa Rica es conocida por su imagen ambientalista, la población en general tiene un bajo nivel de conocimiento sobre los materiales alternativos, su uso, propiedades y beneficios. Según el *Reporte del estatus global* (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [UNEP], 2016), a pesar de la considerable cantidad de hallazgos de investigaciones que demuestran impactos positivos en el rendimiento sostenible, la calidad de la información sobre el rendimiento de los edificios debe estandarizarse.

Este proyecto de investigación consiste en un estudio y recopilación de fuentes bibliográficas tanto nacionales como extranjeras, con el fin de comparar las distintas propiedades de materiales propios de la bioconstrucción, como la madera y el bambú, respecto al concreto. Esta comparación toma en cuenta implicaciones económicas y ambientales, así como una comparación de capacidad mecánica y constructiva. Se busca demostrar que el uso de materiales alternativos es viable y puede traer beneficios al ambiente en términos de reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera y, al mismo tiempo, cumplir con los requerimientos estructurales necesarios para su uso.

Como metodología, se realiza una investigación bibliográfica para recopilar los datos necesarios y poder efectuar la comparación entre los materiales en estudio. Además, se lleva a cabo una investigación de las empresas activas que ofrecen estos materiales alternativos para su uso estructural dentro de la GAM del país. El objetivo es basarse en la información recolectada para realizar una comparación y un análisis objetivo sobre las propiedades de los materiales en estudio, destacando las ventajas y/o desventajas del uso de estos materiales alternativos y presentar una guía comparativa que permita determinar si el uso de estos materiales es viable en comparación con el concreto y para la realidad nacional.

Respecto a los resultados obtenidos a partir de la información recopilada del marco teórico, se tienen los siguientes aspectos que se desarrollan a continuación:

Disponibilidad.

El concreto es el material más ampliamente disponible en la GAM, representando el 66 % de los puntos de venta identificados, en contraste con el 33 % de la madera y apenas un 6 % del bambú. Esta alta disponibilidad del concreto facilita su adopción generalizada en la construcción, pero también subraya la necesidad de aumentar la oferta de materiales alternativos como la madera y el bambú para promover una construcción más sostenible.

Costo.

El concreto es el material más económico, con un precio de 82 998,5 colones por metro cúbico, seguido por el bambú, con 357 743,13 colones por metro cúbico, y la madera de teca, siendo la más costosa, con un valor de 1 386 000,00 colones por metro cúbico. La diferencia significativa en los costos puede ser una barrera para la adopción de madera y bambú en la construcción, a pesar de sus beneficios ambientales.

Capacidad mecánica.

El bambú exhibe una resistencia a la compresión significativamente mayor que la madera y el concreto, con un valor de 571,9 kg/cm², seguido por la madera, con 491 kg/cm², en comparación con la resistencia mínima requerida para el concreto estructural, según el CSCR, de 210 kg/cm². Estos resultados indican que el bambú y la madera no solo son viables desde una perspectiva estructural, sino que también pueden ofrecer una mayor resistencia en comparación con el concreto tradicional.

Sostenibilidad ambiental.

La madera de teca capta entre 1,91 kg CO₂/kg y 2,18 kg CO₂/kg de madera, mientras que el bambú posee 1,62 kg CO₂/kg de bambú, en contraste con la producción de cemento para el concreto, que emite 0,59 kg CO₂/kg de cemento producido en 2021. Esto demuestra que tanto la madera como el bambú tienen un impacto positivo en términos de captación de carbono, lo que contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono de las construcciones.

En esta investigación se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones. Si bien la madera y el bambú presentan ventajas en términos de resistencia y sostenibilidad ambiental, su disponibilidad limitada y su costo relativamente alto en comparación con el concreto plantean desafíos en su adopción generalizada en proyectos de construcción en la GAM de Costa Rica. Este estudio proporciona una guía comparativa que facilita el acceso a información relevante para elegir materiales de construcción, donde se destacan los beneficios ecológicos del uso de materiales alternativos y se promueve su uso en la construcción civil en Costa Rica.

Para fomentar la adopción de estos materiales alternativos, se recomienda:

- Fomentar el incremento de la oferta, la disponibilidad y el uso de madera y bambú en el mercado nacional de la construcción.
- Implementar políticas de incentivos económicos para reducir los costos de estos materiales.
- Promover la investigación y el desarrollo de técnicas constructivas que maximicen las propiedades estructurales y ambientales de la madera y el bambú.

Introducción

En la actualidad, la sostenibilidad y el respeto por el medio ambiente se han convertido en prioridades fundamentales para la sociedad. El sector de la construcción no es una excepción, pues se enfrenta al desafío de reducir su impacto ambiental sin comprometer la funcionalidad y durabilidad de las edificaciones. La bioconstrucción, que promueve el uso de materiales ecológicos y sostenibles, se presenta como una alternativa viable y necesaria frente a los métodos tradicionales de construcción, particularmente al uso del concreto.

Planteamiento del problema

La producción mundial de cemento representa cerca del 26 % de las emisiones de CO₂ a la atmósfera por parte del sector industrial (IEA, 2020, p. 226). Esta cifra resulta alarmante si se considera el papel del cemento en las emisiones antropogénicas globales de CO₂, al contribuir con entre un 5 % y un 7 %, según Benheal et al. (2013). La falta de información y de oferta en el mercado dificulta la implementación de materiales alternativos ecológicos, como la madera y el bambú, que podrían reducir significativamente estas emisiones.

Justificación

El tema de investigación resulta de importancia, ya que el equilibrio ambiental depende en gran medida de las actividades humanas. El uso de materiales alternativos en la construcción puede representar un beneficio considerable para el medio ambiente. Este estudio pretende analizar la realidad nacional, de modo que se proporcionen datos que permitan comparar, desde una perspectiva ambiental, económica y estructural, los beneficios y desventajas del uso de estos materiales alternativos en la construcción, en relación con el uso del concreto. Se espera promover el uso de dichos materiales y difundir información relevante sobre sus beneficios.

Contribución a los ODS

Esta investigación está alineada con varios ODS, incluyendo:

- Industria, innovación e infraestructura.
- Ciudades y comunidades sostenibles.
- Producción y consumo responsables.

Antecedentes

Existen numerosas investigaciones sobre las propiedades físicas y mecánicas de los materiales en estudio. Por ejemplo, Kosmatka (2011) proporciona una guía completa sobre las propiedades del concreto y el cemento tipo Portland. Autores como Quesada (2010) y Rivero (2006) ofrecen datos sobre las propiedades de la madera, mientras que Césare (2019) presenta un estudio sobre plantaciones de bambú. Estas referencias forman parte del marco teórico utilizado para comparar y analizar los materiales en estudio. Además, estudios como los de Worren (2001), sobre las emisiones de CO₂ del cemento, y los de Jimenes et al. (2020) y Alvarado y Marcia (2021), sobre la captación de CO₂ en la madera y el bambú respectivamente, han sido fundamentales para esta investigación.

Objetivos de la investigación

El objetivo principal de este estudio es comparar el uso estructural de materiales alternativos como la madera y el bambú en relación con el concreto, evaluando sus implicaciones ambientales en términos de emisiones y captación de carbono, así como sus propiedades mecánicas. Se pretende proporcionar una comparación que facilite la concienciación respecto al uso de materiales alternativos en el sector de la construcción.

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- OE1: Investigar sobre la disponibilidad del mercado nacional de los materiales en estudio.
- OE2: Comparar las propiedades mecánicas, de la madera el bambú y el concreto, comparar su disponibilidad, y comparar las nes de CO₂ relacionadas con su producción.
- OE3: Determinar la viabilidad, en términos de disponibilidad y costo, del uso de los materiales alternativos en la construcción, en comparación con el concreto, en la realidad nacional.

Alcance

El trabajo abarca la comparación de las propiedades mecánicas, específicamente la resistencia a la compresión, así como la disponibilidad en el mercado, los precios locales y las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de concreto, y la captación relacionada con la producción de madera y bambú. Aunque

también se abordan algunas propiedades físicas y constructivas, el análisis se centra en los aspectos anteriormente mencionados.

Limitaciones

Entre las principales limitaciones se encuentran la escasez de estudios detallados sobre las propiedades mecánicas y ambientales del bambú y la madera en el contexto nacional, así como la falta de colaboración de algunas empresas del sector para proporcionar información relevante sobre sus productos y servicios.

Capítulo 1: Marco teórico

El presente capítulo tiene como objetivo establecer las bases teóricas que sustentan este trabajo de investigación. Aquí se describen los conceptos fundamentales y las propiedades esenciales de los materiales que son objeto de estudio: la madera, el bambú y el concreto. Se abordan algunas características referentes a sus cualidades físicas, constructivas, mecánicas y ambientales.

En este capítulo se presentan las propiedades físicas de cada material, las cuales son de suma importancia para comprender su desempeño en distintas aplicaciones constructivas. A través de una revisión exhaustiva de la literatura existente y de estudios técnicos, se pretende ofrecer un panorama claro y detallado que sirva como base para los análisis y comparaciones que se desarrollarán en los capítulos subsecuentes. La comprensión de estas propiedades permitirá evaluar de manera objetiva las ventajas y limitaciones de la madera, el bambú y el concreto, así como la manera en que estas se traducen en prácticas constructivas más eficientes y sostenibles.

1.1 Disponibilidad en la GAM

Esta investigación, más que determinar la procedencia de los productos, busca identificar los puntos de venta para cuantificarlos. Asimismo, se pretende cuantificar el precio de la madera estructural, el bambú estructural y el concreto, con el fin de determinar un costo del material por unidad de área efectiva.

El bambú estructural se refiere al uso de bambú como material principal en elementos de construcción que soportan cargas, como vigas y columnas. El Código Sísmico de Costa Rica (CSCR) no menciona explícitamente el uso del bambú como material estructural. Sin embargo, el Código indica que pueden existir elementos, componentes y uniones de ductilidad local óptima, los cuales pueden ser de concreto reforzado, mampostería y acero, diseñados y detallados conforme a los requisitos para ductilidad local óptima, así como elementos, componentes y uniones de estos u otros materiales estructurales que, en pruebas experimentales,

demuestren ser capaces de resistir deformaciones cíclicas correspondientes a razones de deriva de 0,030 o más, sin que su capacidad se reduzca a menos del 80 % de su capacidad máxima (CSCR, 2010).

1.1.1 Disponibilidad de concreto dentro de la GAM

La disponibilidad de materiales de construcción, como el concreto, desempeña un papel fundamental en el desarrollo de proyectos de infraestructura en cualquier país. En el caso particular de Costa Rica, la disponibilidad de concreto constituye un aspecto importante que influye directamente en la planificación y ejecución de obras civiles. A pesar de que en Costa Rica el concreto se usa comúnmente y existe una consecuente oferta de este material en el mercado, en esta investigación se abordará el tema y se buscará cuantificar de alguna manera dicha disponibilidad, con el fin de compararla con la de la madera y el bambú.

En el contexto de la disponibilidad de concreto en nuestro país, es importante considerar dos opciones principales. La primera consiste en adquirir concreto premezclado, el cual es entregado fresco en el sitio del proyecto y listo para su aplicación. La segunda alternativa implica la compra por separado de los agregados, el cemento y otros aditivos necesarios, para luego realizar la mezcla en el lugar de trabajo.

En la sección de resultados se presentará información sobre los puntos de venta de concreto premezclado. Esto permitirá realizar una cuantificación de los puntos de venta de cada material dentro del Gran Área Metropolitana (GAM) del país.

1.1.2 Disponibilidad de madera estructural

Costa Rica es un país que siempre se ha destacado por su gran riqueza vegetal, y existe una gran variedad de especies maderables en el territorio que han sido aprovechadas desde tiempos remotos. A continuación, se muestra una lista de especies maderables del país y sus usos, según Coto (2015):

Figura 1. Especies más utilizadas en construcción en el país.

Nombre común	Nombre científico	Uso
Acacia	<i>Acacia magnium</i>	Construcción y carpintería en general
Almendro	<i>Dipteryx panamensis</i>	Construcción pesada, puentes, pisos
Botarrama	<i>Vochysia ferruginea</i>	Construcción y carpintería en general
Caobilla	<i>Carapa guianensis</i>	Construcción y mueblería en general
Chancho	<i>Vochysia guatemalensis</i>	Construcción liviana interna en general
Cedro	<i>Cedrela spp.</i>	Construcción y mueblería en general
Cenízaro	<i>Samanea saman</i>	Ebanistería y mueblería en general
Ciprés	<i>Cupressus lusitanica</i>	Construcción y mueblería en general
Eucapilto	<i>Eucalyptus spp.</i>	Carpintería en general, construcción liviana
Fruta dorada	<i>Virola koschnyi</i>	Construcción liviana, ebanistería
Guanacaste	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Construcción y mueblería en general
Jaul	<i>Alnus acuminata</i>	Mueblería en general, fósforos, ataúdes
Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	Construcción y mueblería en general
Melina	<i>Gmelina arborea</i>	Construcción y mueblería en general
Níspero	<i>Manilkara chicle</i>	Construcción durable y pesada, traviesas
Pilón	<i>Hieronyma alcornoides</i>	Construcción pesada en general, puentes
Pino	<i>Pinus spp</i>	Construcción y mueblería en general
Pochote	<i>Bombacopsis quinata</i>	Construcción y ebanistería en general
Teca	<i>Tectona grandis</i>	Construcción y mueblería en general
Terminalia	<i>Terminalia spp.</i>	Construcción pesada, puentes, pisos

Fuente: Coto (2015).

El mercado nacional de la madera se encuentra diversificado en cuatro tipos principales, según lo indica Quesada (2010, p. 31, citado por González Beltrán, 2008). Estos tipos son la madera estructural, la madera aserrada o sólida, la madera laminada y la madera contrachapada o *plywood*. Para el propósito de

este trabajo, el enfoque será en la madera aserrada y sólida, debido a sus destacadas capacidades mecánicas, que le permiten desempeñarse como elemento estructural en la construcción civil. Específicamente, interesa la madera proveniente de la especie *Tectona grandis*, pues, como ya se ha comentado anteriormente, las propiedades de cada especie maderera son muy variables. Por eso, esta investigación se enfoca en la madera de teca, ya que es una especie comúnmente utilizada en el país, de rápido crecimiento y con buenas propiedades mecánicas.

El aumento en el precio de la madera de *Tectona grandis* ha sido influenciado por varias restricciones impuestas a la madera proveniente de bosques naturales, así como por los aranceles en los países exportadores. Este fenómeno se compensa en parte con la producción nacional. En Costa Rica, por ejemplo, existen aproximadamente 40 000 plantaciones de teca distribuidas en diversos lugares del país, incluyendo algunas áreas menos favorables, con abundante pluviosidad y sin una estación seca claramente definida, así como en pequeñas explotaciones agrícolas (Fondo Nacional de Financiamiento Forestal [FONAFIFO], 2003).

A la hora de comprar madera en algún distribuidor o directamente en un aserradero, hay que apegarse a ciertas medidas predeterminadas, que son los tamaños nominales. Coto (2015) también proporciona información acerca de estos tamaños para la realidad de nuestro país, tal como se ve en el siguiente cuadro.

CUADRO 1. TAMAÑOS ESTÁNDARES NOMINALES Y MÍNIMOS PARA MADERA ASERRADA.					
Espesor mínimo cepillada			Ancho mínimo cepillada		
Nominal (pulgada)	Seca (cm)	Verde (cm)	Nominal (in)	Seca (cm)	Verde (cm)
2	3,8	4,0	2	3,8	4
2 1/2	5,1	5,2	3	6,4	6,5
3	6,4	6,5	4	8,9	9
3 1/2	7,6	7,8	5	11,4	11,7
4	8,9	9,0	6	14	14,3
4 1/2	10,2	10,3	8	18,4	19
			10	23,5	24,1
			12	28,6	29,2
			14	33,7	34,3
			16	38,7	39,4

Fuente: Elaboración propia mediante datos de Coto (2015).

Estas medidas suelen ser las que ofrecen las empresas que distribuyen madera estructural; sin embargo, en casos especiales hay aserraderos que pueden realizar cortes especiales bajo pedido. Más adelante, en la sección de resultados, se mostrará la información recopilada respecto a las empresas identificadas como proveedoras de madera estructural dentro de la GAM, según la investigación realizada.

Para el caso de la madera, es importante aclarar que en el país se utiliza la unidad denominada “pulgada métrica tica” (PMT); esta es una unidad de volumen en la cual los comerciantes de madera miden y definen los precios. La PMT consiste en un volumen determinado por el área de la sección multiplicada por un largo de, específicamente, 4 varas; esto da como resultado las pulgadas métricas ticas. Una vara es una unidad de longitud definida en 33 pulgadas, o lo que equivale a 83,69 cm. A continuación, se presentan las unidades involucradas en esta unidad de medida:

$$PMT = 1 \text{ in} * 1 \text{ in} * 4 \text{ varas} \text{ (Ecuación 01)}$$

$$1 \text{ vara} = 32.91 \text{ in} \text{ (Ecuación 02)}$$

En la sección de resultados se mostrará la equivalencia de la PMT respecto a unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI) y su relación con los precios del mercado actual del país.

1.1.3 Disponibilidad de bambú estructural

Para el caso del bambú, a diferencia de lo que ocurre con la madera, no existe gran variedad de dimensiones en las que se ofrece el producto, sino que estas están limitadas al tamaño máximo de diámetro que alcanza la planta en su ciclo de vida hasta la cosecha. Las empresas que venden bambú para su uso estructural ofrecen al cliente una variedad de diámetros en los que puede adquirir el producto.

Fácilmente podría afirmarse que el bambú es el material menos comercializado entre los materiales en estudio, debido a su escasa demanda. Esto se refleja también en la falta de normas y códigos que favorezcan la estandarización de las medidas y especificaciones técnicas de estos productos. El bambú, a pesar de ser un material con buenas propiedades mecánicas, ha sido relegado por los costarricenses. No obstante, existen algunas empresas que se encargan de vender productos en bambú, algunas de ellas especializadas en bambú estructural. En la sección de resultados se presenta la información recabada en esta investigación para su posterior análisis.

Un ejemplo de una empresa que promueve el uso del bambú es Bambucoop R.L., una cooperativa agroindustrial enfocada en mejorar las condiciones sociales, ambientales y económicas de la Región Brunca, mediante el cultivo, industrialización y comercialización del bambú, siendo el bambú *Guadua angustifolia* (Kunth) el insumo principal de su actividad, según se indica en su página web. Esta cooperativa fomenta la siembra en terrenos de vocación forestal, con el fin de contar con la materia prima necesaria para el desarrollo del proceso productivo.

Bambucoop R.L. fue fundada el 6 de diciembre de 2014 por productores de bambú con más de 30 años de experiencia. Su meta principal es contar con 5 000 hectáreas de bambú *Guadua angustifolia* (Kunth), distribuidas en la Región Brunca, para alcanzar una producción anual de 100 000 metros cúbicos de madera comprimida de bambú (MCB).

Otro ejemplo es la empresa BambuTico, que se especializa en actividades relacionadas con el bambú, incluyendo siembra, construcciones y múltiples usos de este material. Esta empresa cuenta con una trayectoria de más de 40 años en el ramo y se destaca como pionera en la actividad a nivel nacional.

1.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas se refieren a las características intrínsecas de un material que se pueden medir sin alterar su composición química. Estas propiedades proporcionan información sobre la naturaleza y la estructura del material, y son fundamentales para determinar cómo interactúa con su entorno.

1.2.1 Propiedades físicas del concreto

En esta sección se presentan los datos reportados para algunas propiedades físicas del concreto, como su densidad, su resistencia térmica, así como su color y apariencia, características importantes tanto para su uso estructural como para su valor arquitectónico.

1.2.1.1 Densidad

La densidad del concreto convencional suele estar dentro del rango de 2200 kg/m³ a 2400 kg/m³. Esta propiedad puede variar según la densidad de los agregados y el contenido de aire presente en la mezcla. En el caso del concreto reforzado (concreto con acero), se pueden observar los valores promedio de densidad registrados en una mezcla de concreto fresco, según lo reportado por el mismo autor. Estos datos serán utilizados más adelante en la sección de análisis y resultados.

CUADRO 2. DENSIDAD PROMEDIO OBSERVADA EN CONCRETO FRESCO.								
Tamaño máximo del agregado	Porcentaje de contenido de aire	Agua	Cemento	Densidad (kg/m ³)				
				Densidad relativa del agregado				
(mm)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75
19,0	6,0	168	336	2194	2227	2259	2291	2323
37,5	4,5	145	291	2259	2291	2239	2371	2403
75,0	3,5	121	242	2307	2355	2287	2435	2467

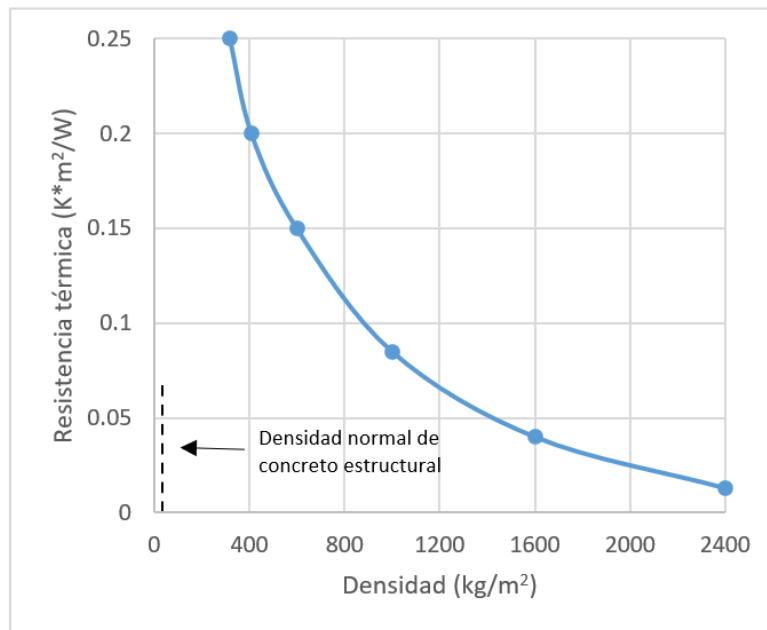
Fuente: Kosmatka (2011).

1.2.1.2 Resistencia térmica

El método ASTM C177, Método de prueba para mediciones de flujo de calor en estado estacionario y propiedades de transmisión térmica mediante el aparato de placa caliente protegida, se utiliza para determinar valores de conductividad térmica. Este método de prueba es el único apropiado para determinar la conductividad térmica del concreto.

La figura 2 muestra una relación aproximada entre la resistencia térmica y la densidad para una mezcla particular de concreto. La conductividad térmica del concreto aumenta conforme aumentan el contenido de humedad y la densidad (Kosmatka, 2011).

Figura 2. Resistencia térmica del concreto versus densidad.

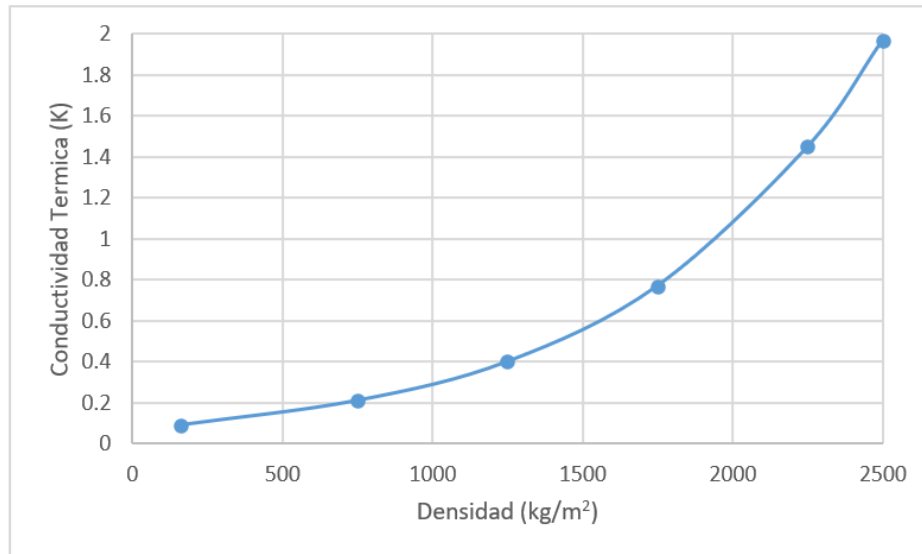


Fuente: Autoría propia con información de Kosmatka (2011).

Aunque el gráfico de la figura 2 evidencia esta propiedad del concreto, en la cual su resistencia térmica ($K \cdot m^2/W$) aumenta según su densidad, esta información no resulta suficiente para efectos comparativos con otros materiales, ya que no se indica el espesor del material en estudio. Para realizar una comparación adecuada, conviene partir de un valor de conductividad térmica ($W/K \cdot m$).

Dado que la resistencia y la conductividad térmicas son magnitudes inversas, la tendencia mostrada en la figura 3 debe ser inversa a la que aparece si se grafica la resistencia térmica respecto a la densidad del concreto, y eso es lo que se observa en la siguiente figura.

Figura 3. Conductividad térmica del concreto según su densidad.



Fuente: Elaboración propia con información de Asadi et al. (2018).

1.2.1.3 Color y apariencia.

El concreto fabricado con cemento tipo Portland se distingue por su característico color y apariencia. Este tipo de concreto presenta una tonalidad que varía generalmente entre gris claro y gris oscuro, dependiendo de la especificación exacta del cemento y la composición de los agregados utilizados en la mezcla. La superficie del concreto de cemento tipo Portland es típicamente lisa y compacta, lo que refleja la calidad y la uniformidad del material. Los agregados, como la grava y la arena, suelen ser visibles en la superficie, proporcionando una textura que puede variar desde fina hasta más gruesa, según las preferencias y el proceso de acabado seleccionado. Además, el concreto de cemento tipo Portland es conocido por su durabilidad y resistencia, características que se reflejan en su apariencia sólida y robusta. En términos generales, el concreto elaborado con cemento tipo Portland ofrece una apariencia estéticamente agradable y profesional, siendo una opción popular y versátil en una amplia gama de aplicaciones de construcción y edificación.

1.2.2 Propiedades físicas de la madera

Dado que existen multitud de especies de madera, es importante, antes que nada, definir cuáles son las más comúnmente empleadas a nivel nacional y centrarse en el estudio de estas. A continuación, se muestra un ejemplo de maderas utilizadas con fines estructurales en viviendas de interés social en el cuadro 3.

CUADRO 3. ESPECIES DE MADERA UTILIZADAS EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL EN COSTA RICA		
Nombre común	Nombre Científico	Tipo de Madera
Caobilla	<i>Guarea sp</i>	Estructural
Níspero chicle	<i>Manikara chichle</i>	Estructural
Jaúl	<i>Alnus acuminata</i>	Estructural
Pino	<i>Pinus radiata</i>	Estructural
Teca	<i>Tectona grandis</i>	Estructural

Fuente: Quesada (2010, p. 33, citando a Carpio, 2008)

También es importante mencionar que, según Coto (2015, citando a Rojas, 2005), actualmente las especies más plantadas en el país son la teca (*Tectona grandis*) y la melina (*Gmelina arborea*), las cuales fueron introducidas en el país en los años 20 y 60, respectivamente.

Son muchas las razones por las cuales la madera de teca es una de las más cotizadas a nivel mundial: su estabilidad dimensional, durabilidad natural, resistencia, belleza, trabajabilidad y diversidad de usos, entre otros, son atributos de esta especie (FONAFIFO, 2003). Tomando esto en cuenta, y por motivos de alcance, el trabajo se centrará en el estudio de la madera tipo teca.

También es importante mencionar que la madera se clasifica en dos tipos según su nivel de humedad: la madera verde es aquella cuyo contenido de humedad está por encima del punto de saturación de las fibras, y la madera seca es aquella que ha pasado por un proceso de secado con valores del 16 %, 18 % y 20 % (Quesada, 2010, p. 37, citando a Tuk, 2007). Para efectos de este estudio, el enfoque será en la madera de teca en su estado seco.

1.2.2.1 Densidad.

Según un estudio realizado para la madera de teca por Rivero (2006), esta presenta un peso específico básico de 0,50, lo que la clasifica como una madera moderadamente pesada; tiene una densidad seca al aire de 0,58 g/cm³ y puede ser categorizada como medianamente pesada según su densidad anhidra de 0,54 g/cm³. Lo anterior se puede observar representado en la siguiente figura.

Figura 4. Propiedades físicas de la madera *Tectona grandis* creciendo en Cochamba, Voa Bolivia.

Propiedad		Prom.	Máy.	Mín.	Coef. de variación (%)	Clasificación ¹
Contenido de Humedad (C.H.) (%)		106.68	125.43	83.22	11.18	*
Densidad	al 12% de C.H (g/cm ³)	0.58	0.63	0.54	4.26	Mediana
	Anhidra (g/cm ³)	0.54	0.60	0.50	4.56	Mediana

Fuente: Rivero (2006).

1.2.2.2 Resistencia térmica.

La conductividad térmica de la madera se ve afectada por varios factores básicos: densidad, contenido de humedad, contenido extractivo, dirección del grano, irregularidades estructurales como fisuras y nudos, ángulo de las fibrillas y temperatura. La conductividad térmica aumenta a medida que aumentan la densidad, el contenido de humedad o la temperatura. La conductividad térmica es prácticamente la misma en las direcciones radial y tangencial. Sin embargo, se ha informado que la conductividad a lo largo del grano es mayor que la conductividad a través del grano por un factor de 1,5 a 2,8, con un promedio de alrededor de 1,8 (Forest Products Laboratory, 2010).

En términos generales, la conductividad de la madera blanda estructural con un contenido de humedad del 12 % se encuentra en el rango de 0,10 W·m⁻¹·K⁻¹ a 0,14 W·m⁻¹·K⁻¹. La resistividad térmica es simplemente el recíproco de la conductividad térmica. Los materiales aislantes de un grosor determinado suelen compararse comúnmente por su "valor R", o resistencia térmica, que se obtiene al multiplicar la resistividad térmica por el grosor.

Es importante entender cómo interpretar las unidades empleadas para medir la conductividad térmica. Esta se expresa en W·m⁻¹·K⁻¹ (vatios por metro por kelvin). Esto significa que la cantidad de calor

(en vatios) que atraviesa un material depende de su espesor (en metros) y de la diferencia de temperatura (en kelvin) entre sus caras. Un valor más alto indica que el material transmite mejor el calor, mientras que un valor más bajo sugiere que es un mejor aislante térmico. El vatio (W) es la unidad de potencia en el SI y es útil para medir la tasa de transferencia de energía, en este caso, calor.

1.2.2.3 Color y apariencia.

La madera de teca aserrada, utilizada para aplicaciones estructurales, presenta un color que varía desde un dorado miel hasta un marrón oscuro, con vetas que le confieren una apariencia atractiva y distintiva. El veteado se refiere al dibujo presente en las superficies longitudinales de la madera y, en el caso de *Tectona grandis*, se considera un veteado pronunciado, según comenta Coto (2015).

En su estado natural, la madera de teca sin tratar exhibe una superficie lisa con un brillo natural, mostrando una textura fina y uniforme que resalta su calidad y durabilidad inherentes. Por otro lado, cuando la madera de teca se somete a tratamientos específicos, como el secado al horno o la aplicación de selladores y protectores, su color puede intensificarse y oscurecerse, adquiriendo tonos más profundos y ricos. Estos tratamientos también pueden mejorar su resistencia a factores externos como la humedad, los insectos y la descomposición, con lo cual se prolonga su vida útil y se mantiene su apariencia estética original por más tiempo.

1.2.3 Propiedades físicas del bambú

A continuación, se presenta la información recopilada sobre las propiedades físicas del bambú, incluyendo su densidad reportada, resistencia térmica, así como su color y apariencia, para la especie en estudio, *Guadua angustifolia*.

1.2.3.1 Densidad.

Para la especie de bambú en estudio (*Guadua angustifolia*), Césare (2019) presenta un dato de densidad aparente de 483,3 kg/m³, con un valor de desviación estándar del muestreo de 0,18. Este valor obtenido por Césare es similar al reportado por Gutiérrez, de 455 kg/m³. En la siguiente figura se puede observar el dato reportado por Césare (2019).

CUADRO 4. Análisis físico del bambú <i>Guadua angustifolia</i>					
Muestra	pH	Densidad aparente	Porosidad	Fibra cruda	Referencia
	(-)	(kg/m ³)	(%)	(%)	(-)
Bambú <i>Guadua angustifolia</i> K.	6.14	483.3	1531	49.06	Césare (2019)
Desviación estándar	0,18	15.55	0,36	0,33	
Coefficiente de variación (%)	2.85	3.22	0,02	0,67	
Bambú <i>Guadua angustifolia</i> K.	-	455	-	-	Gutiérrez (2015)

Fuente: elaboración propia con datos de Césare (2019).

1.2.3.2 Resistencia térmica.

Medir la resistencia térmica del bambú puede ser un desafío debido a varias razones intrínsecas a la naturaleza y estructura del material, así como a las características de los métodos de medición.

El bambú es un material natural con una composición y estructura que pueden variar significativamente dependiendo de la especie, la edad, el crecimiento, el tratamiento y las condiciones ambientales. Esta variabilidad inherente puede dificultar la estandarización de las pruebas y la obtención de resultados consistentes. Además, el bambú tiene una estructura anisotrópica, lo que significa que sus propiedades pueden variar dependiendo de la dirección en la que se mida. Esto complica la interpretación de los resultados de las pruebas de resistencia térmica, ya que es necesario considerar la orientación de las fibras y la disposición interna del material.

La conductividad térmica del bambú puede cambiar con la humedad, el contenido de azúcares y almidones, y el grado de compactación de las fibras, lo cual puede influir en la resistencia térmica del material y complicar su medición precisa. Los métodos estándar para medir la resistencia térmica pueden no ser directamente aplicables al bambú debido a sus características únicas, y adaptar y desarrollar protocolos de prueba adecuados para este material puede requerir investigación adicional y validación experimental.

1.2.3.3 Color y apariencia.

Una vez sometido a tratamientos específicos para la construcción, el bambú *Guadua angustifolia* experimenta cambios notables en su color y apariencia. El verde intenso original de sus tallos se transforma en tonalidades más cálidas y terrosas, resultado de los procesos de secado y tratamiento termoquímico. Esta modificación cromática indica una reducción en su contenido de humedad y una mejora en su estabilidad dimensional. La superficie de los culmos, anteriormente lisa, puede presentar una textura más uniforme y refinada, evidenciando la compactación y el fortalecimiento de las fibras internas. Esta transformación estética no solo aporta una apariencia más sofisticada y versátil al bambú, sino que también refleja su adaptabilidad a las exigencias técnicas y estéticas de la construcción contemporánea.

1.3 Propiedades constructivas

Las propiedades constructivas son relevantes, ya que determinan el rendimiento de una construcción. Las propiedades de los materiales pueden facilitar o dificultar el proceso constructivo, lo cual se ve reflejado en el costo de la obra. Propiedades como la trabajabilidad resultan de interés al analizar las características de los materiales de construcción. En esta sección se busca ofrecer una idea de cómo se trabaja con los materiales en estudio, con el fin de familiarizarnos mejor con ellos.

Dentro de la categoría de propiedades constructivas se encuentran algunas definiciones comunes que pueden ayudar a contextualizar el tema. A continuación, se definen algunas de estas variables:

Trabajabilidad:

Se refiere a la facilidad con la que un material puede ser manipulado, moldeado y colocado durante el proceso de construcción. Un material con buena trabajabilidad es más fácil de manejar y dar forma, lo que facilita su aplicación en diversas situaciones.

Facilidad de corte y unión:

Indica la capacidad de un material para ser cortado y unido de manera eficiente. La facilidad de corte es importante para adaptar el material a las formas y tamaños deseados, mientras que la buena unión garantiza que las diferentes piezas o secciones se conecten de manera sólida y duradera.

Versatilidad en aplicaciones de construcción:

Hace referencia a la capacidad del material para adaptarse y ser utilizado en una variedad de situaciones y aplicaciones dentro del ámbito de la construcción. La versatilidad permite que el material sea empleado en diferentes contextos y proyectos.

Durabilidad en diferentes condiciones climáticas:

Indica la resistencia del material a los efectos adversos del clima, como la lluvia, la humedad, la exposición al sol, entre otros. Un material duradero es capaz de mantener sus propiedades estructurales y estéticas a lo largo del tiempo, incluso en diversas condiciones climáticas.

1.3.1 Propiedades constructivas del concreto

Como se mencionó anteriormente, en esta sección se estudia la trabajabilidad del concreto, la cual es una cualidad que podría considerarse no cuantitativa; es decir, cualitativa. No obstante, es importante abordarla y analizarla como un factor relevante respecto al uso de este u otros materiales de construcción. También se abordan temas propios del concreto, como el sangrado, el fraguado y su permeabilidad al agua una vez colocado en sitio.

1.3.1.1 Trabajabilidad.

La facilidad para colocar, consolidar y terminar el concreto recién mezclado, así como el grado en que resiste la segregación, se llama trabajabilidad. Las propiedades del concreto relacionadas con la trabajabilidad incluyen la consistencia (fluidez) y la estabilidad (resistencia a la segregación) (Kosmatka, 2011).

El grado de trabajabilidad requerido para la colocación adecuada del concreto está determinado por el método de colocación, el tipo de consolidación y el tipo de concreto. Por ejemplo, Kosmatka (2011, como se citó en Sceszy y Mohler, 2008) señala que el concreto autocompactante posee propiedades únicas de alta trabajabilidad sin pérdida de estabilidad, lo cual permite el uso en formas complejas y en cronogramas de construcción rigurosos. Diferentes tipos de colocación requieren distintos niveles de trabajabilidad, por lo que este se convierte en un tema complejo y específico según cada caso. Sin embargo, siempre existen ciertos factores que deben tomarse en cuenta.

Kosmatka et al. (2011) indican que los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son:

- El método y la duración del transporte.
- La cantidad y características de los materiales cementantes.
- La consistencia del concreto (asentamiento).
- La granulometría, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos.
- El aire atrapado.
- El contenido de agua.
- Las temperaturas del concreto y del aire ambiente.
- Los aditivos.

1.3.1.3 Sangrado.

Tal como comenta Kosmatka (2011), el sangrado es la aparición de una fina capa de agua en la superficie del concreto colado. Esto es normal y se debe a la sedimentación de las partículas sólidas, lo cual causa un flujo externo del agua de la mezcla. Un sangrado excesivo puede generar una alta relación a/c en la superficie, lo que puede producir pérdida de resistencia y constituye un aspecto a tomar en cuenta. Las propiedades de sangrado pueden determinarse según dos métodos descritos en la norma ASTM C232 Standard Test Methods for Bleeding of Concrete (AASHTO T 158); sin embargo, gracias a la calidad de los ingredientes empleados actualmente en el concreto, esto no suele representar un problema.

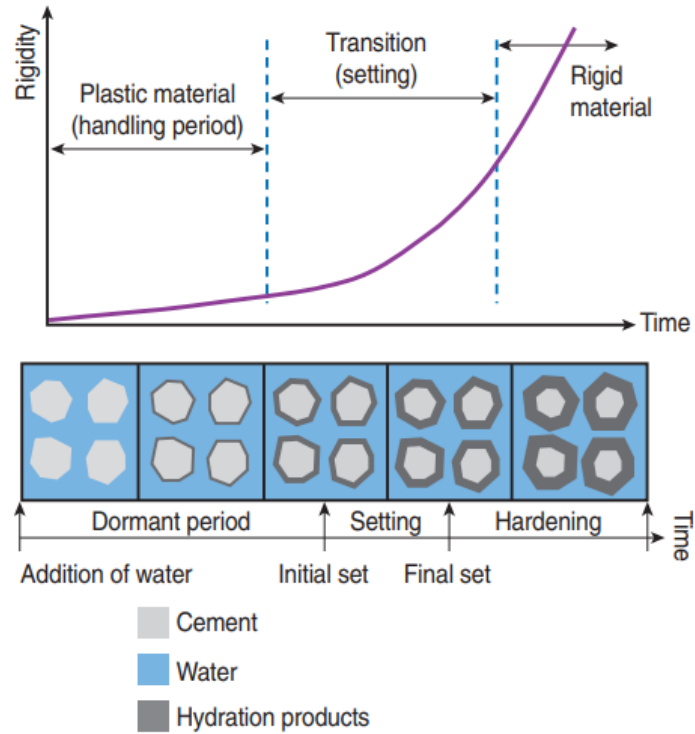
1.3.1.4 Fraguado.

El fraguado del concreto se puede definir como el proceso mediante el cual este pasa de un estado líquido o plástico a un estado sólido, como resultado de una reacción química.

La calidad aglutinante de la pasta de cemento Portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua, llamada hidratación. Los dos silicatos de calcio, que constituyen aproximadamente el 75 % del peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para formar nuevos compuestos: hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado. Este último es, con diferencia, el componente aglutinante más importante en el concreto. Las propiedades de ingeniería del concreto, como el fraguado y endurecimiento, la resistencia y la estabilidad dimensional, dependen principalmente del silicato de calcio hidratado, que es el núcleo del concreto (Kosmatka, 2011).

En la figura 5 se puede observar una gráfica que ilustra la relación entre el tiempo y el aumento de rigidez del concreto durante su proceso de fraguado, en el cual pasa de un estado plástico a uno rígido.

Figura 5. Fraguado del concreto.



Fuente: Kosmatka (2011).

1.3.1.4 Permeabilidad.

El concreto usado comúnmente no es impermeable; sin embargo, para ser utilizado en estructuras que retienen agua o que están expuestas a condiciones climáticas severas, debe tener una baja permeabilidad o ser impermeable al agua. La impermeabilidad es la capacidad del concreto para retener o contener agua sin fugas visibles. La permeabilidad se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua está bajo presión, o a la capacidad del concreto para resistir la penetración del agua u otras sustancias (líquidas, gaseosas o iónicas). La permeabilidad del concreto maduro y de buena calidad es, aproximadamente, de 1×10^{-10} cm/s (Kosmatka, 2011).

1.3.2 Propiedades constructivas de la madera

Al igual que en el concreto, las propiedades constructivas de la madera también son relevantes y se adecuan al tipo de material. Por ello, en el caso de la madera se consideran aspectos como su trabajabilidad, las uniones entre elementos, los tratamientos, la durabilidad y su permeabilidad.

1.3.2.1 Trabajabilidad.

La trabajabilidad de la madera se refiere a su capacidad para ser manipulada y conformada mediante herramientas y procesos de fabricación, o, como lo define Forest Products Laboratory (2010), al grado de facilidad y suavidad de corte que se puede obtener con herramientas manuales o máquinas.

La madera es conocida por ser relativamente fácil de trabajar, y, en especial, la madera de *Tectona grandis* es de amplio uso y tiene un gran mercado a nivel internacional debido a su gran durabilidad, belleza, buenas propiedades de trabajabilidad y excelentes propiedades físicas y mecánicas (Rivero, 2006, citando a Bhat, 2000). Esto permite dar forma a vigas, cortar piezas en ángulos específicos y crear uniones complejas. Su textura uniforme y su capacidad para aceptar clavos, tornillos y adhesivos la hacen ideal para una amplia variedad de aplicaciones de construcción.

En un estudio realizado en Costa Rica en 2008, en dos plantaciones de *Tectona grandis* de 11 años, los autores evaluaron la trabajabilidad de esta madera mediante ensayos que incluyeron cepillado, lijado, taladrado y torneado. Se utilizó la norma ASTM-D-1666-87, con modificaciones para ensayos con maderas tropicales, conocida como "Norma de trabajabilidad del Acuerdo de Cartagena". En general, la teca evaluada se consideró de fácil a moderadamente fácil de cepillar; de fácil a moderadamente fácil de desbastar en lijado; con características regulares a buenas en taladrado, y de buenas a muy buenas en propiedades de torneado (Serrano, 2008).

Figura 6. Vigas curvas echas con madera.



Fuente: Empresa Grupo Xilo.

En la figura 6 se observan unas vigas de techo a las cuales se les ha dado una curvatura muy pronunciada. Esto constituye un ejemplo de la maleabilidad que se puede lograr con la madera mediante procesos adecuados, como el curvado en vapor, el curvado en seco o el laminado en capas.

1.3.2.2 Uniones.

La madera se presta bien a una variedad de técnicas de unión que permiten conectar múltiples elementos de madera entre sí para formar estructuras más grandes y complejas. En Coto (2015), se explica cómo, en el CSCR, se definen tres tipos de conexiones para la madera:

- Articuladas: Aquellas articulaciones que solo transmiten fuerzas axiales y de cortante y de poca capacidad para transmitir momentos flexores.
- Rígidas: Estas transmiten fuerzas axiales, de cortante y momentos flectores, indicando que no son capaces de deformarse después de alcanzar su capacidad elástica.
- Semirrígidas: Estas son similares a las anteriores, pero con la diferencia que deben deformarse después de alcanzar su capacidad elástica

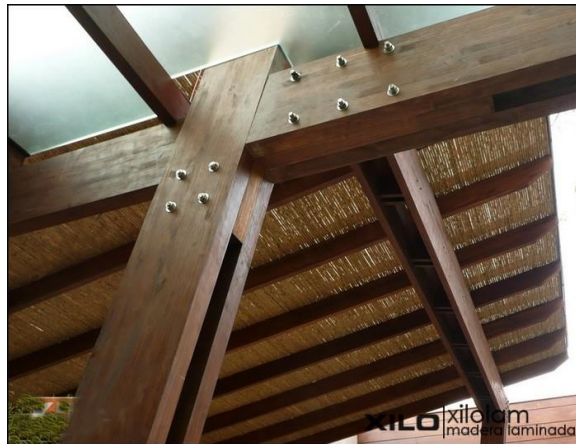
Algunas de las técnicas de unión comunes incluyen el uso de clavos y estacas, grapas, pernos, tornillos para madera, juntas de conexión y soportes de vigas. Estas uniones proporcionan resistencia mecánica y estabilidad estructural a las construcciones de madera; sin embargo, no todas son adecuadas para elementos estructurales, por lo cual, a continuación, se describen algunos de los métodos adecuados según lo indicado por Forest Products Laboratory (2010).

Pernos de ensamble

Un perno de ensamble (o pasador de ensamble) es un largo pasador de hierro o acero, con o sin cabeza o punta. Se introduce en un agujero perforado a través de una pieza de madera y en una adyacente, con el fin de evitar la separación de las piezas conectadas y transmitir la carga lateral. El agujero en la segunda pieza se perfora lo suficientemente profundo como para evitar que el pasador golpee el fondo.

La resistencia de apoyo de la madera bajo pernos se ve considerablemente afectada por el tamaño y el tipo de agujeros en los que se insertan los pernos. Un agujero demasiado grande provoca un apoyo no uniforme del perno; si es demasiado pequeño, la madera se dividirá al introducir el perno. Normalmente, los pernos deben ajustarse de modo que puedan insertarse golpeando ligeramente con un mazo de madera. En la figura 7 se observa un ejemplo de unión con pernos, la cual presenta un diseño arquitectónico muy llamativo que transmite rigidez y estabilidad.

Figura 7. Unión atornillada en viga-columna de madera.



Fuente: Empresa Grupo Xilo.

Juntas de conexión

Se han ideado varios tipos de conectores que aumentan las áreas de apoyo y corte de las juntas mediante el uso de anillos o placas alrededor de los pernos que sujetan las piezas de la junta. Las partes principales de carga de estas juntas son los conectores; los pernos, generalmente, sirven para evitar la separación transversal de las piezas, pero también contribuyen con cierta capacidad de carga.

La resistencia de la junta de conexión depende del tipo y tamaño del conector, la especie de madera, el grosor y el ancho del miembro, la distancia del conector desde el extremo del miembro, el espaciado de

los conectores, la dirección de aplicación de la carga con respecto a la dirección de la veta de la madera y otros factores.

Conectores de placa metálica

Los conectores de placas metálicas, comúnmente llamados placas de armadura, se han convertido en un medio popular de unión, especialmente en armaduras y vigas en celosía. Estos conectores transmiten cargas mediante dientes, tapones o clavos, que varían de un fabricante a otro. Las placas suelen estar hechas de acero galvanizado de calibre ligero y tienen un área y forma necesarias para transmitir las fuerzas en la junta. La instalación de las placas suele requerir una prensa hidráulica u otro equipo pesado, aunque algunas placas se pueden instalar a mano.

Soportes para vigas

Los soportes para vigas se han convertido en un medio popular para unir vigas de madera a vigas de cabecera o columnas. Los soportes suelen estar hechos de acero galvanizado de calibre ligero o soldados a partir de acero laminado con la forma y configuración necesarias para transmitir fuerzas a través de la junta. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de este tipo de soportes en entresijos hechos con madera.

Figura 8. Soportes típicos para viga de madera.



Fuente: Forest Products Laboratory (2010).

Hundimiento de cabeza de sujetador

La resistencia al aplastamiento de la madera bajo las cabezas de los sujetadores es importante en aplicaciones como el anclaje del armazón del edificio a las estructuras de cimentación. Cuando la presión tiende a separar el miembro de enmarcado de la cimentación, las cargas de sujeción podrían causar la falla a tracción de los sujetadores, la extracción de los sujetadores del miembro de enmarcado o el hundimiento de las cabezas de los sujetadores en el miembro. Incluso la cabeza del sujetador podría ser arrastrada completamente a través del materia.

1.3.2.3 Tratamientos y durabilidad.

Muchas especies de madera comúnmente utilizadas, incluyendo la *Tectona grandis*, pueden deteriorarse si están expuestas a condiciones que favorecen el crecimiento de organismos que degradan la madera.

Los productos de madera pueden protegerse del ataque de hongos de pudrición, insectos nocivos o perforadores marinos mediante la aplicación de conservantes químicos. Los tratamientos conservantes aumentan en gran medida la vida útil de las estructuras de madera, lo que reduce los costos de reemplazo y permite un uso más eficiente de los recursos forestales. Al considerar los procesos de tratamiento conservante y las especies de madera, la combinación debe proporcionar la protección requerida para las condiciones de exposición y la vida útil de la estructura (Forest Products Laboratory, 2010).

La madera de teca, considerada como una madera difícil de tratar con inmunizantes, responde mejor al tratamiento con sulfato de cobre al 6 %, seguido por bórax al 7 %, en inmersiones de tres días y periodos de difusión de tres semanas (FONAFIFO, 2003).

Otra técnica que puede emplearse es el tratamiento térmico. Fallas (2015) realizó un estudio con madera de teca procedente de la zona norte del país, en el cual indica que, a partir de los resultados obtenidos, se concluye que la madera termotratada presenta mayor resistencia conforme aumenta la temperatura de tratamiento, mejorando, además, las propiedades de resistencia mecánica de la madera en las especies forestales estudiadas. Asimismo, la temperatura de termotratamiento a los 200 °C es la que presenta mejores resultados en cuanto a propiedades mecánicas y resistencia contra la degradación de los agentes abióticos para ambas especies. En el caso de la *Tectona grandis*, esta es una buena opción, ya que otros métodos que implican absorción de químicos son difíciles de aplicar.

1.3.2.4 Permeabilidad.

A pesar de que la teca se considera como una madera poco absorbente, en parte porque su albura también tiene baja permeabilidad (FONAFIFO, 2003), la madera, por naturaleza, es un material con cierto grado de absorción de la humedad del ambiente en forma de vapor de agua presente en el aire. Sin embargo, incluso con un tratamiento de calidad, la madera no es un material que se recomiende utilizar en condiciones de alta humedad, como podría ser la exposición al agua de lluvia o a aguas subterráneas, en el caso de estar empotrada por debajo del nivel del suelo. El contenido de humedad de la madera estructural C.H. suele rondar el 18 %, y esto, en general, no presenta un problema ni una disconformidad en su uso.

1.3.3 Propiedades constructivas del bambú

Para el bambú, un material natural renovable y de rápido crecimiento al alcanzar edad óptima entre tres y cinco años, se puede considerar que la guadua está lista para su uso en la construcción (Barreto 2018). Las propiedades relacionadas con su trabajabilidad, uniones, tratamientos y flexibilidad difieren en comparación con la madera. A continuación, se abordan estos aspectos específicos:

1.3.3.1 Trabajabilidad.

El uso del bambú es apto para casi la totalidad de las partes de una estructura. Al tratarse de un material natural de origen biológico puede presentar problemas en lo referente a la durabilidad si no se adoptan ciertas medidas. Al igual que la madera, es deseable evitar el contacto directo con el agua. Si es posible, se debe aislar las partes de bambú del suelo para evitar humedades y el ataque tanto de insectos como de hongos. Por último, se recomienda evitar la exposición directa a la radiación solar, aunque sus repercusiones no son tan importantes como las del agua (Martínez 2015).

1.3.3.2 Uniones.

Las uniones de bambú pueden lograrse mediante varias técnicas, como ataduras, clavado, pegado o empalme. Las técnicas tradicionales de unión de bambú, como el atado con cuerdas o el uso de adhesivos naturales, han sido utilizadas durante siglos en la construcción de estructuras de bambú. Además, la flexibilidad natural del bambú permite la creación de uniones curvas y formas estructurales únicas.

El planteamiento general para el diseño de conexiones debe tener como referente evitar al máximo la presencia de esfuerzos que provoquen la rajadura en las piezas de bambú. También se hace hincapié en la simplificación de las uniones para lograr los objetivos que se plantean, atendiendo principalmente a la arquitectura con estructuras ligeras (Martínez 2015). A continuación, en la figura 9, se presenta un ejemplo de una unión cónica con esfera, la cual conecta ocho elementos estructurales de bambú en lo que podría ser la una estructura de techo. Esto es un ejemplo de uniones que ofrece la construcción con bambú; sin embargo, cabe destacar que el bambú por sus propiedades anisotrópicas puede resultar un material complicado realizar uniones.

Figura 9. Unión cónica con esfera.



Fuente: Martínez (2015).

1.3.3.3 Tratamientos y durabilidad.

El bambú puede someterse a diferentes tipos de tratamientos para mejorar su durabilidad y resistencia a la degradación. Estos tratamientos pueden incluir procesos de secado, tratamiento térmico, inmunización contra insectos y hongos, y la aplicación de recubrimientos protectores. Según Barreto (2018, citando a Montoya 2008), las técnicas para preservar el bambú se dividen en dos grupos, sin productos químicos agregados y tratamientos químicos.

También menciona que, para generar buenas condiciones en la utilización de la *Guadua* y mejorar la aplicación de preservantes, reducir el peso de las piezas y hacerlas más fácil en su manipulación y -a su vez- reducir el ataque de hongos e insectos, es necesario disminuir el contenido de humedad de los tallos al menos hasta alcanzar un 10 % o un 15 %. El secado de este material se puede hacer por secado natural o artificial. En la figura 10 se muestra un grupo de columnas de bambú en su proceso de secado al aire libre.

Figura 10. Secado natural del bambú.



Fuente: Barreto (2018).

1.4 Propiedades mecánicas

Como bien lo define Bermejo (2010), las propiedades mecánicas son características que determinan el comportamiento del material cuando se sujeta a esfuerzos mecánicos. Existen distintos tipos de propiedades mecánicas y estas son fundamentales para comprender cómo un material responderá a diferentes condiciones de carga.

Algunas de las propiedades mecánicas más relevantes de los materiales dentro del ámbito constructivo son referentes a su resistencia bajo ciertos tipos de carga o propiedades referentes a su composición y comportamiento ante la aplicación de fuerzas en estos. A continuación, se definen algunas de estas para introducir en el contexto de las propiedades mecánicas:

1. Resistencia a la compresión:

La resistencia a la compresión es la capacidad de un material para resistir fuerzas que tienden a comprimirlo; es decir, reducir su volumen.

2. Resistencia a la tensión:

La resistencia a la tensión es la capacidad de un material para resistir fuerzas que tienden a estirarlo o alargarlo.

3. Resistencia al cortante:

La resistencia al cortante se refiere a la capacidad de un material para resistir fuerzas que actúan en planos paralelos a su superficie, causando deslizamiento interno.

4. Módulo de elasticidad:

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, es una medida de la rigidez de un material. Representa la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante dentro del rango elástico del material. En ingeniería civil, este parámetro es importante para predecir el comportamiento de materiales como el acero o el concreto bajo cargas de deformación.

5. Densidad:

La densidad es una propiedad física que indica la cantidad de masa por unidad de volumen de un material. En ingeniería civil, la densidad es relevante para calcular la carga que puede soportar un material, así como para diseñar estructuras y determinar la estabilidad de los suelos.

1.4.1 Propiedades mecánicas del concreto

Para el caso del concreto, el CSCR (2010) indica que “los elementos estructurales de concreto reforzado deben cumplir con las especificaciones del Comité 318 del American Concrete Institute (código ACI 318-08), excepto en lo referente a su capítulo 'Estructuras sismorresistentes' que es sustituido por este capítulo” (p. 8/1).

En la realidad, el concreto en estructuras civiles es utilizado en conjunto con núcleos de acero (concreto armado), que les aportan resistencia a esfuerzos para los cuales el concreto no ofrece casi ningún tipo de resistencia por sí mismo, como podrían ser esfuerzos de tensión y torsión. Esta unión entre el concreto y el acero representa un material compuesto cuyas propiedades pueden variar mucho, dependiendo de diversos factores. Sin embargo, para efectos de este estudio, se analiza el concreto sin acero como un material “homogéneo”, para compararlo desde una primera aproximación con la madera y el bambú respecto a su capacidad mecánica frente a los esfuerzos de compresión.

Según Kosmatka (2011, p. 137), el concreto es un material que tiene gran capacidad para resistir la compresión, pero es muy deficiente al momento de resistir esfuerzos de tensión, siendo este valor cercano a una décima parte de su capacidad en compresión. Esto también se refleja en una baja capacidad para soportar otro tipo de esfuerzos. Por ello, para efectos del estudio mecánico, se centrará en el esfuerzo en compresión con el fin de comparar los distintos materiales, tomando en cuenta que la madera y el bambú también presentan valores de resistencia a la compresión competentes, según se verá más adelante, lo cual permite hacer una comparación objetiva desde el punto de vista mecánico.

1.4.1.1 Resistencia a la compresión del concreto.

El concreto es un material ampliamente utilizado en la construcción debido a su alta resistencia a la compresión. Esta característica se debe principalmente a la presencia de agregados pétreos y cemento en su composición, los cuales proporcionan una estructura interna robusta, capaz de soportar grandes cargas cuando se somete a fuerzas compresivas.

El concreto, al ser una mezcla compuesta por varios materiales, presenta una amplia variedad en su composición y tipos, lo que le confiere diferentes propiedades y características según su formulación. Los componentes principales del concreto son el cemento, los agregados (como la arena y la grava), el agua y, en ocasiones, aditivos químicos. Cada uno de estos componentes puede variar en tipo, calidad y proporción, lo que influye directamente en las propiedades finales del concreto.

Dentro de las múltiples variables que afectan la resistencia y calidad del concreto, una de las relaciones más determinantes es la relación agua-cemento (a/c). Esta relación se define como la proporción de agua respecto al cemento utilizado en la mezcla. La relación agua-cemento es importante porque tiene un impacto directo en la trabajabilidad, resistencia, durabilidad y porosidad del concreto.

Una relación agua-cemento baja (por ejemplo, 0,4 o menos) conduce, generalmente, a un concreto de mayor resistencia y durabilidad. Al reducir la cantidad de agua en la mezcla, se disminuye la porosidad del concreto y se incrementa su densidad, lo que resulta en una mayor resistencia a la compresión y una menor permeabilidad. No obstante, una mezcla con una relación agua-cemento muy baja puede ser más difícil de manipular y colocar, lo que puede afectar la calidad y uniformidad del concreto durante su proceso de fabricación y colocación.

Por otro lado, una relación agua-cemento alta (por ejemplo, 0,5 o más) mejora la trabajabilidad del concreto, facilitando su mezclado, colocación y compactación. Sin embargo, un concreto con una relación agua-cemento elevada tiende a ser más poroso y menos resistente, lo que puede comprometer su durabilidad y resistencia a largo plazo, especialmente en condiciones de exposición a agentes agresivos como el agua, los sulfatos o el dióxido de carbono.

Es de suma importancia seleccionar una relación agua-cemento adecuada que equilibre la trabajabilidad del concreto con sus propiedades mecánicas y su durabilidad para cada aplicación específica. La elección de la relación agua-cemento debe tener en cuenta factores como las condiciones ambientales, el tipo y calidad de los materiales utilizados, las características del cemento y los requisitos de resistencia y durabilidad del proyecto de construcción. Un correcto control y ajuste de la relación agua-cemento es esencial para garantizar la calidad, el rendimiento y la longevidad del concreto en las estructuras de construcción.

En el siguiente cuadro, Guevara et al. (2012) da un ejemplo de las diferentes resistencias que puede alcanzar el cemento con distintas relaciones agua-cemento.

CUADRO 5. INFLUENCIA RELACIÓN AGUA/CEMENTO EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO.	
A/C	f'c (kg/cm²)
0,36	420
0,40	370
0,45	340
0,50	295
0,55	275
0,60	230
0,65	220
0,70	185
0,75	165
0,80	140

Fuente: Guevara et al. (2012).

La resistencia del concreto, que, a pesar de estar compuesto también por arena y piedra, dependerá finalmente en gran medida de esta relación agua-cemento. En el siguiente cuadro, Guevara et al. (2012) muestra cómo varía la resistencia según esta relación agua-cemento. Es importante recalcar que se utilizó una proporción de cemento y agregados de 1-2-3, es decir, una parte de cemento por dos partes de arena y tres partes de piedra, lo cual constituye una de las proporciones más comúnmente utilizadas en la construcción de obra civil.

CUADRO 6. RESISTENCIA Y REVENIMIENTO DEL CONCRETO BAJO DISTINTAS RELACIONES A/C.						
Relación a/c	Cemento (kg)	Arena (kg)	Piedra (kg)	Agua (L)	Revenimiento (cm)	Resistencia (kg/cm²)
0,55	5	10	15	2,75	0	153,8
0,60	5	10	15	3,00	2	149,3
0,65	5	10	15	3,25	2,5	136,9
0,70	5	10	15	3,50	4,5	122,4
0,75	5	10	15	3,75	13	104,4
0,80	5	10	15	4,00	16	73,6
0,85	5	10	15	4,25	21	60,5

Fuente: Guevara et al. (2012).

En el CSCR (2010) se define que, para el país, la resistencia mínima especificada del concreto en compresión, como material a ser utilizado en el concreto armado, debe ser de 210 kg/cm². Para efectos de

este trabajo, se tomará este valor como punto de referencia para la comparación con los demás materiales en estudio. Si se toma en cuenta que, en los elementos de concreto armado, el acero suele soportar los esfuerzos de tensión y el concreto los esfuerzos de compresión, se puede asumir que, en ese escenario, la resistencia mínima especificada debe ser suficiente para aquellos casos en que todo el esfuerzo de compresión del elemento lo soporta el concreto.

En el diseño de elementos de concreto armado, según el Código ACI 318-08, se aplica la filosofía LRFD, en la cual se introducen factores de reducción a la resistencia del elemento en diseño como medida de seguridad. Sin embargo, como en este caso se estará analizando el concreto como material, no resulta adecuado aplicar dicho factor de reducción a su resistencia mínima requerida en compresión.

Figura 11. Requisito básico para el diseño por resistencia.

Resistencia de diseño \geq Resistencia requerida

$$\phi \text{ (Resistencia nominal)} \geq U$$

Fuente: ACI 318-08 (2008, p. 121).

Como se observa en la ecuación de la figura 11, en el CSCR se muestran los factores de reducción de resistencia (ϕ), el cual, para secciones controladas por compresión -como podría ser una columna-, normalmente corresponde a un valor de 0,65, como se observa a continuación (CSCR, 2010).

1.4.1.2 Otras capacidades del concreto.

En un estudio realizado por Moreno (2016), se reportan valores de resistencia a la compresión, a la tensión y a la flexión de tres mezclas de concreto con distintos agregados (A, B, C), según su trituradora de procedencia. Para cada tipo de agregado se realizaron pruebas con distintas relaciones agua-cemento.

Los resultados obtenidos por Moreno son los siguientes. Los datos mostrados en el cuadro 7 evidencian la escasa resistencia que posee el concreto cuando no está sometido a compresión. Por ello, estos datos son representativos, pero no serán utilizados en la sección de análisis y resultados.

CUADRO 7. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, TENSIÓN Y FLEXIÓN DEL CONCRETO A LOS 28 DÍAS.				
Trituradora	Relación a/c	f_c prom. (kg/cm²)	f_t prom. (kg/cm²)	f_f porm. (kg/cm²)
A	0,4	401,5	31,3	38,7
	0,6	228,2	29,0	39,6
	0,8	170,7	22,7	32,4
B	0,4	407,2	37,1	50,8
	0,6	295,7	32,9	46,1
	0,8	208,0	28,4	36,5
C	0,4	289,0	33,4	45,3
	0,6	246,0	31,7	39,8
	0,8	143,4	20,6	27,1

Fuente: Moreno (2016).

1.4.2 Propiedades mecánicas de la madera

La reputación de la teca se debe a su madera de excelente calidad, derivada de sus propiedades: fuerte, liviana, durable, con estabilidad dimensional; no se corroe en contacto con metales; presenta buena trabajabilidad y dureza; es resistente a las termitas, a los productos químicos, a los hongos y al intemperismo (Jiménez et al., 2020, citando a Keogh, 2013).

El CSCR, en su capítulo 11, define los lineamientos a seguir cuando se pretenda construir empleando madera aserrada estructural. Entre otras cosas, define los tamaños estándar nominales y mínimos para madera aserrada, basándose en normativas de la NDS y FPL, tal como se observa en el siguiente cuadro.

Figura 12. Tamaños nominales y mínimos para madera aserrada.

Tipo de sección	Espesor			Ancho		
	Nominal [pulgadas]	Mínimo cepillada [cm]		Nominal [pulgadas]	Mínimo cepillada [cm]	
		Seca	Verde		Seca	Verde
<i>Tablas</i>	3/4	1.6	1.7	2	3.8	4.0
	1	1.9	2.0	3	6.4	6.5
	1-1/4	2.5	2.6	4	8.9	9.0
	1-1/2	3.2	3.3	5	11.4	11.7
				6	14.0	14.3
				7	16.5	16.8
				8	18.4	19.0
				9	21.0	21.6
				10	23.5	24.1
				11	26.0	26.7
				12	28.6	29.2
				14	33.7	34.3
			16	38.7	39.4	
<i>Estructural</i>	2	3.8	4.0	2	3.8	4.0
	2-1/2	5.1	5.2	3	6.4	6.5
	3	6.4	6.5	4	8.9	9.0
	3-1/2	7.6	7.8	5	11.4	11.7
	4	8.9	9.0	6	14.0	14.3
	4-1/2	10.2	10.3	8	18.4	19.0
				10	23.5	24.1
				12	28.6	29.2
			14	33.7	34.3	
			16	38.7	39.4	
<i>Grandes dimensiones</i>	≥ 5	- 1.3 cm	- 1.3 cm	≥ 5	- 1.3 cm	- 1.3 cm

Fuente: CSCR (2010).

Aunque en el CSCR no se define una capacidad mínima en compresión para la madera, sí determina que el diseño de elementos o sistemas estructurales contruidos con madera o productos elaborados con madera debe hacerse mediante el método de factores de carga y resistencia (LRFD), y se deben satisfacer los requisitos estipulados para el diseño de estructuras de madera de la ANSI / AF&PA – National Design Specification for Wood Construction ASD / LRFD.

Dentro de la filosofía de diseño LRFD, el CSCR indica que se debe cumplir la siguiente condición en el diseño de estructuras de madera estructural:

$$R_u \leq \lambda \Phi_n R'_n \text{ (Ecuación 03)}$$

Donde: R_u = Carga última según las combinaciones de carga (capítulo 6 del CSCR).

λ = Factor de duración de la carga para diseño LRFD de maderas.

Φ_n = factor de resistencia de acuerdo con la tabla 11.1.

R'_n = Resistencia nominal ajustada.

En el método LRFD, la resistencia nominal ajustada es la resistencia de diseño de un miembro estructural de madera, que se calcula utilizando una resistencia nominal básica ajustada por factores de carga y resistencia. Estos factores tienen en cuenta las variaciones en las cargas aplicadas y en las propiedades de los materiales

Figura 13. Factores de resistencia para diseño LRFD de maderas.

Propiedad	Factor de resistencia
Flexión (ϕ_b)	0.85
Compresión paralela y perpendicular (ϕ_c)	0.90
Cortante y tracción radial (ϕ_v)	0.75
Tracción (ϕ_t)	0.80
Estabilidad (ϕ_s)	0.85
Conexiones (ϕ_j)	0.65

Fuente: CSCR (2010).

En la figura anterior se puede ver cómo, según el método de diseño determinado por el CSCR (LRFD), desde un inicio se aplica un factor de reducción de la resistencia en compresión de la madera de 0,90.

Al igual que con el concreto, el diseño estructural que emplea madera tiene muchos factores a considerar, como, por ejemplo, el sentido de aplicación de la carga según la dirección del grano de la madera y otros factores de reducción que son circunstanciales y específicos de cada caso. En este sentido, se

complica hacer una comparación entre los materiales en estudio si se consideran todas estas variables, por lo que se hace mención de estos métodos de diseño. Sin embargo, para efectos de la comparación de materiales, se tomará la resistencia última reportada en las investigaciones y códigos consultados para cada material.

En la siguiente figura se presentan los valores reportados para la madera de teca por Quesada (2010). De aquí se pueden extraer los siguientes datos:

- Resistencia a la compresión de 491 kg/cm².
- Resistencia al cortante: 123 kg/cm².
- Módulo de ruptura en tensión: 991 kg/cm².

Figura 14. Propiedades mecánicas de madera *Tectona grandis* (Teca).

Teca	<i>Tectona grandis</i>	Condición Verde						
		MOR=767 kg/cm ²	MOE=100 000 kg/cm ²	F _C =346 kg/cm ²	-	F _V =102 kg/cm ²	-	Dureza axial= 587 kg Dureza lateral= 661 kg
		Condición Seca						
		MOR=991 kg/cm ²	MOE=112 000 kg/cm ²	F _C =491 kg/cm ²	CV (12 %)	F _V =123 kg/cm ²	-	Dureza axial= 543 kg Dureza lateral= 600 kg

CV: Coeficiente de variación del promedio, **F_C:** Resistencia en compresión, **F_T:** Resistencia en Cortante, **F_V:** Resistencia en Cortante, **MOE:** Módulo de elasticidad, **MOR:** Módulo ruptura en flexión, **PEB:** Peso específico.

Fuente: Quesada (2010, p. 40, citando a Tuk, 2007).

Por otro lado, se tienen también los valores reportados por Rivero (2006). Este autor presenta valores para resistencia, no solo a la compresión, sino también para flexión y cortante, los cuales se pueden ver en la siguiente figura. Estos valores son tomados en cuenta en la sección de resultados para su posterior análisis y comparación.

Figura 15. Propiedades mecánicas de la *Tectona grandis*.

Propiedad	Unidad ¹	Prom.	Máx.	Mín.	Coef. de variación (%)	Clasific. ²
Flexión estática	MOR (kg/cm ²)	963.60	1150.00	783.45	14.38	Medio
	MOE x100 (kg/cm ²)	105313.2	123069	77346.41	17.64	Bajo
Compresión paralela al grano	MOR (kg/cm ²)	460.59	494.37	429.72	5.44	Alta
Compresión perpendicular al grano	ELP (kg/cm ²)	70.92	97.86	55.34	25.07	Mediana
Dureza	Axial (kg)	415.16	476.28	335.66	15.32	Blanda
	Perpendicular (kg)	357.60	447.93	267.62	19.80	Muy blanda
Resistencia al cizallaje	Tangencial (kg/cm ²)	125.15	144.93	101.71	15.92	Alta
	Radial (kg/cm ²)	122.65	125.05	117.65	2.53	Alta
Extracción de clavos	Axial (kg)	58.00	70.00	50.00	14.43	Alta
	Perpendicular (kg)	54.00	61.25	47.50	12.18	Alta

¹ MOR: Módulo de ruptura; MOE: Módulo de elasticidad; ELP: Esfuerzo en el límite proporcional.

² La clasificación es efectuada con el valor de la media de cada ensayo realizado, según las tablas propuestas por Gutiérrez y Silva (1999) para la flexión estática; Vargas, (1987) en compresión paralela y perpendicular al grano y resistencia al cizallaje; Kollman y Côté (1968) en dureza y NZFRI (s.f.) en la extracción de clavos.

* Sin clasificación.

** Número adimensional.

Fuente: Rivero (2006).

1.4.3 Propiedades mecánicas del bambú

Desde el punto de vista mecánico, frente a requerimientos energéticos, constructivos, de resistencia y rigidez por unidad de área, facilidad y seguridad de uso, etc., el bambú puede compararse de manera favorable con materiales de uso común como el hormigón, el acero y la madera (Martínez, 2015).

1.4.3.1 Resistencia a la compresión del bambú.

Tal como lo indica Takeuchi y Emilio (2007), para el bambú *Guadua angustifolia*, el valor promedio de resistencia a la compresión paralela a la fibra fue de 56 MPa, y el valor promedio del módulo de elasticidad de la *Guadua angustifolia* ensayada fue de 17.859 MPa. A pesar de su elevado módulo de elasticidad, el bambú tiende a ser un material con gran flexibilidad.

Takeuchi y Emilio realizaron el estudio en Colombia, haciendo pruebas a probetas elaboradas con culmos de bambú de *Guadua angustifolia* extraída de diferentes fincas a altitudes de entre 1227 y 1250 msnm. En total, se utilizaron unas 809 probetas de cada una de las fincas.

Para los ensayos de masa por volumen, contenido de humedad, compresión paralela a la fibra y módulo de elasticidad, se utilizaron deformímetros electrónicos siguiendo los procedimientos descritos en las normas ISO 22157 (International Standard, 2004) e ISO N315 (ISO N315, 1999).

Figura 16. Probeta a compresión con deformímetro. Bambú *Guadua angustifolia*.



Fuente: Ilha et al (2019).

En la figura anterior se observa el deformímetro utilizado para ensayar las probetas de bambú. Como se observa, es un procedimiento muy similar al del concreto, al tratarse en ambos casos de probetas cilíndricas a las que se les aplica una carga axial que genera esfuerzos de compresión. A continuación, en las figuras 17 y 18, se muestran los resultados obtenidos por Takeuchi y Emilio (2007), tanto para los valores de resistencia a la compresión como para los de módulo de elasticidad.

Figura 17. Resistencia a compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* para diferentes procedencias (MPa).

Parámetro	Finca				
	El Bambusal	Nápoles	Los Ángeles	Playa Rica	Total
Número de muestras	222	225	160	202	809
$\sigma_{\text{Mínimo}}$	29.45	34.00	30.11	33.86	29.45
$\sigma_{\text{Máximo}}$	82.23	92.27	81.74	118.79	118.79
σ_{Promedio}	58.52	59.43	56.29	51.57	56.21
Desviación Estándar	10.89	8.63	10.40	8.63	10.16
σ_k	37.76	44.42	39.14	39.86	40.42
σ_{adm} (Carga muerta)	8.39	9.87	8.70	8.86	8.98
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva)	10.49	12.34	10.87	11.07	11.23
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva + viento)	12.59	14.81	13.05	13.29	13.47

Fuente: Tekuchi y Emilio (2007, pag. 97).

Figura 18. Módulo de elasticidad de *Guadua angustifolia* para diferentes procedencias (MPa).

Parámetro	Finca				
	El Bambusal	Nápoles	Los Ángeles	Playa Rica	Total
Número de muestras	146	118	88	127	479
$E_{\text{Mínimo}}$	9,434	9,517	4,242	6,878	4,242
$E_{\text{Máximo}}$	33,479	27,556	49,551	146,336	146,336
E_{Promedio}	19,519	18,532	15,531	16,662	17,859
Desviación estándar	4,163	3,216	5,679	12,425	7,528

Fuente: Tekuchi y Emilio (2007, p. 99).

1.4.3.2 Resistencia a la tensión del bambú.

Para los valores de resistencia a la tensión, Ciro et al. (2005) presentan un informe en el cual se ha determinado el valor de resistencia a la tensión propia y los de distintos autores, obteniendo entre todos estos un promedio de 103,81 MPa (ver figura 19). El estudio de Ciro también fue realizado en Colombia, en plantaciones con una altura aproximada de 1600 msnm, temperatura de 20 °C y humedad relativa del 67 %. Estos datos se pueden ver reportados por el autor en las figuras 21 y 22.

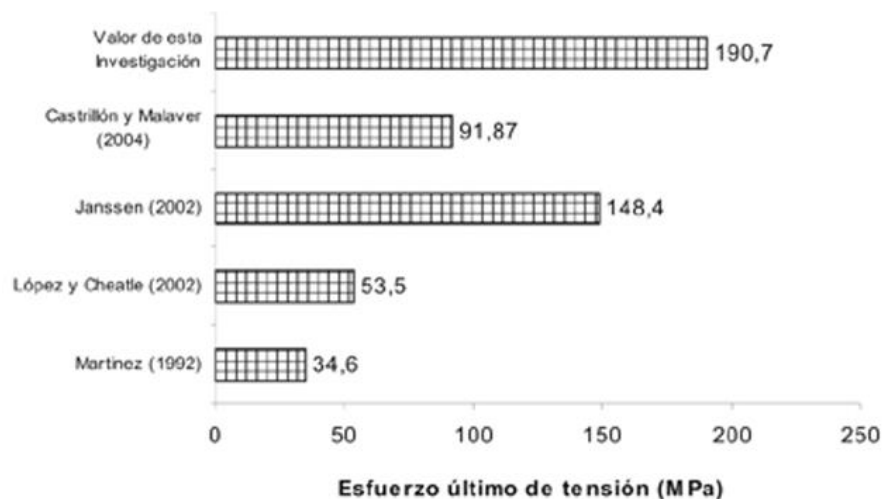
El material seleccionado fue secado naturalmente hasta alcanzar contenidos de humedad en base seca menores del 20 %, determinado por la norma S358.2 dada por la ASAE (American Society of Agricultural Engineers, 1990). Las medidas para los ensayos de cizalladura se realizaron según la norma ISO TC-165 del INBAR (1999). Los esfuerzos a tensión paralela al grano fueron determinados según las normas ASTM 143-94 e ISO TC-165 del INBAR (1999).

Figura 19. Esfuerzo último para elementos de *Guadua* sometidos a tensión paralela al grano.

PARÁMETRO	Promedio (MPa)	Intervalos de confianza al 95 % (MPa)		Coeficiente de variación (%)
		Límite inferior	Límite Superior	
Esfuerzo último (σ_{ult})	190,70	152,3	229,10	34

Fuente: Ciro et al. (2005).

Figura 20. Valores de resistencia a la tensión paralela al grano de *Guadua angustifolia k.*



Fuente: Ciro et al. (2005).

La variabilidad de la resistencia mecánica de la *Guadua* disponible hasta el momento (figura 20) puede deberse a los parámetros de operación del ensayo y a las características intrínsecas del material, ya que el material vegetal puede variar anatómica y estructuralmente dependiendo de la región en la cual se encuentre cultivado. Además, la resistencia de los elementos varía de manera inversamente proporcional desde la cepa hacia la parte basal del culmo, dependiendo de la zona del culmo donde se hayan tomado las muestras y del contenido de humedad de estas (Ciro et al., 2005).

1.4.3.3 Resistencia al cortante del bambú.

Para el valor de resistencia al cortante del bambú *Guadua angustifolia*, el promedio obtenido con los datos propuestos por Ciro (2005) es de 6,20 MPa. Esto según los datos de la figura 21.

Figura 21. Resistencia de elementos de *Guadua* sometidos a cortante.

Investigador	σ_{ult} (MPa)	% de variación con respecto a la investigación actual
Díaz y González (1992)	7,74	39,7
Martínez (1992)	4,70	15,1
López y Cheatle (2002)	6,87	23,3
Janssen (2002).	4,50	20,7
Castrillón y Malaver (2004)	7,84	40,7
Investigación actual	5,57	0

Fuente: Ciro et al., 2005.

En los resultados de la figura anterior, se observa que la mayor diferencia con respecto a la investigación de Ciro (2005) es del 40 %, y la menor, del 15 %. Todos estos datos serán recopilados y convertidos a un mismo sistema de unidades para su tabulación y presentación en la sección de resultados y análisis.

1.5 Emisión o captación de CO₂ relacionadas con la producción

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas primordial de efecto invernadero (GEI) antropogénico de la atmósfera; contribuye con aproximadamente 65 % al forzamiento radiativo producido por los GEI de amplia permanencia (diferencia entre la insolación absorbida por la tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio) (Jiménez et al., 2020 citando a NOAA, 2016).

Jiménez et al. (2020) también indican que del total de las emisiones originadas por actividades humanas durante el período 2006-2015, cerca de 44 % se almacenaron en la atmósfera, 26 % en los océanos y 30 % en la tierra. Una forma de aminorar sus efectos es almacenarlo en la biomasa por medio de la fotosíntesis (Ávila et al., 2001).

Esta sección propone recopilar la información necesaria para cuantificar la emisión de dióxido de carbono por cada unidad de masa de cemento producido y, de manera similar, cuantificar la cantidad de dióxido de carbono captado en la masa de la madera y el bambú estructurales.

Para una mayor facilidad en la comprensión y análisis de los datos referentes a emisiones y captación de carbono relacionado con la producción de los materiales en estudio, más adelante se emplean unidades de medición que no son propias del SI, ya que combinan unidades oficiales con nomenclatura que referencia al carbono y a los materiales en estudio.

Relaciones que emplean nomenclatura oficial como:

kg: Kilogramos

Mt: Millones de toneladas “megatoneladas”.

Empleado para generar nomenclatura compuesta no oficial como:

kg C: Kilogramo de carbono.

kg CO₂: Kilogramo de dióxido de carbono.

kg Cemento: Kilogramo de cemento.

MT C: Millones de toneladas de carbono.

1.5.1 Emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de concreto

En el concreto destacan las emisiones generadas por la fabricación del cemento como materia prima, y es en este componente del concreto en el que se realizará el enfoque para las estimaciones de emisiones de dióxido de carbono.

Como mencionan Buriticá y Cataño (2021), para el caso de los agregados gruesos, la trituración es la etapa que tiene el mayor efecto sobre las emisiones de dióxido de carbono, mientras que, para los agregados finos, las emisiones son generadas principalmente durante las etapas de cribado y lavado, las cuales no siempre son necesarias. También mencionan que el cemento tiene el mayor efecto sobre la generación de dióxido de carbono y, aunque se encuentra que la cantidad emitida por los agregados es relativamente pequeña con respecto al cemento, estos generan una amenaza para el medio ambiente, dado que sus fuentes de generación son finitas y no renovables, provocando un agotamiento de los recursos naturales dada su elevada demanda en la producción de concretos.

De acuerdo con lo que comenta Worren et al. (2001), la industria del cemento contribuye aproximadamente con un 5 % a las emisiones antropogénicas globales de CO₂, mientras que Benheal et al. (2013) comenta que este porcentaje alcanza los valores de entre el 5 y el 7 %, lo que convierte a la industria del cemento en un sector importante para las estrategias de mitigación de emisiones de CO₂. Este es un proceso de producción altamente intensivo en energía y se compone por tres etapas principales, según Worren (2001): la preparación de materias primas, producción de clínker en el horno y fabricación de cemento.

Worren indica que la preparación de materias primas y la fabricación del cemento consumen energía eléctrica, mientras que el horno de clínker utiliza casi todo el combustible en una planta de cemento típica. Además, la producción de clínker es la etapa de producción más intensiva en energía, siendo responsable de aproximadamente el 70 % - 80 % del total de energía consumida.

Respecto a las emisiones de CO₂ liberadas a la atmósfera, Warren (2001) comenta lo siguiente:

Las emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de cemento provienen directamente de la combustión de combustibles fósiles y de la calcinación de la piedra caliza en la mezcla de materias primas. Una fuente indirecta y significativamente menor de CO₂ proviene del consumo de electricidad,

asumiendo que la electricidad se genera a partir de combustibles fósiles. Aproximadamente la mitad del CO₂ emitido proviene de la combustión del combustible y la otra mitad proviene de la conversión de la materia prima. No se tienen en cuenta las emisiones de CO₂ atribuibles al equipo móvil utilizado para la extracción de materia prima, utilizado para el transporte de materia prima y cemento, y utilizado en el sitio de la planta. Las estimaciones actuales de emisiones para la industria del cemento se basan únicamente en la producción de clínker asumida (derivada de la producción de cemento asumiendo cemento Portland) y excluyen las emisiones debido al uso de energía. Las emisiones derivadas del uso de energía se incluyen en las estimaciones de emisiones por uso de energía, y no se asignan a la fabricación de cemento. (p. 326)

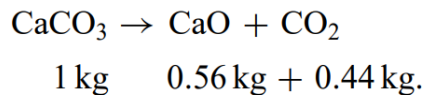
Worren et al. (2001, p. 316) proporcionan una estimación de las emisiones totales de CO₂ basada en las tendencias de producción y el uso de energía. Debido a la dificultad de recopilación de datos (especialmente para la producción de clínker), solo han estimado las emisiones para el año 1994. Esta estimación se basa en datos actuales y públicamente disponibles para el sector del cemento.

Aunque hoy en día se han desarrollado tecnologías más eficientes en cuanto al uso energético para la fabricación del cemento, el proceso de fabricación del clínker es en esencia el mismo y requiere combustibles fósiles para el proceso de calcinación. A continuación, se presenta un resumen de las fuentes de emisiones relacionadas con el proceso de fabricación del clínker según Worren et al. (2001), quienes realizaron su estudio revisando información de diversos países industrializados y otros en desarrollo, provenientes de América, Europa, África y Asia. Aunque estos autores proporcionan una descripción acertada del proceso y la forma en que se miden las emisiones, más adelante se corroborarán sus resultados con datos más actuales.

Emisiones de CO₂ por la calcinación.

La calcinación es una reacción química en la que la materia prima, típicamente una mezcla de piedra caliza y arcilla se calienta a temperaturas muy altas en un horno rotatorio. Durante este proceso, los componentes de la materia prima se descomponen, liberando dióxido de carbono (CO₂) y produciendo óxido de calcio (CaO), el cual es utilizado para la producción de cemento. Esta etapa de calcinación es fundamental en la producción de clínker, que es el producto intermedio del cemento, y es responsable de una parte significativa de las emisiones de CO₂ asociadas con la fabricación de cemento. En la siguiente figura se muestra la fórmula química que define este proceso.

Figura 22. Ecuación química de la calcinación.



Fuente: Worren et al. (2001).

El porcentaje de CaO en el clínker es de 64 %–67 %. El resto consiste en óxidos de silicio, óxidos de hierro y óxidos de aluminio. Por lo tanto, las emisiones de CO₂ de la producción de clínker ascienden a aproximadamente 0,5 kg/kg. La emisión específica de CO₂ por tonelada de cemento depende de la proporción de clínker en el cemento. Esta proporción varía normalmente de 0,5 a 0,95.

Emisiones de CO₂ por el consumo de combustibles.

El uso de combustibles está destinado, en su gran mayoría, al proceso de pirolisis mediante la ignición del combustible en los hornos. La cantidad de CO₂ emitida durante este proceso depende del tipo de combustible empleado, ya sea carbón, gas natural, coque de petróleo o combustibles alternativos.

Emisiones de CO₂ por el consumo de energía eléctrica.

Los datos específicos de consumo de electricidad fueron revisados para los mismos países industrializados y en desarrollo que se recopilaron para los datos de consumo de combustible (Canadá, Alemania, Francia, Italia, Japón, Corea, España, Turquía, Estados Unidos, Argentina, Brasil, China, Colombia, Egipto, India, México, Polonia y Venezuela). Para todos los demás países y agrupaciones regionales, la intensidad eléctrica para todos los hornos se estimó en 0,3 GJ/tonelada de cemento para los países industrializados y 0,4 GJ/tonelada de cemento para el resto del mundo. Se utilizaron estadísticas de la Agencia Internacional de Energía para calcular la intensidad de carbono promedio de los insumos de combustible para la generación de electricidad pública de cada país y agrupación regional.

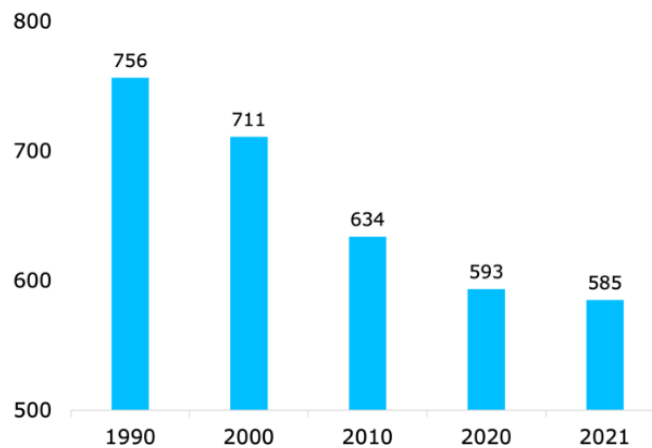
Total

Al final, Warren et al. (2001) presentan las emisiones de carbono estimadas totales de la producción de cemento en 1994; estas fueron de 307 millones de toneladas de carbono (MtC), 160 MtC provenientes de emisiones de carbono del proceso y 147 MtC del uso de energía. Como se ha mencionado anteriormente, estas emisiones representan el 5,0 % de las emisiones mundiales de carbono de 1994, basadas en un total de 6,199 MtC reportadas por el Centro de Información y Análisis del Dióxido de Carbono.

A pesar de que las tecnologías se han vuelto más eficientes energéticamente y menos contaminantes con el tiempo, las emisiones mundiales de CO₂ reportadas provenientes de la producción de cemento no han variado mucho respecto a las demás fuentes de emisión, representando la producción de cemento entre el 5 % y el 7 % de las emisiones mundiales según Benheal et al. (2013). Esto podría ser un indicador de que, así como los procesos se han hecho más eficientes y menos contaminantes, la demanda de cemento también ha crecido con el tiempo.

A continuación, se presentan datos más actuales respecto a las emisiones de CO₂ debidas a la producción de cemento a nivel mundial. En un reporte de la Global Cement and Concrete Association (GCCA) (2021), se reportan los valores desde 1990 hasta 2021 en unidades de kg de CO₂ por cada tonelada de cemento producida. En la sección de resultados se usará esta información para hacer las conversiones necesarias y poder comparar los datos reportados por la GCCA y los reportados por Warren (2001).

Figura 23. Dióxido de carbono (CO₂) liberado en producción de cemento (71AGWct).



Fuente: GGCA 2021.

En la figura anterior se muestran los valores de kilogramos de dióxido de carbono liberados a la atmósfera por la producción de una tonelada de cemento a nivel mundial. La denominación 71AGWct hace referencia a las emisiones relacionadas con la producción de materiales cementicios (cemento); es el promedio ponderado, excluyendo el CO₂ de la generación de energía en el sitio. De esta información, los autores resaltan que la industria del cemento ha presentado una reducción de emisiones de dióxido de carbono por tonelada de cemento producido de un 22,7 % desde 1990, la proporción de combustibles alternativos usados es 10 veces mayor que en 1990 y la eficiencia del uso de energía ha sido mejorada en un 19 %. Estos son datos alentadores; sin embargo, como se muestra en la figura anterior, a pesar de las

considerables reducciones por tonelada de cemento producido, sigue habiendo una importante emisión por parte de esta industria.

1.5.2 Captación de CO₂ relacionadas con la producción de madera

En los estudios que buscan estimar la captación de carbono en especies arbóreas, se suele usar el término “biomasa”, que se refiere a la materia orgánica de origen biológico, la cual se puede utilizar como fuente de energía o materia prima para diversos fines, como en este caso, para la elaboración de elementos estructurales en edificaciones. Por lo tanto, dentro del concepto de biomasa, interesa el referente a la madera sólida.

La biomasa se emplea para estimar el carbono acumulado de las especies arbóreas, mediante la multiplicación de la cantidad aprovechable en un sitio por un coeficiente que varía de 0,40 a 0,55. Estos factores son precisados por diferentes autores (Jiménez et al., 2020, p. 33).

Las plantaciones de *Tectona grandis* pueden ser actividades atractivas para la fijación de carbono, ya que es un taxón de rápido crecimiento (Jiménez et al., 2020, citando a Langenberger y Liu, 2013).

El estudio realizado por Jiménez et al. (2020) estimó el carbono almacenado a partir de variables dasométricas y ecuaciones alométricas en una plantación de *Tectona grandis* a los 11 años de establecida en Nuevo Urecho, Michoacán, México. Para estimar el carbono almacenado en los árboles, se efectuó un muestreo no destructivo con datos dasométricos (diámetro del fuste, altura total, área basal y volumen fustal) de *Tectona grandis*.

$$C_{almacenado} = (V_{cc} * D * FEB) * ((1 + R) * FC) \quad (\text{Ecuación 04})$$

Donde:

V_{cc} = Volumen fustal con corteza (m³).

D= Densidad básica (g/cm³).

FEB= Factor de expansión de biomasa.

1+R= Factor de relación biomasa radical/biomasa total.

FC= Factor de conversión de biomasa (materia seca) a carbono (%).

En el estudio presentado por Jiménez, se realizaron ajustes de modelo mediante métodos iterativos, y se determinaron criterios de ajuste y evaluación del modelo empleado. Los autores concluyen que la ecuación alométrica ajustada, con base en los indicadores de bondad de ajuste, las pruebas de normalidad de los residuales y las medidas para estimar la capacidad predictiva del modelo, es apropiada para estimar

con precisión el carbono almacenado en función del diámetro normal (d), altura total (h), densidad (D), factor de expansión de biomasa (FEB), relación biomasa radical-biomasa total (1 + R) y factor de conversión (FC).

A partir del inventario forestal realizado en el año 2014 de la plantación, integrada por 1.666 árboles/ha con una edad de 11 años, el diámetro normal promedio del arbolado es de 16,55 cm, la altura total es de 13,01 m y el área basal es de 2,17 m²/ha. El volumen fustal, de 220,29 m³/ha, se calculó con la ecuación de Meyer (Telles et al., 2018) y no incluye el volumen de las ramas, ramillas y hojas. Se calculó que la plantación cuenta con 140,37 t/ha de biomasa, y el carbono almacenado por árbol es de 0,13 t. En total, la plantación almacena 77,20 t/ha de carbono en 6 ha.

Jiménez et al. (2020) cita los resultados de Novoa et al. (2006), quienes ajustaron ecuaciones alométricas y obtuvieron una media de 72,65 t/ha de carbono almacenado en plantaciones de *Tectona grandis* a los 8 años, establecidas en Nayarit, lo cual es afín a lo registrado en su estudio. Cabe mencionar que la cantidad de toneladas de carbono captadas por una plantación por hectárea dependerá de varios factores, como la edad de la plantación, la ubicación geográfica, la distribución, la densidad de la madera, entre otros.

Otro estudio presentado por García et al. (2019) muestra resultados en árboles de *Tectona grandis* de 6 años en la zona de Yucatán, México. En este caso, para cuantificar el carbono y el dióxido de carbono, se efectuó un muestreo destructivo en 12 parcelas representativas de una plantación de 217,6 ha; la muestra consistió en 816 árboles. Los datos recolectados fueron diámetro a 0,3 m sobre el nivel del suelo, diámetro a la altura del pecho y diámetros a cada dos metros hasta la altura total (h), con el dendrómetro Criterion RD 1000. Citando a García (2019), para coleccionar muestras de campo se utilizó el método propuesto por el Instituto Internacional Winrock (2014), también utilizado por López et al. (2018), el cual consiste en derribar y seccionar árboles. En el muestreo de García, se estudiaron 12 individuos representativos y sanos, distribuidos en las parcelas.

Los resultados obtenidos por García (2019) muestran que el carbono almacenado fue de 40,08 t/ha, y el CO₂ almacenado fue de 147,1 t/ha. También indican que un 46% de esta biomasa total de la plantación está conformada por el fuste.

El método consistió en talar árboles representativos del muestreo en la plantación para posteriormente realizar mediciones directas con el fin de determinar el volumen de biomasa de cada muestra. Para la determinación de carbono de los componentes del árbol (madera, corteza, hojas y ramas), se pulverizaron tres submuestras de cada componente en un molino. La concentración de carbono total se determinó con un equipo analítico denominado Solids TOC Analyzer, modelo 1020A de O-I-Analytical, que determina las concentraciones en muestras sólidas mediante combustión completa a una temperatura de 900°C.

García et al. (2019) reportan un volumen fustal de la plantación de *Tectona grandis* a los seis años de 73,90 m³/ha. Este resultado lo comparan citando lo reportado por Villavicencio (2015), quien determinó un volumen de 80,16 m³/ha a los seis años de edad y una cantidad de carbono almacenado de 11,78 t/ha en Ecuador con la misma especie. Además de la cantidad de biomasa, también varía su densidad con lo reportado por otros autores que estudiaron plantaciones en México. Por ejemplo, en un sistema agroforestal de *Tectona grandis* con *Panicum maximum*, establecido en 2000, Orrala y Guiracocha (2007) reportan 84,12 t/ha de carbono, siendo este mayor. Por otra parte, Jaramillo y Correa (2015) reportan 17,15 toneladas de C/ha para *Tectona grandis* en la provincia El Oro, Ecuador.

Con la información presentada por los autores mencionados, se puede mostrar el potencial de la capacidad de retención de carbono de las plantaciones forestales de teca en su biomasa y, específicamente, en su fuste. Dicha capacidad puede variar dependiendo de distintos factores, como se ha mencionado. Estos datos serán utilizados en la sección de resultados y se realizará el posterior análisis. En este caso, el enfoque será en la captación de carbono y se desestimarán las emisiones relacionadas con el mantenimiento de la plantación, acarreo de materiales y procesamiento de la madera en aserraderos.

1.5.3 Emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de bambú

El bambú es otra planta que llama la atención por su potencial para captar dióxido de carbono de la atmósfera. Al igual que con la madera, este potencial de captación puede variar según diversos factores, incluyendo la especie. El presente estudio se enfoca en la especie *Guadua angustifolia* como especie aprovechable de bambú. A continuación, en la figura 24, se muestran valores de captación de carbono por hectárea cada año, según el tipo de bosque o plantación.

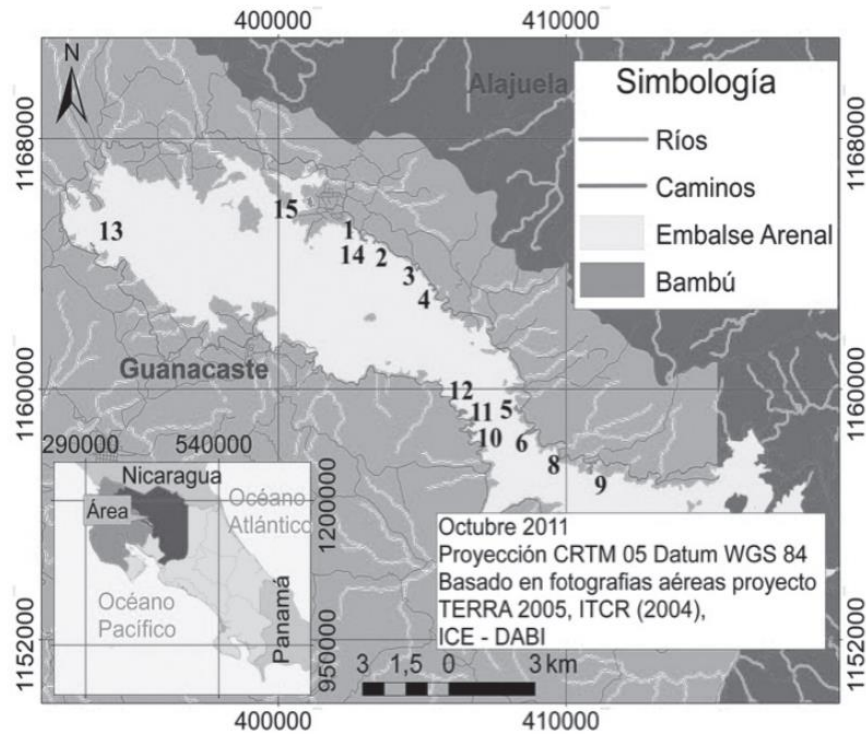
Figura 24. Absorción de carbono en *Guadua angustifolia*.

Tipo de Bosque	t C/ha año	t CO₂/ha año	Referencia
Plantación de 7 años	20.9	76.6	Camargo
Plantación Comercial 7años	21.41	78.57	Cruz
Bosque Natural al 15% de regeneración	19.89	72.99	Cruz
Bosque Natural al 10% de regeneración	13.26	48.66	Cruz
Bosque Natural al 7% de regeneración	9.28	34.06	Cruz

Fuente: Alvarado y Marcia (2021, citando a Camargo et al., 2010, y a Cruz, 2009).

Los autores Fonseca y Rojas (2016) realizaron un estudio sobre unas plantaciones de bambú establecidas en terrenos aledaños al embalse del proyecto hidroeléctrico Arenal, ubicado en la provincia de Guanacaste (cantón de Tilarán) y Alajuela (cantón de San Carlos), tal como se observa en la figura 25. La reforestación se estableció en bloques de forma irregular, separados entre sí por distancias no uniformes, para un total de 0,29 ha con *D. latiflorus* y 35,25 ha en combinación de *Guadua angustifolia* y *G. aculeata*.

Figura 25. Ubicación geográfica de las áreas con cobertura de bambú en los terrenos aledaños al embalse arenal, Guanacaste y Alajuela, 2011.

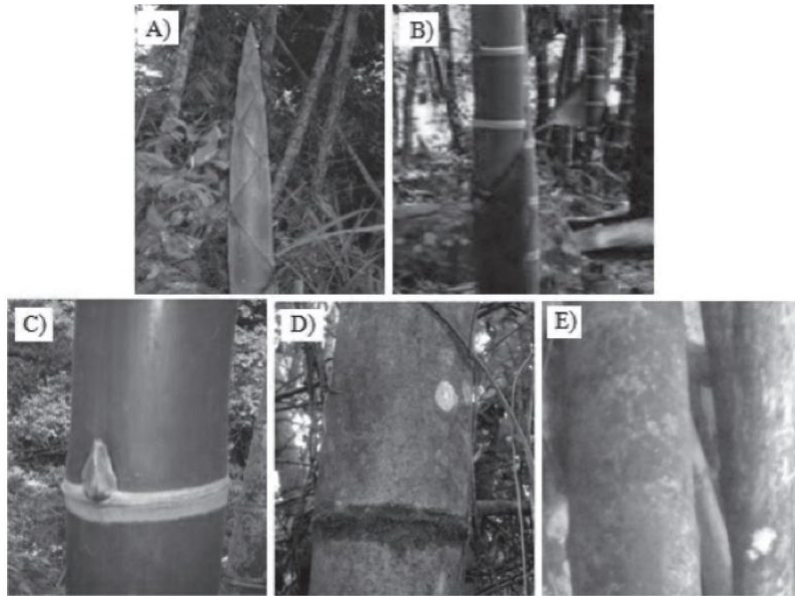


Fuente: Fonseca y Rojas (2016).

El muestreo de *Guadua angustifolia* y *G. aculeata* fue aleatorio, sin reemplazo, con una intensidad del 11,5 %. Se seleccionaron doce bloques, y en ellos se establecieron parcelas o unidades de muestreo temporales de forma circular (100 m²). El tamaño de la muestra fue de 83 parcelas. En cada unidad de muestreo se midieron todos los culmos, registrando el diámetro normal y el estado de madurez.

La cuantificación de la biomasa se realizó por el método destructivo, y para la selección de los culmos a cortar se tuvieron en cuenta aspectos como la facilidad de extracción y la representatividad en diámetro. En total, se cortaron 95 culmos de las tres especies: veinticuatro brotes (25 %), veinte juveniles (21 %), quince sazones (16 %), dieciséis maduros (17 %) y veinte muertos (21 %). Cada uno de los estadios de madurez mencionados se ve representado en la siguiente imagen. A cada culmo se le midió el diámetro (excepto a los brotes, a los que se les midió el diámetro a nivel del suelo) y se obtuvo el peso húmedo (kg) de cada componente: fuste (Fu), ramas (Rm), hojas (Ho) y raíz (Ra). En la figura 26 se muestran ejemplos de culmos en cada uno de los estadios de madurez mencionados.

Figura 26. Clasificación de los culmos de bambú por su estado de madurez.



Fuente: Fonseca y Rojas (2016).

Fonseca y Rojas realizaron una medición completa, considerando no solo la biomasa propia del bambú, sino que también estimaron la biomasa de la necromasa, la vegetación herbácea afiliada a la plantación y el carbono captado en el suelo. De cada componente de biomasa húmeda se extrajo una muestra de aproximadamente 0,6 kg, que fue empacada en bolsas plásticas debidamente identificadas y llevada al laboratorio para determinar su peso húmedo (kg). La materia seca se calculó después de secarlas en un horno a 60 °C durante 72 horas, y luego fueron pesadas a temperatura ambiente.

Los resultados obtenidos por Fonseca y Rojas en *Guadua angustifolia* y *G. aculeata* fueron que el carbono promedio almacenado en la biomasa vegetal más el del suelo fue de 117,74 Mg ha⁻¹ (E ± 4,5 %, E ± 20,3 solo para los culmos). El suelo representó el 59,9 % del carbono total, los culmos vivos el 32,8 %, y la vegetación herbácea y la necromasa, el 7,3 %. Respecto a los porcentajes de carbono presentes en cada tipo de biomasa estudiada, se presenta la siguiente figura.

Figura 27. Porcentaje (%) de carbono presente en la biomasa de plantaciones de bambú.

<i>Componente</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Categoría de edad del culmo</i>			
		<i>Renuevo</i>	<i>Juvenil</i>	<i>Sazón</i>	<i>Maduro</i>
Hojas	n			7	5
	Promedio			43,29	45,5
	SD			6,05	2,07
	E (%)			12,9	5,64
Ramas	n			7	7
	Promedio			44,35	45,3
	SD			3,12	3,75
	E (%)			6,5	7,7
Tronco	n	7	7	7	6
	Promedio	44,74	43,63	47,19	44,08
	SD	4,31	2,77	3,87	3,03
	E (%)	8,9	5,9	7,6	7,22
Raíz	n	7	5	10	12
	Promedio	43,24	44,48	43,63	43,97
	SD	3,76	1,86	4,04	4,66
	E (%)	8,4	5,2	6,6	6,7

Fuente: Fonseca y Rojas (2016).

Para efectos del estudio comparativo, se toma en cuenta el valor promedio de carbono presente en el tronco de la planta, siendo este de 44,08 %, según los datos de la figura 27. Además de esto, Fonseca y Rojas reportan valores de masa de bambú y de carbono presentes en cada unidad de área (hectáreas); estos valores serán de utilidad para calcular la masa de carbono presente en cada unidad de masa de bambú.

Figura 28. Proporción de biomasa y carbono de los componentes de culmo según las categorías de edad en plantaciones de bambú (Mg/ha).

<i>Categoría de edad del culmo</i>	<i>Componente</i>	<i>D. latiflorus</i>		<i>G. angustifolia-G. aculeata</i>	
		<i>Biomasa</i>	<i>Carbono</i>	<i>Biomasa</i>	<i>Carbono</i>
Renuevo	Tallo	0,70	0,30	0,73	0,33
	Raíz	0,36	0,16	0,37	0,16
Juvenil	Tallo	3,90	1,70	1,12	0,49
	Raíz	1,45	0,65	0,42	0,18
Muerto	Tallo	0,20	0,10	5,40	2,52
	Raíz	0,04	0,01	1,03	0,48
Maduro	Hojas	6,90	3,10	3,93	1,79
	Ramas	7,30	3,30	4,13	1,87
	Tallo	73,90	45	42,03	18,53
	Raíz	15,60	7,05	8,95	3,87

Fuente: Fonseca y Rojas (2016).

Aquí, para los datos mostrados en la figura 28, nuevamente el enfoque será en los datos referentes al tallo de la planta madura. Se observa un valor reportado de 42,04 Mg de biomasa por hectárea y 18,53 Mg de carbono por hectárea. Estos datos también serán empleados para el cálculo de la masa de carbono captada en relación con la unidad de masa de bambú utilizable en construcción. Dichos cálculos serán representados en la sección de resultados del presente trabajo.

Capítulo 2: Metodología

En esta sección se presenta una explicación de la clasificación de este trabajo respecto a qué tipo de investigación es, sus categorías y variables, cuáles son las fuentes de información, así como las técnicas e instrumentos de recolección de la información empleada. Por último, se refiere a cómo se realiza el análisis y procesamiento de la información recaudada.

2.1 Tipo de investigación

A continuación, se da una descripción del tipo de investigación realizada para cumplir con los objetivos planteados para este proyecto.

2.1.1 Enfoque de la investigación

Esta investigación se clasifica como cuantitativa, debido a su enfoque en la obtención de datos numéricos relacionados con las variables de interés mencionadas en los temas a desarrollar. Este enfoque cuantitativo se considera apropiado y necesario para alcanzar los objetivos de la investigación, que incluyen la realización de una comparación objetiva entre ciertas características de los materiales en estudio.

El presente trabajo se sustenta principalmente en la recopilación de información proveniente de diversas fuentes, estudios previos y referencias técnicas especializadas. Esta aproximación, basada en la investigación documental y la sistematización de datos recopilados, permite construir un marco comparativo que sirva de sustento para el análisis de las propiedades y viabilidad de los materiales estudiados. De este modo, el análisis comparativo realizado se fundamenta en la integración crítica de datos obtenidos, con lo cual se garantiza un enfoque objetivo y adecuado al contexto investigado.

2.1.2 Forma de recolección de información

La recolección de información en esta investigación se llevará a cabo utilizando diversas fuentes y métodos como las búsquedas bibliográficas y el contacto directo con empresas que distribuyan los materiales en estudio, para obtener una visión completa de los materiales en estudio. Los principales métodos de recolección de información son los siguientes:

Investigación bibliográfica:

Se realizará una revisión de la literatura científica y técnica a través de fuentes virtuales, como las bases de datos proporcionadas por la biblioteca digital del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y recursos académicos en línea, incluyendo plataformas como Google Académico. Esta investigación bibliográfica permitirá obtener una base sólida de conocimiento teórico y antecedentes relevantes relacionados con los materiales en estudio, incluyendo propiedades constructivas, aplicaciones, ventajas y desventajas.

Investigación de mercado:

Se llevará a cabo una investigación de mercado para evaluar la disponibilidad y las características de los materiales en estudio en el mercado actual. Esto se logrará a través de investigación en línea, consulta de sitios web de proveedores y distribuidores, solicitud de fichas técnicas, así como contacto directo con empresas y proveedores de materiales de construcción.

Se recopilarán datos sobre la disponibilidad en *stock*, variedades de productos, precios, plazos de entrega y cualquier información relevante sobre los materiales de construcción bajo estudio. Además, se explorarán las tendencias del mercado relacionadas con estos materiales, lo que permitirá una comprensión más completa de su relevancia y demanda en la industria de la construcción.

2.1.3 Propósito

La investigación en curso se caracteriza por su enfoque práctico, cuyo propósito central es promover el uso de madera y bambú como elementos estructurales en edificaciones en la realidad nacional. Este enfoque práctico es relevante, debido a la importancia de abordar los desafíos actuales en la industria de la construcción y la necesidad de encontrar soluciones concretas y aplicables a mitigar el cambio climático.

Justificación del enfoque práctico:

Solución a problemas reales: La industria de la construcción se enfrenta a desafíos apremiantes relacionados con la sostenibilidad y la reducción de las emisiones de carbono. La investigación se enfoca directamente en abordar estos problemas al proponer el uso de materiales de construcción sostenibles, como la madera y el bambú, que pueden tener un impacto positivo en la mitigación del cambio climático y la huella ambiental de las edificaciones.

Impacto tangible: Un enfoque práctico significa que los resultados de la investigación tienen el potencial de generar un impacto tangible en la industria de la construcción y en la sociedad en general. Al promover la adopción de estos materiales sostenibles, no solo se contribuye a la preservación del medio ambiente, sino que también se ofrecen alternativas realistas y económicamente viables para constructores y diseñadores.

Beneficios económicos y sociales: El uso de madera y bambú como elementos estructurales puede tener beneficios económicos al fomentar la industria local de la madera y la generación de empleo en la producción y la construcción.

Promoción de prácticas sostenibles: Fomentar el uso de materiales sostenibles en la construcción contribuye a la promoción de prácticas sostenibles en la industria. Esto se alinea con las tendencias globales hacia la construcción verde y la responsabilidad ambiental.

2.2 Definición de categorías y variables

En esta parte de la metodología, se delimitan los fundamentos conceptuales y operativos necesarios para estructurar y clasificar la información recopilada durante el estudio. Las categorías y las variables son componentes clave que permiten una organización y análisis sistemático de los datos. Las categorías funcionan como los grupos principales que agrupan la información, mientras que las variables representan los atributos específicos que se cuantifican o analizan en cada categoría. Esta aproximación metodológica garantiza que la investigación mantenga su coherencia y que los resultados sean tanto comparables como significativos, con lo cual se establece una base sólida para el análisis y las conclusiones del proyecto.

2.2.1 Propiedades mecánicas

Son las características intrínsecas de un material que determinan cómo responde este material a las fuerzas aplicadas sobre él. Estas propiedades describen la capacidad de un material para resistir deformaciones, ya sea bajo cargas de compresión, tensión, cortante o torsión, así como su capacidad para absorber energía antes de fallar.

Las propiedades mecánicas pueden ser considerado como una categoría dentro del presente trabajo, y bajo esta categoría se encuentran las variables, las cuales podrían ser: resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, resistencia al cortante, módulo de elasticidad, densidad:

2.2.2 Propiedades constructivas

Son las características y cualidades específicas de los materiales de construcción que afectan su comportamiento y desempeño durante el proceso de construcción y a lo largo de la vida útil de una estructura. Estas propiedades incluyen aspectos como trabajabilidad, facilidad de corte y unión, versatilidad en aplicaciones de construcción y durabilidad en diversas condiciones climáticas. La consideración de estas propiedades es importante para seleccionar y utilizar los materiales de manera efectiva en la edificación de estructuras seguras, funcionales y sostenibles.

Teniendo las propiedades constructivas como otra categoría dentro del trabajo, se pueden definir variables dentro de la categoría como bien podrían ser: trabajabilidad, facilidad de corte y unión, versatilidad en aplicaciones de construcción, durabilidad en diferentes condiciones climáticas.

2.2.3 Disponibilidad en el mercado

La “Disponibilidad en el mercado” se refiere a factores relacionados con la accesibilidad y disponibilidad de los materiales de construcción en el mercado.

1. Oferta:

La cantidad total de empresas que está disponible en el mercado en un momento dado. La oferta puede variar según la demanda, la producción y otros factores económicos.

2. Variedades y tipos disponibles:

La diversidad de opciones de materiales de construcción que están disponibles en el mercado. Cada material tiene sus propias características y aplicaciones específicas, por lo que la variedad permite a los constructores elegir la opción más adecuada para sus necesidades.

3. Precios y costos comparativos:

El costo económico asociado con la adquisición de un material de construcción. Comprende no solo el precio inicial del material, sino también los costos adicionales como transporte, instalación y mantenimiento. Comparar precios y costos ayuda a tomar decisiones informadas sobre la selección de materiales.

Estos elementos son esenciales para la toma de decisiones en la construcción, ya que afectan directamente la viabilidad económica y la disponibilidad de los materiales necesarios para un proyecto. Considerar estos factores puede ayudar a optimizar la eficiencia y la rentabilidad en la ejecución de proyectos de construcción.

2.2.4 Emisiones y sostenibilidad

Esta categoría se centra en evaluar realizar un acercamiento al impacto medioambiental de los materiales utilizados en proyectos constructivos y su contribución a la sostenibilidad a lo largo del tiempo. Las variables asociadas con esta categoría comprenden:

1. Emisiones de CO₂ asociadas con la producción:

Esta variable mide la cantidad de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero liberados durante la extracción, fabricación y transporte de los materiales. Cuanto menor sea esta emisión, menor será la huella de carbono asociada al material.

2. Ciclo de vida de los materiales:

Se refiere al análisis de las diferentes etapas que atraviesa un material desde su extracción hasta su desecho. Evaluar el ciclo de vida ayuda a comprender el impacto ambiental global, considerando la energía y los recursos consumidos en cada fase.

3. Impacto ambiental:

Esta variable abarca una evaluación integral de cómo los materiales afectan el entorno, incluyendo aspectos como la degradación del hábitat, la contaminación y la pérdida de biodiversidad. Busca medir el costo ecológico total asociado con el uso de un material específico.

4. Sostenibilidad:

En el contexto de la construcción, la sostenibilidad implica la capacidad de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas. La elección de materiales sostenibles contribuye a la preservación de los recursos naturales y al bienestar a largo plazo del planeta.

5. Normativas y certificaciones ambientales:

Estas incluyen regulaciones gubernamentales y estándares industriales que establecen criterios para la sostenibilidad en la construcción. Certificaciones reconocidas, como LEED, proporcionan un marco para evaluar y reconocer prácticas constructivas sostenibles.

Esta categoría busca integrar consideraciones ambientales en la toma de decisiones relacionadas con los materiales de construcción, promoviendo la adopción de prácticas más responsables desde el punto de vista medioambiental en la industria de la construcción.

2.3 Sujetos de información

La población de estudio en esta investigación abarca, además de los materiales en estudio, a las empresas productoras y distribuidoras de los materiales en estructurales mencionados, con un enfoque específico en aquellas que realizan ventas dentro de la GAM.

2.4 Fuentes de información

En esta sección se detallan las fuentes utilizadas para recopilar la información necesaria en el estudio. Las fuentes de información son fundamentales para sustentar y validar los hallazgos del proyecto, de modo que se proporcionan datos empíricos y teóricos relevantes. Las fuentes empleadas provienen principalmente de recursos digitales, páginas web de empresas y contacto con las empresas proveedoras.

2.4.1 Recursos digitales

Se utilizarán recursos digitales como artículos científicos, tesis y demás publicaciones de carácter académico e investigativo, mediante el uso de bases de datos académicas, incluyendo el repositorio digital de la biblioteca del ITCR, bases de datos como Google Académico, para acceder a una amplia gama de artículos científicos y literatura relacionada con la ingeniería de materiales y la construcción sostenible.

2.4.2 Páginas web de empresas

Se llevará a cabo una investigación en línea visitando las páginas web de empresas productoras y distribuidoras de los materiales en estudio. Esto permitirá obtener información actualizada sobre precios, disponibilidad y detalles de productos.

2.4.3 Contacto con las empresas

Se establecerá contacto directo con las empresas a través de comunicación telefónica y correo electrónico. Este contacto se utilizará para solicitar proformas y fichas técnicas específicas de los materiales, lo que proporcionará datos precisos sobre productos y disponibilidad en el mercado local.

2.5 Técnicas e instrumentos de recolección

Esta sección detalla las metodologías y herramientas utilizadas para recolectar datos durante el estudio aportando una descripción y actividades para cada una de ellas. Incluye la revisión de documentación técnica, la investigación en línea y el contacto directo con empresas. Estas técnicas aseguran la obtención de datos precisos y pertinentes, necesarios para responder a los objetivos de investigación de manera sistemática y confiable.

2.5.1 Revisión de documentación técnica

Descripción: Se revisarán documentos técnicos proporcionados por las empresas, como fichas técnicas y proformas. Estos documentos contienen información relevante sobre las propiedades técnicas de los materiales y sus características constructivas.

Actividades: Se solicitarán a las empresas fichas técnicas y proformas específicas de los materiales en estudio. Estos documentos serán analizados para recopilar datos sobre las propiedades mecánicas, precios y disponibilidad de los materiales en estudio.

2.5.2 Investigación en línea

Descripción: Se realizará una investigación en línea de las páginas web de las empresas y fuentes relacionadas con la industria de la construcción. Esto permitirá recopilar información sobre precios, promociones y disponibilidad en el mercado.

Actividades: Se llevará a cabo una búsqueda en línea de información actualizada en las páginas web de las empresas y en fuentes confiables relacionadas con la construcción. Los datos recopilados se utilizarán para obtener una visión completa de la situación del mercado.

2.5.3 Contacto directo con las empresas

Descripción: Se establecerá un contacto directo con representantes de empresas productoras y distribuidoras de los materiales en estudio a través de llamadas telefónicas y correos electrónicos. Esta técnica permitirá obtener información de primera mano sobre la disponibilidad de los materiales, precios, variedades de productos y su uso en proyectos de construcción dentro de la realidad nacional.

Actividades: Se contactará a representantes clave de las empresas a través de llamadas telefónicas y correos electrónicos. Durante estas comunicaciones, se solicitará información específica sobre la disponibilidad de los materiales en el mercado local, así como detalles sobre productos particulares. Se registrarán las respuestas y la información proporcionada por las empresas.

2.5.4 Conversiones de unidades

En el presente trabajo, es necesario convertir unidades de los datos recopilados para estandarizar dichos datos bajo un mismo sistema de unidades o, en otros casos, para obtener unidades que son clave para alcanzar los resultados deseados.

En primera instancia, se realizan conversiones convencionales entre unidades propias del SI; pero, en el caso del cálculo de las emisiones o captación de carbono relacionadas con la producción de los materiales en estudio, es necesario el uso de conversiones estequiométricas, que permiten convertir la masa de carbono emitido en la masa de dióxido de carbono (CO₂) generada. Esta conversión se realiza utilizando la relación 3,67, que representa la razón entre la masa molecular del dióxido de carbono (44 g/mol) y la masa atómica del carbono (12 g/mol). De esta forma, por cada kilogramo de carbono emitido, se generan aproximadamente 3,67 kg de CO₂. Este procedimiento es fundamental para cuantificar de manera precisa el impacto ambiental de los materiales analizados, facilitando la comparación entre alternativas convencionales y opciones más sostenibles, como la madera y el bambú.

2.6 Análisis y procesamiento de la información

En esta sección se describe cómo se analizarán y procesarán los datos recolectados. El análisis consistirá en la comparación de los datos obtenidos, los cuales serán organizados y presentados mediante tablas y gráficos que faciliten su comprensión y permitan contrastar las propiedades, ventajas y limitaciones de los materiales estudiados. La esquematización y visualización de la información permitirán identificar de manera clara las diferencias y similitudes entre los materiales, proporcionando una base estructurada para el análisis comparativo y la formulación de conclusiones y recomendaciones.

2.6.1 Presentación de resultados

Los resultados obtenidos se presentarán de manera esquemática y ordenada, buscando facilitar la comprensión de la información recopilada mediante el uso de gráficos, diagramas, tablas y resúmenes visuales. Cada una de estas representaciones visuales será cuidadosamente diseñada para destacar los aspectos clave de los datos y resaltar las comparaciones relevantes entre los materiales en estudio.

La presentación de resultados se llevará a cabo de manera coherente con los objetivos específicos de la investigación, asegurando que cada aspecto relevante sea abordado de manera exhaustiva.

La combinación de elementos visuales y descripciones detalladas permitirá una presentación efectiva de los resultados, lo que facilitará su comprensión y análisis por parte de los lectores y usuarios interesados en la guía comparativa final.

2.6.2 Descripción del proceso de análisis

El proceso de análisis y procesamiento de la información se llevará a cabo de la siguiente manera:

Organización de datos: se recopilarán todos los datos de las diferentes fuentes, incluyendo entrevistas, documentos técnicos, investigación en línea y análisis de normativas. Los datos se organizarán en categorías relevantes, como propiedades mecánicas, constructivas, precios y sostenibilidad.

Análisis de datos: se utilizarán técnicas de análisis cualitativo y cuantitativo para evaluar los datos recopilados. Esto incluirá la comparación de propiedades mecánicas, la revisión de tendencias de mercado y la evaluación de la sostenibilidad de los materiales.

Productos esperados: se espera que el producto principal de la investigación sea una guía comparativa que ayude a identificar, para los materiales alternativos (madera y bambú) y el concreto respecto a sus componentes en estudio (mecánicos, oferta, relación con el CO₂), cuáles de estos presentan mejores cualidades. Esta guía se presentará en forma de cuadros y figuras gráficas que resuman las propiedades mencionadas de cada material en estudio.

Capítulo 3: Análisis y resultados

En la sección de resultados, se presentará de manera clara y estructurada tanto los cálculos realizados en base a los datos investigados y esquemas con información extraída del marco teórico y resultados propios, lo cual es importante para llevar a cabo los análisis pertinentes. Esta recopilación no solo facilitará la comprensión de los resultados, sino que también permitirá establecer conexiones significativas entre los datos y los conceptos teóricos subyacentes.

Dado que el propósito del análisis es evaluar los resultados en relación con los objetivos de la investigación, estos sirven como guía para una interpretación adecuada. Mantener un enfoque alineado con lo planteado desde el inicio garantiza una evaluación rigurosa y bien fundamentada, lo que fortalece las conclusiones del estudio. Dichos objetivos ya fueron expuestos en la introducción del presente trabajo.

3.1 Disponibilidad en la GAM

En esta sección se mostrarán las empresas encontradas mediante la investigación que ofrecen cada producto en estudio.

Como se ha definido anteriormente, el método de investigación de las empresas que ofrezcan los productos en estudio consistió en una investigación mediante el uso de recursos electrónicos y buscadores por internet. Este método es el más usual en la realidad del mercado actual en el país, ya que la mayoría de las empresas con trayectoria en el territorio nacional cuenta con páginas web, en las cuales cualquier potencial cliente o inversor puede revisar para comprender cuál es su misión, visión, productos que ofrecen y establecer contacto con dichas empresas. De esta manera, las empresas logran una mayor amplitud en su publicidad.

Para el caso del concreto, se decidió cuantificar el número de ubicaciones disponibles dentro del GAM en las cuales se ofrezca la venta de concreto premezclado. Tras realizar la investigación, se obtuvieron los siguientes resultados, que se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 8. EMPRESAS IDENTIFICADAS PARA COMPRA DE CONCRETO PREMEZCLADO EN LA GAM	
Empresa	Ubicación
Concrepal	Palmares
Grupo Orosi	El Coyol, Alajuela.
H&M	El Coyol, Alajuela.
Concretos MECO	Guácima, Alajuela
AMCO	Flores, Heredia
AGRECON	Heredia.
Euro Concretos	Rohmoser, San José
Concretos MECO	Calle Blancos, San José
Grupo Orosi	Curridabat, San José
HCF CONCRETOS PREMEZCLADOS Y PREFABRICADOS LTDA	La Unión, Cartago
Holcim	Cartago

Fuente: Autoría propia.

De las empresas encontradas para madera y bambú, se observó que muchas de ellas ofrecían productos elaborados con estos materiales, pero no específicamente con capacidades estructurales. En el caso de la madera, muchas de las empresas ofrecían únicamente piezas en dimensiones aptas para su uso como tablilla o para la fabricación de muebles o estructuras menores. En el caso del bambú, muchas ofrecían únicamente productos livianos destinados a usos divisorios de espacios o con fines decorativos.

A continuación, se presenta un cuadro con las empresas encontradas mediante la investigación, tanto de bambú como de madera.

CUADRO 9. EMPRESAS IDENTIFICADAS PARA COMPRA DE MADERA Y BAMBÚ EN LA GAM			
Empresa	Material que ofrecen	Estructural	ubicación
MaderoTec	Madera	Sí	Grecia, Alajuela
Bambú y Maderas	Bambú y madera	No	Guachipelín, Escazú
Maderas Cultivadas de CR	Madera	Sí	Pavas, San José
Hacienda el Tecal	Madera	Sí	Uruca, San José
Maderas de Centroamérica	Madera	No	San José
Maderas del Reventazón	Madera	Sí	San Pedro, San José
Grupo XILO	Madera	Sí	Tres Ríos, Cartago
Maderas Belmonte	Madera	Sí	San José
BambuTico S.A.	Bambú	Sí	Pérez Zeledón, San José
BambuPlus	Bambú	No	La suiza, San José
Bambucoop R. L.	Bambú	No	Pérez Zeledón, San José

Fuente: autoría propia mediante investigación de recursos electrónicos.

De las ocho empresas localizadas para la venta de madera dentro de la GAM, solamente seis son proveedoras de madera estructural. En el caso del bambú, los resultados fueron inferiores, con tan solo tres empresas identificadas, de las cuales, al momento de realizar esta investigación, solo una ofrece bambú que pueda ser utilizado con fines estructurales.

Cabe mencionar que el principal uso que se le da al bambú como elemento estructural es como vigas y columnas. El bambú se emplea en forma de cañas enteras o en conjuntos de cañas unidas para conformar columnas y vigas. Las cañas pueden colocarse de manera vertical u horizontal y se fijan mediante conexiones de unión, como cuerdas o pernos, para formar marcos estructurales. Para aumentar su resistencia, se utilizan agrupaciones de varias cañas atadas o conectadas mediante soportes metálicos.

Con la empresa Bambucoop R.L., por ejemplo, no fue posible establecer contacto. En palabras de la gerente de la empresa BambuTico: “Esta era una cooperativa que se conformó hace varios años para un proyecto de laminados; se hizo seguimiento del proyecto, pero hubo mucha traba a nivel burocrático, ya que con cada cambio de gobierno se perdía mucho avance de la gestión para ejecutar el proyecto”. En el caso de la empresa BambuPlus, así como en las demás empresas de madera, estas solo ofrecen productos no estructurales, con fines arquitectónicos.

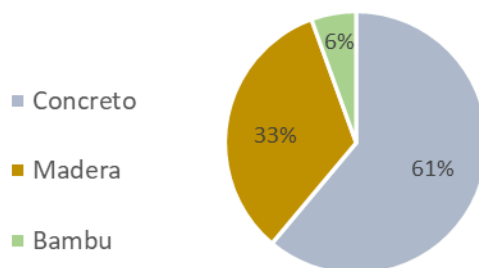
Mediante la información recopilada se generó una tabla resumen de los puntos de venta identificados para los materiales en estudio. Esta incluye únicamente los casos en que se venden materiales aptos para su uso estructural; es decir, para el caso de la madera, que se trate de madera sólida, y en el caso del bambú, que se ofrezca bambú con diámetros mayores a una pulgada y con mayor capacidad de soporte que aquellos de diámetros inferiores.

CUADRO 10. PUNTOS DE VENTA IDENTIFICADOS PARA COMPRA DE MATERIALES ESTRUCTURALES		
Material	Cantidad de ubicaciones	%
Concreto	11	0,61
Madera	6	0,33
bambú	1	0,06

Fuente: autoría propia.

Con la información del cuadro anterior, se generó un gráfico de pastel para facilitar la comprensión de los datos y su análisis. El gráfico muestra la proporción de puntos de ubicación de ventad de cada uno de los materiales en estudio dentro de la GAM.

Figura 29. Proporción de punto de venta para los materiales en estudio dentro de la GAM.



Fuente: Autoría propia.

Con la figura anterior se pretende cuantificar la disponibilidad de los materiales en estudio, basándonos en la cantidad de puntos de venta para cada uno de ellos. Como era de esperarse, predomina la disponibilidad de concreto premezclado dentro de la GAM, con un 61 % de la oferta identificada, seguido por la madera, con un 33 %, y, por último, el bambú, con un 6 %. Esto habla de la viabilidad del uso de cada uno de los materiales, ya que un material difícil de conseguir resulta poco viable para construcciones de cierta escala en adelante. En estos términos, y en comparación con el concreto, podría decirse que la madera es menos viable y el bambú lo sería aún más. Sin embargo, esto es relativo, ya que dependerá en gran medida del stock disponible en las empresas citadas y de la cercanía del proyecto a sus lugares de almacenamiento, dado que la GAM es un área extensa, con un rango aproximado de 2044 km².

En este estudio, la disponibilidad de materiales de construcción dentro de la GAM se estimó mediante una investigación de mercado basada en búsquedas en línea y contacto directo con proveedores a través de llamadas telefónicas y correos electrónicos. Esta metodología fue seleccionada por su coherencia con los métodos que comúnmente utilizan las empresas constructoras para evaluar la oferta de materiales en el mercado. Las empresas suelen recurrir a fuentes accesibles, como bases de datos de proveedores en línea y el contacto directo, para obtener información rápida y práctica sobre disponibilidad y características de los materiales, adaptándose a las condiciones reales del mercado y a los tiempos de respuesta.

Aunque este enfoque está limitado a los proveedores que responden activamente en canales públicos y accesibles, representa de forma razonable la percepción de disponibilidad de materiales para un usuario típico de la industria. Dado que una empresa constructora no suele tener acceso a bases de datos que abarquen todo el mercado, la investigación realizada captura la disponibilidad desde una perspectiva práctica y directa, alineada con la experiencia del sector.

Además, al contactar una muestra amplia y representativa de proveedores, y no basarse únicamente en un número reducido de fuentes, se asegura una cobertura razonable de la oferta disponible en la GAM. Esto permite inferir tendencias generales sobre la presencia y comercialización de materiales como el concreto, la madera y el bambú, aunque puede no representar de forma exhaustiva la totalidad del mercado. Es importante señalar que esta metodología proporciona una referencia práctica y realista, adecuada para estudios de accesibilidad de materiales en la industria de la construcción en una región específica.

Parte de lo que se busca identificar en esta investigación es el precio de los materiales. Para ello se han utilizado precios proporcionados por algunas de las empresas contactadas que se mostraron dispuestas a cooperar con dicha información.

En el caso del concreto, se consiguió una proforma actualizada de la empresa Concretos Caribeños, mediante una proforma realizada y proporcionada para y por la empresa constructora ROCA S.A. Los datos obtenidos se presentan en el siguiente cuadro. La proforma corresponde a un concreto con $f'c$ de 210 kg/cm².

CUADRO 11. PRECIO CONCRETO PREMEZCLADO (CONCRETOS CARIBEÑOS)	
Cantidad (m ³)	35
Sub Total	¢2 570 750,00
Impuestos	¢334 197,50
Total	¢2 904 947,50
Precio Unitario. (m3)	¢82 998,50

Fuente: autoría propia.

Para la madera, de las empresas contactadas, solamente la empresa Xilo y la empresa Belmonte estuvieron dispuestas a proporcionar información respecto a precios. En especial, la empresa Belmonte cuenta con un vendedor que fue muy accesible y compartió información sobre los precios propios de los aserraderos, ajustados a la realidad actual del mercado en Costa Rica.

Cabe recordar que, en la práctica, en el país se suele vender y cotizar la madera por unidad de PMT. A continuación, se muestran los precios reportados por este agente de ventas de la empresa Belmonte para algunos tipos de madera en el país.

CUADRO 12. PRECIOS DE MERCADO DE ALGUNOS TIPOS DE MADERA EN COSTA RICA		
Tipo de madera	Precio en colones por PMT (¢/PMT)	
	Precio Mínimo (Sin cepillar)	Precio Máximo (cepillada)
Teca	1200	3000
Caobilla	1000	2200
Duras (Almendro)	2300	6000

Fuente: Autoría propia.

Es importante señalar que este es un rango de precios que variará dependiendo de varios factores que aportan valor agregado a la madera, incluyendo: cepillado, rajado y canteado, secado, lijado y dimensionamiento. Por lo tanto, el precio más económico corresponde a una materia prima con casi ningún tipo de tratamiento, mientras que el precio más elevado se refiere a una madera ya lista para su uso, es decir,

el precio final para el cliente, en muchos casos proporcionado por empresas distribuidoras de madera y no directamente por los aserraderos.

También cabe aclarar que no todos los aserraderos ofrecen estos procedimientos de valor agregado, por lo que, para efectos de la comparación en este estudio, se guiará por el precio máximo aproximado, ya que este representa el costo para un cliente que busca un material prácticamente listo para ser utilizado en construcción.

Con lo anterior en mente, se procede a calcular el precio en unidades de metros cúbicos para la madera de teca, en el caso de que esta haya sido procesada hasta un punto en que esté lista para su uso en construcción. Para ello, se toma el precio por volumen usado en el país (pulgada maderera tica) y se realiza una conversión de unidades para pasar de PMT a metros cúbicos.

Una pulgada maderera tica equivale a una pieza de 1" x 1" x 4 varas (2,54 cm x 2,54 cm x 3,36 m); por lo tanto, en un metro cúbico de volumen hay aproximadamente 462 PMT.

CUADRO 13. PRECIOS DE MADERA DE TECTONA GRANDIS POR UNIDAD DE VOLUMEN			
Mínimo sin cepillar	Unidad de volumen	Máximo madera cepillada	Unidad de volumen
₡1 200,00	PMT	₡3 000,00	PMT
₡554 400,00	m ³	₡1 386 000,00	m ³

Fuente: Autoría propia.

Para el bambú, la única empresa identificada para la compra de este material con fines estructurales fue BambuTico. La gerente y dueña de esta empresa se mostró abierta a compartir información respecto a los precios que manejan. En el siguiente cuadro se presentan los resultados relacionados con esta información, proveniente de una ficha técnica que será adjuntada en los anexos.

CUADRO 14. PRECIOS BAMBU (BAMBUTICO)	
Diámetro (pulgada)	Precio unitario (6m)
2	₡7 330,00
3	₡13 075,00
4	₡18 825,00
5	₡24 700,00

6	\$39 155,00
---	-------------

Fuente: Autoría propia.

Los precios obtenidos para el bambú, como era de esperarse, están subdivididos según el diámetro aproximado del bambú en venta. Por lo tanto, para poder comparar su precio con el de la madera y el concreto, se realizaron conversiones considerando el área formada por el radio de cada pieza, multiplicado por el largo comercial, que en este caso es de 6 metros lineales. En el siguiente cuadro se pueden ver las conversiones realizadas.

CUADRO 15. CONVERSIONES PARA OBTENER PRECIO POR VOLUMEN DE BAMBÚ				
Diámetro (pulgada)	Diámetro (cm)	Área (cm²)	Largo (cm)	Volumen (m³)
2	5,08	20,27	600	0,012
3	7,62	45,60	600	0,027
4	10,16	81,07	600	0,049
5	12,7	126,68	600	0,076
6	15,24	182,41	600	0,109

Fuente: Autoría propia.

Con las unidades de volumen en metros cúbicos, se procedió a calcular el precio de cada pieza por metro cúbico, tal como se puede observar en el siguiente cuadro.

CUADRO 16. PRECIO DE BAMBU POR UNIDAD DE VOLUMEN			
Caña de bambú	Precio	Volumen (m³)	Precio por volumen (m³)
2" x 6m	\$7 330,00	0,012	\$602 747,50
3" x 6m	\$13 075,00	0,027	\$477 848,94
4" x 6m	\$18 825,00	0,049	\$386 995,97
5" x 6m	\$24 700,00	0,076	\$324 973,82
6" x 6m	\$39 155,00	0,109	\$357 747,13

Fuente: Autoría propia.

Como se observa, existe una tendencia a la baja en el precio del bambú según aumenta el diámetro de la pieza. Esto es beneficioso para esta comparación, ya que, para efectos de su uso estructural, es

favorable elegir las piezas con mayor área de apoyo disponibles, que en este caso son las de 6 pulgadas, ya que estas pueden ofrecer una mayor resistencia en servicio.

Por último, se toman los precios calculados para cada uno de los materiales y se presentan en un mismo cuadro con el fin de poder realizar la comparación y analizar los resultados obtenidos.

CUADRO 17. COMPARACIÓN DE PRECIOS POR UNIDAD DE METRO CUBICO DE LOS MATERIALES EN ESTUDIO (m ³)	
CONCRETO	₡82 998,50
MADERA	₡1 386 000,00
BAMBU	₡357 747,13

Fuente: Autoría propia.

Con la información del cuadro anterior, se procede a realizar un gráfico de barras, con el fin de representar la información de manera gráfica y facilitar su comprensión y análisis.

Figura 30. Comparación de precios por metro cubico de los materiales en estudio.



Fuente: Autoría propia.

En la figura anterior se puede observar una gran variedad en los precios de los materiales en estudio, siendo claramente la madera el más caro y el concreto el material más barato. En comparación con el concreto presentado, la madera de teca es hasta 16 veces más cara y, en comparación con el bambú, es aproximadamente 4 veces más cara. Nuevamente, desde el punto de vista de la viabilidad del uso de cada material, esto coloca a la madera como un material poco viable en comparación con el concreto y el bambú.

Es importante resaltar que estos precios consisten en una aproximación que valora solamente el material en sí, con su precio para el cliente, incluyendo en todos los casos los impuestos de valor agregado. Esto constituye una primera aproximación para la comparación de los precios de los materiales, ya que no se consideran muchos otros factores, como el acarreo, el encofrado en el caso del concreto, o la instalación y acabados finales en el caso de la madera.

Además, como se ha visto en la información recaudada, las unidades de medida para la comercialización de cada uno de los materiales son diferentes: en el caso de la madera se usan las pulgadas madereras ticas, en el caso del bambú, se usa el diámetro y el largo de la caña, y en el concreto premezclado se utiliza el metro cúbico.

3.2 Propiedades físicas

En esta sección del análisis y resultados, se exploran las propiedades físicas clave de los materiales estudiados, específicamente la densidad y la conductividad térmica. Estas propiedades son de importancia a la hora de usar materiales como la madera, el bambú y el concreto en aplicaciones constructivas. La densidad, medida en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), refleja la masa por unidad de volumen de cada material, influenciando directamente en su resistencia y peso estructural. Por otro lado, la conductividad térmica, expresada en vatios por metro kelvin ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), determina la capacidad de los materiales para transferir calor, importante para la eficiencia energética y el confort térmico de las edificaciones. Utilizando datos cuantitativos del marco teórico, se analizarán estas propiedades para proporcionar una comparación objetiva entre la madera, el bambú y el concreto en términos de su desempeño físico en aplicaciones de construcción sostenible.

3.2.1 Densidad

En esta sección, se compararon las densidades del concreto, la madera y el bambú para analizar las ventajas y desventajas que pueda aportar dicha propiedad en cada material. Según los resultados obtenidos de la bibliografía consultada para el marco teórico, se obtuvieron los siguientes resultados que se observan en el siguiente cuadro.

CUADRO 18. VALORES DE DENSIDAD OBTENIDOS		
Material	Densidad (kg/m^3)	Densidad (g/cm^3)
Concreto estándar	2258,50	2,26
Madera <i>Tectona grandis</i> 12 % C.H.	580,00	0,58
Bambú <i>Guadua angustifolia</i>	483,30	0,48

Fuente: Elaboración propia mediante datos de Kosmatka (2011), Rivero (2006) y Césare (2019).

En términos generales, el concreto es notable por su densidad, siendo esta casi cuatro veces mayor que la de la madera de *Tectona grandis* y casi cinco veces mayor que la del bambú *Guadua angustifolia*. Esta disparidad se atribuye principalmente a la composición única de cada material. Mientras que el concreto está compuesto principalmente por elementos pétreos, la madera está formada por fibras leñosas que presentan

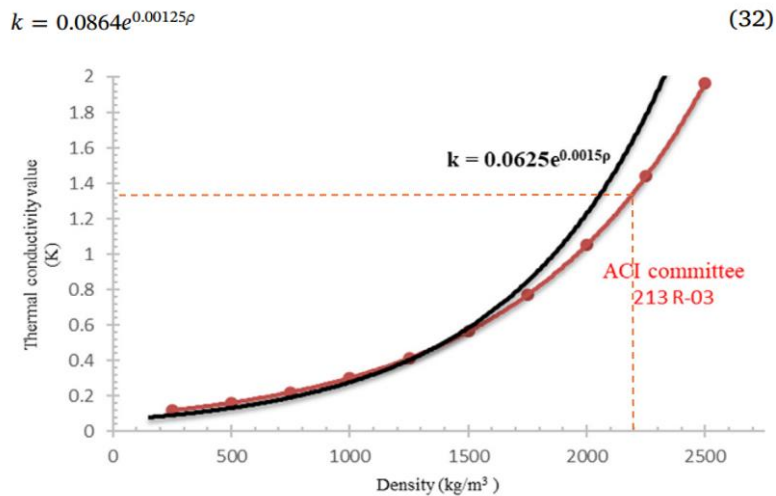
un considerable contenido de espacios vacíos en su estructura. Por otro lado, el bambú también se compone de fibras, pero, además, se caracteriza por presentar grandes espacios vacíos en cada célula, lo que contribuye significativamente a su ligereza.

Esta información es de interés a la hora de construir, ya que el peso de cada material, según sus dimensiones, será importante en aspectos logísticos como el acarreo, disposición e instalación de los materiales en la obra. Incluso, desde el punto de vista del diseño estructural, la ligereza de la madera y del bambú representa una ventaja sobre el concreto, ya que esto disminuye las cargas muertas de diseño.

3.2.2 Conductividad térmica

Para el cálculo de la resistencia térmica se parte del valor de conductividad térmica reportado para el material en estudio. En este caso, se emplea la ecuación mostrada en la gráfica de la figura 31, en la cual, para un valor de densidad de concreto de 2200 kg/m³, se obtiene un valor de conductividad térmica de 1,35 W/m·K, según la ecuación reportada por ACI 213 R-03.

Figura 31. Conductividad térmica para el concreto.



Fuente: Asadi et al. (2018).

Con el valor reportado obtenido de conductividad térmica de 1.35 W/m·K, se aplica la ecuación 5 para obtener el valor de resistencia térmica, asumiendo un espesor unitario de 1 m. El resultado obtenido fue de

0,74 K·m²/W. Cabe aclarar que se utiliza un espesor unitario de 1 metro solo para efectos de comparación entre los materiales bajo las mismas unidades.

Para el caso de la madera de teca, como se mencionó en el marco teórico, se utilizaron datos de Forest Products Laboratory (2010). En el caso del bambú, la dificultad para encontrar estudios que reporten su conductividad térmica se debe, en parte, a la variabilidad en sus propiedades estructurales y a la falta de estandarización en las metodologías de medición. Aunque la madera también es un material anisotrópico, el bambú presenta una variabilidad aún mayor debido a su estructura tubular y la presencia de cavidades internas, lo cual afecta su comportamiento térmico de manera no uniforme a lo largo de su longitud. Además, el bambú crece en diferentes condiciones climáticas y geográficas, lo que introduce una considerable variabilidad en sus propiedades. Estos factores hacen que su medición y análisis sean más complejos y poco consistentes en comparación con otros materiales como la madera y el concreto, que presentan una mayor homogeneidad estructural y son más fáciles de estandarizar para las pruebas.

Es posible pasar de conductividad térmica a resistencia térmica empleando la siguiente relación (Forest Products Laboratory, 2010):

$$R = \frac{e}{\lambda} \text{ (Ecuación 05)}$$

Donde: R= Resistencia térmica (K·m²/W).

e = Espesor del material (m).

λ = Conductividad térmica (W/m·K).

De esta manera, si se considera un espesor unitario, es posible definir que para la conductividad de entre 0,10 y 0,14 W·m⁻¹·K⁻¹ reportada en Forest Products Laboratory (2010), se obtiene una resistencia térmica de entre 10 y 7 K·m²/W, siendo el promedio entre estos dos valores de 8,5 K·m²/W.

Los resultados obtenidos para resistividad térmica del concreto y de la madera se reportan en el siguiente cuadro. Cabe mencionar que para el bambú no se toma en cuenta esta propiedad, ya que, debido a su composición isotrópica, es una propiedad muy difícil de medir y no se encontró en ninguna de las fuentes consultadas.

CUADRO 19. RESISTENCIA TÉRMICA	
Material	Resistencia térmica (K·m² /W)
Concreto estándar	0,74
Madera estructural 12 % C.H.	8,5

Fuente: Elaboración propia mediante datos de Kosmatka (2011) y Forest Products Laboratory (2010).

En el cuadro anterior, se evidencia una marcada diferencia en la conductividad térmica entre el concreto y la madera estructural, llegando a ser más de diez veces mayor según los datos recopilados. Este contraste resalta la capacidad superior de aislamiento térmico de la madera estructural en comparación con el concreto. Dado que la madera sólida tiene una resistencia térmica intrínseca mayor que el concreto, este material tiene el potencial de proporcionar un aislamiento térmico más efectivo en aplicaciones de construcción. Esto significa que, en igualdad de condiciones, las estructuras de madera permiten un mejor aislamiento en el interior de una vivienda en comparación con estructuras de concreto. Por supuesto esto puede variar dependiendo de las condiciones y del tipo de sistema constructivo empleado; sin embargo, en esta investigación se realiza una comparación de los materiales como tal.

Cabe mencionar que, en el caso de la madera, resulta poco práctico su uso como aislante térmico, ya que debido a su alto costo no es viable para un uso de elementos tipo muros o divisiones, y para lo cual para estos usos existen otros productos más accesibles como la madera contrachapada o el *plywood*.

3.3 Propiedades mecánicas

Como se ha mencionado en el marco teórico, el enfoque mecánico definido para comparar los materiales en estudio se centró en su capacidad para resistir los esfuerzos de compresión. Con base en lo anterior, el trabajo consistió en investigar la resistencia de cada material en kg/cm², ya que esta es la unidad de medición que se utiliza en el país para definir la resistencia a la compresión del concreto.

Para la resistencia a la compresión del concreto, se ha considerado el estándar solicitado por el CSCR de 210 kg/cm². Para la resistencia a tensión del concreto, se ha tomado, según sugiere Kosmatka (2011), una décima parte de la resistencia a la compresión, lo cual garantiza una buena aproximación teórica. Esto se aporta como información complementaria para demostrar las deficiencias del concreto frente a otros tipos de esfuerzo, y por ello la comparación entre materiales se limita a su resistencia a la compresión.

Los datos obtenidos para los distintos materiales en estudio se muestran en el siguiente cuadro:

CUADRO 20. VALORES DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES EN ESTUDIO.				
Material	Resistencia			Modulo e Ruptura en flexión (kg/cm²)
	Compresión (kg/cm²)	Tensión (kg/cm²)	Cortante (kg/cm²)	
Concreto estándar	210,00	21,00	-	39,00
Madera <i>Tectona grandis</i> condición seca	491,00	-	123	991,00
Bambú <i>Guadua angustifolia</i>	571,04	1944,61	66,66	-

Fuente: Autoría propia mediante datos de Quesada (2010, p. 40), Tekuchi y Emilio (2007, p. 101).

En el cuadro anterior se presentan los resultados obtenidos de la investigación sobre las resistencias determinadas para los materiales bajo estudio.

Los datos revelan una notable variación en las resistencias a la compresión entre los materiales evaluados. El bambú de *Guadua angustifolia* emerge como el material más resistente, con un valor de 571,04 kg/cm². El método de prueba utilizado por el estudio de Tekuchi y Emilio (2007) para determinar la resistencia a la compresión del bambú consistió en fallar probetas con una altura igual al doble del diámetro exterior,

empleando un deformímetro mecánico. Se utilizó el ensayo de compresión paralela a la fibra, siguiendo los procedimientos descritos en las normas ISO 22157 e ISO N315.

Figura 32. Probeta a compresión con deformímetro mecánico instalado.



Fuente: Ilha et al (2019).

Cabe mencionar que el autor concluye que no se encontró que la resistencia de probetas con nudos fuera mayor que la de probetas sin nudos. El resultado subraya las cualidades excepcionales de resistencia de este material vegetal, lo que lo convierte en una opción atractiva para una amplia gama de aplicaciones estructurales y de construcción, especialmente si se toma en cuenta su bajo peso. Más adelante se señalarán otros aspectos que influyen en su uso constructivo en la realidad, como su costo y disponibilidad en el mercado.

Por otro lado, la madera de *Tectona grandis* exhibe una resistencia a la compresión considerablemente alta, con un valor reportado de 491 kg/cm². Para la obtención de este dato, Quesada (2010) no realizó ensayos de laboratorio, sino que se basó en datos obtenidos por Juan Tuk, publicados en 2007. Esta madera, conocida por su durabilidad y estabilidad, muestra una capacidad notable para soportar cargas de compresión.

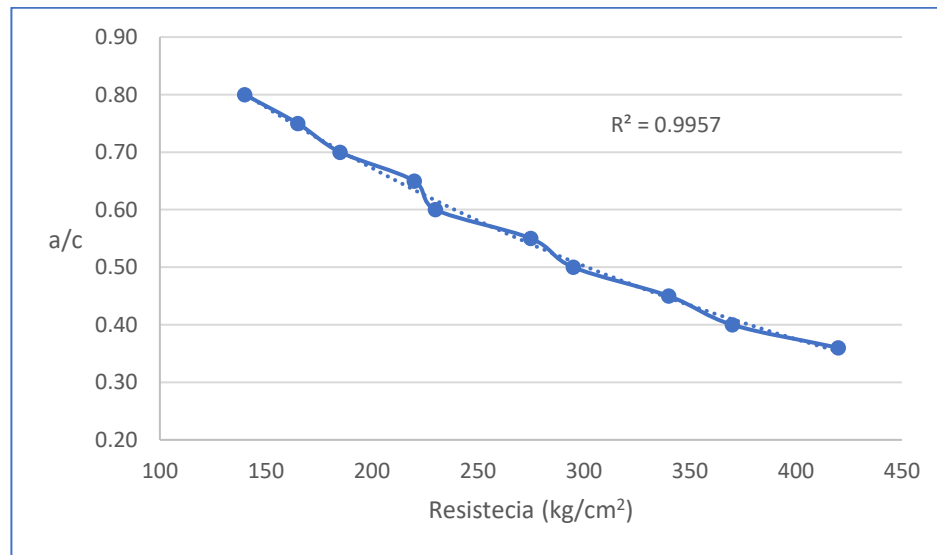
En contraste, el concreto muestra la resistencia a la compresión más baja de los tres materiales evaluados, con un valor definido en 210 kg/cm². Si bien es cierto que el concreto elaborado a partir de cemento puede alcanzar una amplia gama de resistencias a la compresión, desde valores bajos de aproximadamente 200 kg/cm², adecuados para elementos no estructurales, hasta resistencias superiores a 500 kg/cm² en concretos de alta resistencia, utilizados en estructuras que requieren soportar cargas

significativas, el requerimiento mínimo para uso estructural, según el CSCR, es de 210 kg/cm², y por ello se decidió tomar este valor como punto de referencia.

Por otro lado, materiales naturales como la madera y el bambú presentan una mayor dispersión en sus valores de resistencia debido a factores intrínsecos como la variabilidad en su estructura anatómica, el contenido de humedad y las condiciones de crecimiento. Por ejemplo, la resistencia a la compresión del bambú puede variar significativamente según la especie y las condiciones específicas de cada planta.

La proporción de los materiales es de suma importancia, y entre estos, el agua está estrechamente relacionada con la resistencia final del concreto y con el revenimiento, lo cual determina la capacidad de carga y su facilidad de volcado en el encofrado, respectivamente. En la siguiente figura se puede ver la relación existente entre la relación agua-cemento y la resistencia final del concreto.

Figura 33. Relación A/C vs resistencia del concreto.



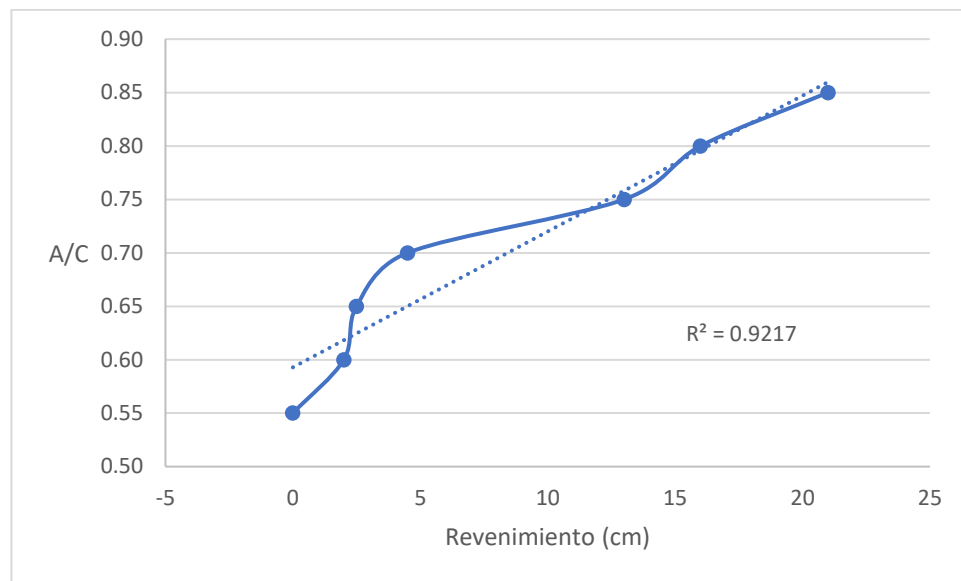
Fuente: Autoría propia mediante datos de Guevara et al. (2012).

Según los resultados obtenidos, basados en datos de Guevara et al. (2012), la relación entre la cantidad de agua en la mezcla respecto al concreto y la resistencia final de la muestra tiene una tendencia lineal con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.996. Esto significa que la resistencia final del concreto es inversa y linealmente proporcional a la cantidad de agua que se agregue en relación con la cantidad de cemento presente en la mezcla. Este es un factor muy importante a tener en cuenta a la hora de utilizar el concreto en construcciones civiles, pues, según la relación agua-cemento para el caso presentado, la mezcla puede variar entre los 150 kg/cm² a aproximadamente 450 kg/cm². Sin embargo, disminuir demasiado la

cantidad de agua puede generar una mezcla con poco revenimiento y, por ende, poca trabajabilidad, como se verá a continuación.

En la siguiente figura se muestra la relación que tiene la relación A/C respecto al revenimiento del concreto, también empleando datos recopilados de Guevara et al. (2012).

Figura 34. Relación agua cemento contra revenimiento en el concreto.



Fuente: Autoría propia mediante datos de Guevara et al. (2012).

Como se observa, dependiendo de la relación agua-cemento empleada, el revenimiento de la mezcla de concreto utilizada en este ejemplo puede variar entre 0 cm y cerca de 20 cm. Se puede apreciar nuevamente una tendencia lineal con un coeficiente de determinación de 0,922. Este valor, aunque menor que el del gráfico anterior, sigue siendo aceptable.

Esto indica nuevamente que la cantidad de agua proporcionada en la mezcla de concreto tiene una relación lineal con el revenimiento. Esto también es de suma importancia a la hora de definir un diseño de mezcla para concreto, ya que, con un revenimiento muy bajo, la mezcla podría ser poco trabajable y difícil de acomodar en los encofrados. Por otro lado, si la mezcla es demasiado líquida, los agregados pétreos podrían segregarse, generando irregularidades en el producto final.

3.4 Emisión o captación de CO₂

Para efectos de comparar la relación que tiene la producción de cada uno de los materiales de estudio con las emisiones o captación de CO₂, se ha realizado una revisión bibliográfica en la que se ha determinado que, en el caso del concreto, la mayor fuente de sus emisiones de CO₂ a la atmósfera está relacionada con la producción del cemento, mientras que la madera y el bambú destacan por su capacidad de captación de carbono de la atmósfera en su estructura molecular. En todos los casos, las estimaciones realizadas por los autores desprecian las emisiones relacionadas con la maquinaria y otras fuentes de emisiones asociadas con su producción, dejando en claro que las cantidades más importantes provienen de los procesos ya mencionados.

Para el caso del concreto, se describe en el marco teórico cuál es el proceso de su producción, haciendo énfasis en los subprocesos más contaminantes. Se obtuvo información detallada del proceso y las cantidades de CO₂ relacionadas con estos mediante datos proporcionados por Warren et al. (2001). Para efectos de este proyecto, se toman sus datos referentes a Latinoamérica y también los referentes a las emisiones mundiales de 1994 según su estudio. Posteriormente, se comparan sus datos de emisiones mundiales con los datos más actuales proporcionados por la GGCA en 2021.

En el contexto de este análisis, se ha optado por utilizar unidades que no pertenecen al SI, como Mt (megatoneladas) en lugar de Mg (megagramos), debido a varias razones prácticas y de consistencia con las fuentes originales.

Los datos utilizados provienen de estudios y publicaciones previas que emplean Mt para expresar millones de toneladas, lo que permite mantener la integridad de la información y facilita la comparación directa con las cifras reportadas en la literatura. Convertir todas las unidades al SI podría introducir errores de redondeo y crear incoherencias al interpretar los resultados de manera uniforme con respecto a las fuentes.

Además, el uso de Mt hace que los datos sean más manejables y comprensibles. Expresar cantidades en megatoneladas permite trabajar con cifras más simples y evita el uso de números

excesivamente grandes, que podrían generar confusión. Por ejemplo, expresar la producción de cemento en kilogramos llevaría a cifras de nueve dígitos, lo que haría más difícil su lectura y análisis.

Por estas razones, se ha decidido preservar el uso de Mt en los cuadros de datos, manteniendo la coherencia con las fuentes consultadas y facilitando la comprensión y manipulación de la información.

CUADRO 21. EMISIONES DE CO₂ POR PRODUCCIÓN DE CEMENTO PARA AMERICA LATINA 1994.		
Datos		
Producción de cemento	97,4	Mt
Emisión total de Carbono	19,4	MtC
Relación C-clínker	0,136	MtC/t clínker
Relación CO ₂ -clínker	0,500	MtCO ₂ /t clicnker
Cálculos		
Relación C-CO ₂	0,272	MtC/MtCO ₂
Relación C-Cemento	0,199	kg C/ kg Cemento
Relación CO ₂ -Cemento	0,732	kg CO ₂ / kg Cemento

Fuente: Elaboración propia con datos de Warren et al. (2001).

Lo que se hizo fue tomar los datos proporcionados por los autores; con estos, se calcularon las relaciones de proporción entre el carbono y el dióxido de carbono, así como entre el carbono y el cemento. Finalmente, se obtuvo la relación entre el dióxido de carbono y el cemento producido. Se determinó que, para 1994, las emisiones de dióxido de carbono estimadas para América Latina eran de 0,732 kg de CO₂ por cada kg de cemento producido. Esta relación es cercana al 1:1, lo cual resulta verdaderamente alarmante considerando la enorme cantidad de cemento que se produce.

A continuación, se explica de manera más detallada cómo se obtuvieron las relaciones calculadas mediante los datos de Warren (2001).

Relación C-CO₂ (MtC/MtCO₂): Para calcular esta relación, se toma la relación C-clínker (0,136 MtC/t clínker) y se divide entre la relación CO₂-clínker (0,500 MtCO₂/t clínker). Esto muestra la proporción de carbono emitido por cada unidad de dióxido de carbono emitido en el proceso de clinkerización.

$$\text{Relación C-CO}_2 = \frac{0.136 \text{ MtC/t clinker}}{0.500 \text{ MtCO}_2/\text{t clinker}} = 0.272 \text{ MtC/MtCO}_2 \quad (\text{Ecuación 06})$$

Relación C-Cemento (kg C/kg Cemento): Esta relación se calcula dividiendo la emisión total de carbono (19,4 MtC) entre la producción de cemento (97,4 Mt), lo que da la cantidad de carbono emitido por cada kilogramo de cemento producido.

$$\text{Relación C-Cemento} = \frac{19.4 \text{ MtC}}{97.4 \text{ Mt}} = 0.199 \text{ kg C/kg Cemento} \quad (\text{Ecuación 07})$$

Relación CO₂-Cemento (kg CO₂/kg Cemento): Para calcular la cantidad de dióxido de carbono emitido por cada kilogramo de cemento, se toma la relación C-Cemento (0,199 kg C/kg Cemento) y se divide entre la relación C-CO₂ (0,272 MtC/MtCO₂). Esto permite obtener la emisión de dióxido de carbono en relación con la producción de cemento.

$$\text{Relación CO}_2\text{-Cemento} = \frac{0.199 \text{ kg C/kg Cemento}}{0.272 \text{ MtC/MtCO}_2} = 0.732 \text{ kg CO}_2/\text{kg Cemento} \quad (\text{Ecuación 08})$$

El mismo procedimiento se realizó con las estimaciones de emisiones producidas a nivel mundial con los datos proporcionados por los autores.

CUADRO 22. EMISIONES DE CO₂ POR PRODUCCIÓN DE CEMENTO PARA EL MUNDO 1994.		
Datos		
Producción de cemento	1380,9	Mt
Emisión total de Carbono	307	MtC
Relación C-clínker	0,136	MtC/t clicker
Relación CO ₂ -clínker	0,500	MtCO ₂ /t clicker
Cálculos		
Relación C-CO ₂	0,272	MtC/MtCO ₂
Relación C-Cemento	0,222	kg C/ kg Cemento
Relación CO ₂ -Cemento	0,817	kg CO ₂ / kg Cemento

Fuente: Elaboración propia con datos de Warren et al. (2001).

Los resultados obtenidos muestran que las emisiones por unidad de masa de cemento a nivel mundial estimadas para 1994 no difieren mucho de las estimadas para América Latina, siendo las mundiales de 0,817 kg de CO₂ por cada kg de cemento fabricado.

Como el propósito de esta investigación es comparar con el concreto como material de construcción, se utilizó un ejemplo de diseño de mezcla proporcionado por Warren et al. (2001), en el cual se diseña para un concreto con resistencia de 240 kg/cm². Se calculó la proporción de cemento en dicha mezcla para poder calcular las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la producción del cemento empleado en la mezcla, como se podrá ver a continuación.

CUADRO 23. EMISIONES DE CO₂ POR PRODUCCIÓN DE CONCRETO MUNDIALES 1994.		
Datos		
Relación Carbono-Cemento	0,222	kg C/ kg Cemento
Relación CO₂-Cemento	0,817	kg CO ₂ / kg Cemento
Diseño de mezcla del ejemplo 2.		
Densidad del concreto (SSD)	142	lb/ft ³
Densidad del concreto (SSD)	2274,6	kg/m ³
Agua	155,4	kg/m ³
Cemento	370,2	kg/m ³
Agregado Grueso (SSD)	997,9	kg/m ³
Agregado Fino (SSD)	760,6	kg/m ³
Total	2284,1	kg/m ³
Cálculos		
% de cemento en la mezcla de concreto	0,160	-
Relación CO₂-Concreto.	0,130	kg CO₂ / kg Concreto

Fuente: Elaboración propia con datos de Warren et al. (2001).

Como es de esperarse, la proporción de CO₂ relacionada con la mezcla de concreto es menor que la relacionada directamente con el cemento, ya que en el concreto usado en el ejemplo el cemento representa solo un 16 % de la masa total de la mezcla. Se obtuvo que, para la mezcla usada en el ejemplo, se emanaron 0,13 kg de CO₂ por cada kilogramo de concreto fabricado. Cabe mencionar que el diseño de mezcla usado en el ejemplo se asemeja mucho al concreto típicamente usado en el país, con una proporción de cemento y agregados muy cercana a la de 1-2-3. También se determinó que la mezcla tiene una relación de agua-cemento de 0,42.

CUADRO 24. PROPORCIÓN DE CEMENTO Y AGREGADOS EN LA MEZCLA DE CONCRETO		
Componente	% de peso	dosificación
Cemento	0,17	1
Agregado Grueso (SSD)	0,47	2,7
Agregado Fino (SSD)	0,36	2,1

Fuente: Elaboración propia con datos de Warren et al. (2001).

Como se observa, la relación de cemento y agregados es de 1-2,1-2,7, muy cercana a la típica de 1-2-3, lo cual indica que el diseño de mezcla del ejemplo es bastante cercano a la realidad de lo requerido en el país. Hay que recordar que los diseños de mezcla son ejercicios ingenieriles cuyo resultado va a variar mucho dependiendo de diversos factores, desde los requerimientos de diseño hasta las propiedades técnicas de cada componente empleado. A continuación, se muestran las emisiones mundiales reportadas para el 2021 por la GGCA.

CUADRO 25. EMISIONES DE CO₂ POR PRODUCCIÓN DE CEMENTO PARA EL MUNDO 2021.		
Relación CO₂-Cemento	0,585	kg CO₂ / kg Cemento
Relación CO₂-C	3,670	-
Relación C-Cemento	0,160	kg C / kg Cemento

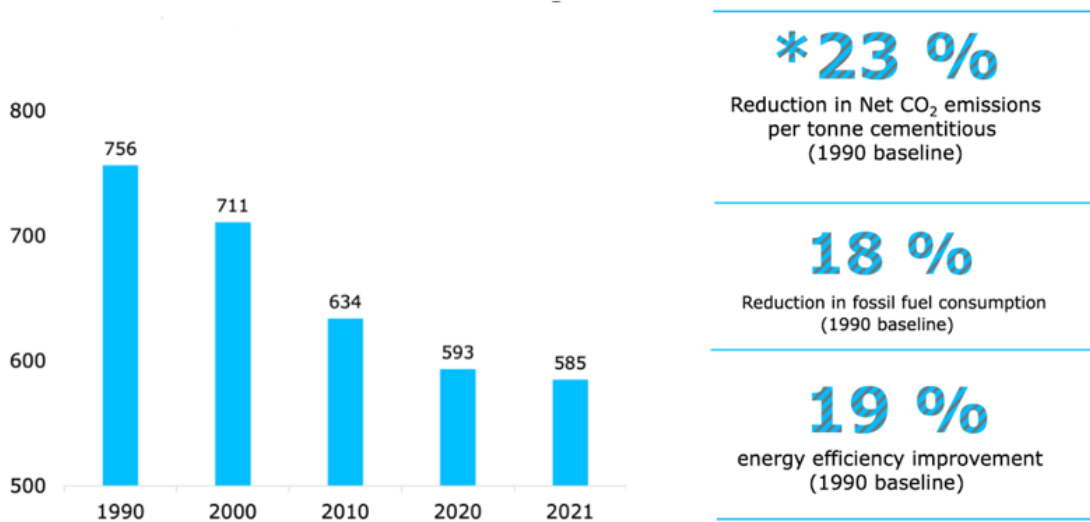
Fuente: Elaboración propia con datos de GGCA (2021).

CUADRO 26. EMISIONES DE CO₂ POR PRODUCCIÓN DE CONCRETO MUNDIALES 2021		
Datos		
Relación CO₂-Cemento	0,585	kg CO₂ / kg Cemento
Diseño de mezcla del ejemplo 2.		
Densidad del concreto (SSD)	142	lb/ft ³
Densidad del concreto (SSD)	2274,6	kg/m ³
Agua	155,4	kg/m ³
Cemento	370,2	kg/m ³
Agregado Grueso (SSD)	997,9	kg/m ³
Agregado Fino (SSD)	760,6	kg/m ³
Total	2284,1	kg/m ³
Cálculos		
% de cemento en la mezcla de concreto	0,160	-
Relación CO₂-Concreto.	0,095	kg CO₂ / kg Concreto

Fuente: Elaboración propia con datos de GGCA en (2021).

En los datos más actuales de 2021 se muestra un valor menor de emisiones de CO₂ respecto a la masa de cemento producida, siendo este de 0,585 kg de CO₂ por cada kg de cemento producido. Este cambio positivo se debe en parte al avance en tecnologías relacionadas con el uso de energía, como, por ejemplo, los hornos donde se produce el clínker. En el siguiente gráfico de la figura 35 se puede comprobar cómo los datos presentados por ambos autores tienen correspondencia a través del tiempo.

Figura 35. kg de CO₂ netos/ tonelada de cemento. 71AGWct.



Fuente: GGCA en 2021.

En el presente estudio, las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento se abordan en función de valores estandarizados de producción, sin considerar las medidas específicas de mitigación adoptadas por algunas empresas del sector. Esta decisión responde a tres razones clave, alineadas con los objetivos de uniformidad y representatividad en el análisis.

En primer lugar, los datos de emisiones globales y promedios del proceso de fabricación del cemento son más representativos de la industria en su conjunto. Las medidas de mitigación, como el uso de tecnologías de captura de carbono o la incorporación de combustibles alternativos, varían significativamente entre empresas y países. Por lo tanto, los valores que incluyen estas tecnologías pueden no reflejar la realidad de la mayoría de las plantas de producción ni de la industria a nivel nacional.

En segundo lugar, la incorporación de estas medidas en el análisis implicaría una variabilidad que dificultaría la comparación uniforme entre el cemento y los materiales alternativos, como la madera o el bambú. Un análisis coherente y comparable requiere valores estándar y promedios que capturen las emisiones típicas de la producción de cemento, sin depender de iniciativas específicas que no estén estandarizadas en toda la industria.

Finalmente, el objetivo del estudio es proporcionar una evaluación crítica y fundamentada de las diferencias inherentes en las emisiones de CO₂ de materiales de construcción convencionales versus alternativos. La inclusión de tecnologías o medidas que no se aplican consistentemente limitaría la validez

generalizable de las conclusiones y podría desviar el foco del análisis comparativo hacia prácticas particulares que no son representativas.

Para estimar la captación de dióxido de carbono de la madera, se tomaron datos de las fuentes bibliográficas mostradas en el marco teórico, obteniendo los siguientes resultados.

CUADRO 27. RESULTADOS DE GARCÍA ET AL 2019. CAPTACION DE CO₂		
DATOS <i>Tectona grandis</i> de 6 años.		
Captación de CO ₂ (6 años)	40,1	t C/ha
CO ₂ almacenado en plantación	147,1	t CO ₂ /ha
Porcentaje de fuste	46 %	-
Volumen fustal (6 años)	73,9	m ³ /ha
Densidad de madera	0,480	g/cm ³
Densidad de madera	480	kg/m ³
CALCULOS		
CO ₂ almacenado en fuste	67,6	t CO ₂ /ha
Relación CO ₂ -Madera	0,920	t CO ₂ / m ³
CO₂ almacenado en fuste.	1,91	kg CO₂ / kg madera
Relación C-CO ₂	0,270	kg C / kgCO ₂
C almacenado en fuste.	0,520	kg C /kg madera

Fuente: Elaboración propia con datos de García et al. (2019).

En los datos de García (2019) se estudia una plantación de 6 años; lo que se hizo fue realizar conversiones de unidades para poder tener los datos de todos los materiales en el SI y poder comparar los valores de manera objetiva. Este mismo proceso se realizó para los datos obtenidos de una plantación de mayor edad, de 11 años.

CUADRO 28. RESULTADOS DE JIMENEZ 2020, CAPTACION DE CO₂		
DATOS <i>Tectona grandis</i> de 11 años.		
Captación a los 11 años. (fuste)	77,2	t C/ha
Volumen fustal	220,29	m ³ /ha
Densidad básica	0,59	g/cm ³
CALCULOS		
Densidad básica de madera	590	kg/m ³
C almacenado en fuste.	0,590	kg C/kg madera
Relación CO ₂ -C	3,67	
CO₂ almacenado en fuste.	2,18	kg CO₂/kg madera

Fuente: Elaboración propia con datos de Jiménez (2020).

Se puede observar que los resultados, tanto de la plantación joven como de la mayor, tienen valores de captación de CO₂ por unidad de masa de madera muy similares, siendo el reportado por García de 1,91 kg CO₂/kg madera y el de Jiménez de 2,18 kg CO₂/kg madera.

El valor de la masa de CO₂ por unidad de masa de madera dependerá en gran medida de la densidad de la madera. Es normal que el peso de CO₂ captado sea mayor al del carbono captado o incluso al de la madera, ya que el CO₂ se almacena en la madera en forma de C, y el peso molecular de este es mucho menor que el del CO₂.

Al igual que con el concreto, es importante determinar las emisiones de carbono generadas por el proceso de producción de la madera, con el fin de hacer una comparación más acertada. Para esto, se tomaron los datos reportados por Hammond y Jones (2008). Los datos que aportan Hammond y Jones emplean una metodología basada en la recopilación de datos de una base de datos que incluye estimaciones de energía incorporada y carbono para una variedad de materiales de construcción. Esta base de datos se construyó a partir de literatura revisada por pares. En los estudios de caso específicos, los resultados de la base de datos fueron comparables a los estimados previamente por otras entidades, mostrando un acuerdo razonable.

Por otro lado, en los resultados de los autores citados se observó una variabilidad significativa en algunos de los resultados. Algunos casos mostraron diferencias de hasta el 200 % en las emisiones de carbono incorporado. Esta variabilidad fue atribuida a las diferencias en la definición de límites geográficos, la antigüedad de las fuentes de datos y la rigurosidad de los análisis de ciclo de vida (LCA) originales.

Además, los autores destacaron que la información sobre la energía y el carbono incorporados es escasa en la literatura de construcción, lo que limita las comparaciones y el análisis más detallado. Esta falta

de datos estandarizados complica aún más la estimación precisa de las métricas de sostenibilidad en la construcción, sugiriendo que se necesita más investigación en este ámbito (Hammond y Jones, 2008).

Para la madera, el valor representativo de carbono emitido e incorporado fue calculado considerando el consumo típico de varios tipos de madera en el mercado del Reino Unido, lo cual da una aproximación general en ausencia de información más específica sobre el tipo exacto de madera utilizada (Hammond y Jones, 2008). Esto se aplica a este informe como una aproximación, tomando en cuenta que el procesamiento de la madera es muy similar independientemente de la especie de la madera.

CUADRO 29. COEFICIENTES DE ENERGÍA Y CARBONO EMITIDO INCORPORADO A UN MATERIAL	
Material	Carbono incorporado
	kg C/kg
Madera general	0,125
Tableros de madera	0,234

Fuente: Elaboración propia con datos de Hammond y Jones (2008).

En el cuadro 29 se observa que las emisiones de carbono relacionadas con la producción de madera son de 0,125 kg C/kg, según lo reportado en el estudio de Hammond y Jones.

Mediante los datos reportados, se calculó la cantidad de dióxido de carbono que se emite por la producción de madera utilizando la relación estequiométrica de 3,67 para pasar de C a CO₂. Los resultados anteriores se utilizaron para obtener el balance de emisiones-captación por la producción de madera para construcción.

CUADRO 30. BALANCE DE EMISIONES Y CAPTACIÓN EN PRODUCCIÓN DE MADERA.			
Descripción	Cantidad	Unidades	Fuente
Carbono emitido en producción	0,130	kg C/kg madera	Hamond y Jones (2008)
Relación CO ₂ -C	3,67	-	Relación estequiométrica
CO ₂ emitido en producción	0,459	kg CO ₂ /kg madera	Autoría propia con datos de Hamond y Jones (2008)
CO ₂ almacenado en fuste.	2,18	kg CO ₂ /kg madera	Jiménez (2020)
Balance total (Captación)	1,72	kg CO ₂ /kg madera	Autoría propia con autores citados.

Fuente: Elaboración propia con datos de Hammond y Jones (2008); Jiménez (2020).

En el cuadro anterior se observa que, finalmente, considerando tanto la captación como las emisiones de CO₂ en la producción de madera para construcción, el balance sigue siendo positivo, obteniéndose que aún se captan 1,72 kg CO₂/kg madera según los datos citados anteriormente.

En el siguiente cuadro se pueden ver los resultados obtenidos para el bambú. Cabe mencionar que el autor presenta valores para diferentes estadios de madurez de la planta; sin embargo, se toman los de una planta adulta, ya que es el esperado para su uso en construcción. También es importante señalar que en estos cálculos se toma en cuenta solo el CO₂ que termina secuestrado en el fuste de la planta, ya que, además de ese, hay mucha captación relacionada con los demás elementos de la biomasa y el suelo, según se explica en el marco teórico de este estudio.

CUADRO 31. RESULTADOS DE FONSECA y ROJAS 2016. CAPTACION DE CO₂		
DATOS Bambú <i>Guadua angustifolia</i>		
Relación de C en biomasa tronco bambú Maduro	44,08 %	kg C / kg bambú
Biomasa de tallo maduro	42,03	Mg bambú/ha
Carbono de tallo maduro	18,53	Mg C / ha
CALCULOS		
Relación C-biomasa de bambú maduro	0,441	kg C / kg bambú
Relación CO ₂ /C	3,67	-
Relación CO₂ - biomasa de bambú maduro	1,62	kg CO₂ / kg bambú

Fuente: Elaboración propia con datos de Fonseca y Rojas (2016).

Para calcular la cantidad de CO₂ capturado a partir del contenido de carbono en la biomasa de bambú, se utiliza la relación estequiométrica entre el carbono y el dióxido de carbono. Esta relación estequiométrica resulta en una equivalencia que corresponde al 3,67, que se observa en el cuadro anterior. Con ello, se logró determinar la cantidad de CO₂ por kilogramo de bambú.

En este estudio, se omiten las emisiones de CO₂ relacionadas con la producción y procesamiento del bambú como material de construcción debido a la falta de datos específicos, consistentes y representativos que reflejen adecuadamente su ciclo de vida, en comparación con materiales convencionales como el concreto y el cemento. Esta decisión responde a dos factores clave.

Primero, el enfoque de este trabajo es realizar una evaluación comparativa entre materiales convencionales y alternativas viables, basándose en datos de emisiones estandarizados y ampliamente

reconocidos. Dado que aún no existen metodologías o bases de datos estandarizadas que detallen las emisiones asociadas al ciclo de vida completo del bambú en construcción, la inclusión de estos datos podría introducir inconsistencias que afectarían la comparabilidad de los resultados y la fiabilidad de las conclusiones.

En segundo lugar, las limitaciones actuales en la disponibilidad y precisión de datos para el bambú refuerzan la decisión de concentrarse en una comparación más rigurosa y directa de sus propiedades ambientales generales, tales como su capacidad de captura de carbono, sin incluir factores que no puedan medirse o estandarizarse adecuadamente en el contexto actual.

A continuación, se presenta un cuadro resumen con los datos que se han recopilado para cada uno de los materiales en estudio, en relación con las emisiones de dióxido de carbono en su producción.

CUADRO 32. EMISIONES NETAS DE CO₂ RELACIONADAS CON LA PRODUCCIÓN DE LOS MATERIALES EN ESTUDIO			
Material	emisión (+)	captación (-)	Balance total
	(kg CO₂ / kg)	(kg CO₂ / kg)	(kg CO₂ / kg)
Cemento	0,585	-	0,585
Concreto	0,095	-	0,095
Madera	0,459	2,18	-1,72
bambú	-	1,62	-

Con el cuadro anterior se comparan las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento, madera y bambú. En el caso de la madera y el bambú, se considera el concepto de balance total; es decir, las emisiones generadas durante su procesamiento, menos la captura de carbono ocurrida durante su crecimiento. Sin embargo, en el caso del cemento y el concreto, no se incluye información relacionada con la captura de carbono, ya que, al tratarse de materiales de origen mineral, su contribución a la captura de carbono atmosférico es marginal o nula en comparación con materiales de origen vegetal, por lo que no se considera relevante para este análisis. En cuanto al bambú, tal como se mencionó previamente en este documento, no se identificó información específica o cuantificable sobre su capacidad de captura de carbono durante la fase de crecimiento, lo cual limita la posibilidad de realizar una estimación precisa de sus emisiones netas.

Resulta evidente cómo el cemento es el material que más emite dióxido de carbono en su producción, en comparación con los demás materiales, con 0,585 kg CO₂ / kg de cemento. Esta emisión es mucho menor en el caso del concreto, ya que, como se mencionaba anteriormente, este se compone principalmente por

piedra y arena, los cuales, como se ha indicado, representan un aporte de emisiones de dióxido de carbono despreciables en comparación con el cemento empleado en la mezcla.

Para el caso de la madera, se observa que en su producción tiene una emisión reportada de 0,459 kg CO₂ / kg de madera producida. Este es un valor muy cercano al reportado para el cemento; sin embargo, al realizar el balance con la captación de dióxido de carbono, este valor se vuelve negativo, teniendo que la madera de teca tiene una captación “neta” de 2,18 kg CO₂ / kg de madera producida. Esto representa una gran ventaja en términos ambientales de la madera sobre el concreto.

El bambú, siendo otro material alternativo, presenta captación de dióxido de carbono, siendo menor que la de la madera, pero no despreciable. A pesar de que no se encontraron datos reportados para las emisiones relacionadas con la producción de bambú en las fuentes y bases de datos consultadas, se podría aproximar una emisión similar a la reportada por la madera; sin embargo, no resulta práctico para una comparación cuantitativa, por lo cual se debe omitir de este análisis.

Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

En términos de disponibilidad y costo, según las fuentes consultadas, el concreto es el material más accesible, con un 66 % de presencia en puntos de venta dentro de la GAM y un costo aproximado de 82.998,5 colones por m³. En contraste, el bambú alcanza los 357 743,13 colones por m³ y la madera de teca es la más costosa, con 1 386 000,00 colones por m³. El bambú, además, es el menos disponible, con apenas un 6 % de presencia en el mercado sondeado en este estudio.

En cuanto a la densidad, el concreto presenta el valor más alto, con 2.258,50 kg/m³, seguido de la madera de *Tectona grandis* (580 kg/m³) y el bambú *Guadua angustifolia* (483,30 kg/m³). Esto confirma que el concreto genera estructuras significativamente más pesadas. Respecto a la resistencia térmica, la madera de teca muestra un valor de 8,5 K·m²/W, aproximadamente 10 veces mayor que el concreto (0,074 K·m²/W), lo que evidencia su superioridad como aislante térmico.

Desde el punto de vista de la resistencia mecánica, según las fuentes citadas en el trabajo, el bambú y la madera presentan valores de compresión de 571,9 kg/cm² y 491 kg/cm², respectivamente, ambos superiores al mínimo requerido para concreto estructural según el CSCR (210 kg/cm²), lo que respalda su viabilidad estructural en ciertas aplicaciones. Sin embargo, estas resistencias provienen de ensayos específicos y deben interpretarse considerando las particularidades de cada material.

En términos de emisiones y captura de CO₂, la madera destaca por su balance positivo, con emisiones estimadas en 0,46 kg CO₂ por kg producido y una captura neta de 1,72 kg CO₂ por kg. El concreto, por su parte, presenta emisiones de aproximadamente 0,09 kg CO₂ por kg de concreto colocado, sin considerar captura alguna debido a la ausencia de procesos relevantes de fijación de carbono. En el caso del bambú, la falta de información estandarizada sobre su captura de carbono impidió realizar un balance completo, lo que evidencia la necesidad de mayor investigación en este ámbito.

En conclusión, la madera y el bambú presentan ventajas importantes en términos de desempeño térmico, resistencia mecánica y sostenibilidad ambiental; sin embargo, enfrentan limitaciones en cuanto a costo y disponibilidad. Por el contrario, el concreto sigue siendo el material más viable en la realidad nacional, debido a su amplia disponibilidad y menor costo, a pesar de sus impactos ambientales más elevados. Esto refuerza la importancia de promover el desarrollo de cadenas de suministro y políticas que faciliten el uso de materiales alternativos más sostenibles en el sector de la construcción.

Recomendaciones

Dado que la información específica sobre la captura y emisión de carbono asociada a la producción de madera y bambú en el contexto costarricense es limitada, se recomienda a las instituciones académicas y a los centros de investigación ambiental llevar a cabo estudios aplicados que evalúen el impacto neto de estos materiales en términos de huella de carbono, considerando sus procesos reales de cultivo, cosecha, procesamiento y transporte en el país. Esto permitiría contar con datos más confiables que respalden las afirmaciones sobre su sostenibilidad y que sirvan de base para futuras proyecciones y políticas relacionadas con su uso en el sector de la construcción.

Respecto al bambú, sus propiedades mecánicas -en particular la resistencia a la compresión- pueden variar considerablemente según factores como la especie, el clima, la altitud, el manejo silvicultural y el grado de madurez. En este sentido, se recomienda que las universidades y centros de investigación en ingeniería civil y forestal del país desarrollen ensayos normalizados con especies disponibles localmente, como *Guadua angustifolia*, para generar una base de datos confiable sobre su comportamiento estructural. Esta información permitirá establecer parámetros de diseño acordes a la realidad nacional y evitar afirmaciones técnicas que no estén fundamentadas en resultados experimentales locales.

Además, se sugiere ampliar el análisis a otras especies maderables autóctonas o adaptadas al medio nacional, más allá de *Tectona grandis*. Existen diversas especies cultivadas en el país que podrían tener potencial estructural, pero que no han sido suficientemente evaluadas en este contexto. Estudiar su disponibilidad, propiedades físicas y mecánicas, y su rendimiento en obras piloto contribuiría a diversificar la oferta de materiales sostenibles de origen local.

Por otro lado, se considera fundamental fomentar la producción y comercialización responsable de madera y bambú dentro del territorio nacional. Para ello, se recomienda promover investigaciones orientadas al estudio del mercado nacional, así como las aplicaciones técnicas reales en distintos sistemas constructivos con materiales alternativos. Estos estudios deben contemplar condiciones estructurales, climáticas y normativas propias del país, evaluando aspectos como el comportamiento mecánico de elementos mixtos, la compatibilidad entre materiales, durabilidad, facilidad de ensamblaje, mantenimiento y costos asociados.

Finalmente, se sugiere promover el desarrollo de normativas y guías técnicas específicas para el uso de la madera y el bambú en la construcción. En colaboración con entidades reguladoras y profesionales del sector, el establecimiento de criterios claros y pruebas estandarizadas para estos materiales podría facilitar su adopción en proyectos de construcción sostenibles, fomentando la confianza en estos materiales y garantizando la seguridad estructural.

Referencias

- American Concrete Institute (ACI). (2008). *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-08) y comentarios*.
- Asaid, I., Shafiqh, P., Fitri, Z. y Binti, N. (2018). Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering*, 21, 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2018.10.012>
- Barreto, W. y Gutiérrez, M. (2018). Estudio de durabilidad en las estructuras de bambú guadua angustifolia kunth de la Universidad la Gran Colombia, Seccional Armenia-Colombia. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13771.39202>
- Bermejo, F. (2010). *Propiedades mecánicas de los materiales*. Universidad Antonio Nariño. <https://fbermejo.files.wordpress.com/2010/02/propiedades-mecanicas.pdf>
- Buriticá, Y. y Cataño, W. (Eds.). (2021). *Estimación de las emisiones de CO2 de concretos modificados con residuos de vidrio* (Vol. 18, Número 35). *Revista Politécnica*. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v18n35a3>
- Césare, M., Hilario, F. y Callupe, N. (2019). Caracterización química y física del bambú. *Avances en Ciencia*, 10(4).
- Ciro, H., Osorio, J. y Juan, V. (2005). Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la Guadua angustifolia Kunth. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 1–14. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472005000100010
- Coto, A. (2015). *Manual de uso de la madera para la construcción*. Grupo Nación.
- Fallas, L. (2015). *Durabilidad de madera termotratada de Gmelina arborea (Roxb. ex Sm) y Tectona grandis (L.f.) en Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- FONAFIFO. (2003). *Manual para productores de teca (Tectona grandis L. f) en Costa Rica*.
- Forest Products Laboratory. (2010). *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material (Centennial Edition)*. https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf

- García, D. A., Pérez, J. J., Yerena, J. I., Aguirre, Ó. A. y Rodríguez, E. A. (2019). Evaluación de carbono almacenado en una plantación de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Tizimín, Yucatán, México. *Ciencia UANL*, 22(97), 1–9.
- Global Cement and Concrete Association. (2021). *GNR 2.0 – GCCA in Numbers*. <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>
- Guevara, G., Hidalgo, C., Rodríguez, I., Rojas, L. y Segura, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en Marcha*, 25(2), 80–86.
- Hammond, G. P. y Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 161(2), 87–98.
- Hernández, M., Jiménez, S. y Sánchez, J. I. (Eds.). (2021). *Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción* (Vol. 34, Número N°2). *Tecnología en Marcha*.
- Ilha, Lisiane., Ostapiv, Fabiano., Oliveira, Alexandre. (2019). *Caminos para el desarrollo sostenible*. Universidad federal de Santa Catarina. Brasil.
- International Energy Agency [IEA]. (2020). *Energy Technology Perspectives*. IEA Publications.
- Jiménez, J., Telles, R., Alanís, E., Yerena, J. I., García, D. A. y Gómez, M. (2020). Estimación del carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* L. f. mediante ecuaciones alométricas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(57), 32–56.
- Kosmatka, S. y Wilson, M. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Portland Cement Association. <https://www.cement.org/docs/default-source/that/020-npca-design-and-control-of-concrete-mixtures.pdf>
- Marcott, S., Shakun, J. y Clark, P. (2013). A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 339(8 MARCH), 1198–1201. <https://doi.org/10.1126/science.1228026>
- Martínez, S. (2015). Bambú como material estructural: Generalidades, aplicaciones y modernización de una estructura tipo.
- Moreno, E., Solís, R. y Varela, J. (2016). Resistencia a tensión del concreto elaborado con agregado calcáreo de alta absorción. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 8(1), 35–45.
- Quesada, L. (2010). Estudio técnico y económico para la construcción de viviendas de interés social utilizando madera de teca en elementos estructurales y forros para paredes. *Universidad de Costa Rica*.
- Rivero, J. y Moya, R. (2006). Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia. *Revista Forestal*, 3(9).

- Serrano, J. y Rodríguez, R. (2008). Ensayos de trabajabilidad de *Tectona grandis* L.f. de 11 años de edad proveniente de dos sitios de crecimiento en plantaciones del Atlántico y el Pacífico de Costa Rica. *Revista Forestal Kuru*, 5(14). <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/423/354>
- Takeuchi, C. y Gonzáles, E. (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería Universidad de Bogotá*, 11(1), 89–103.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [UNEP]. (2016). *Towards zero-emission efficient and resilient buildings. Global Status Report 2016*.
- Worren, E., Price, L. y Ozawa, N. M. C. H. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *ResearchGate*, 26, 303–329. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.10.012>.

Anexos

A continuación, se presentan documentos compartidos por algunas de las empresas contactadas para este trabajo de investigación.

Primero se presenta una ficha técnica para madera laminada aportada por la empresa Xillo. Seguidamente una lista de precios para distintos tamaños nominales de Bambú, así como catálogo de productos por parte de la empresa Bambutico. Por último, se presenta una proforma de concreto premezclado por parte de la empresa Concretos Caribeños sociedad anónima, la cual se tomada en cuenta para la estimación de costos de la investigación.



Central de Servicios Químicos S.A.

Alto de Ochomogo, diagonal a la estación de servicio Cristo Rey

Tel.: 2279 7985 // E-mail: xiloquim@racsa.co.cr // www.grupoxilo.com

FICHA TÉCNICA MADERA LAMINADA

Las vigas laminadas encoladas **XILOLAM®**, se producen a partir de piezas pequeñas de madera mejorada estructuralmente. Las piezas son seleccionadas para eliminar los defectos que debilitan la rigidez de la sección en conjunto, es decir, los nudos. En piezas estructuralmente críticas el XILOLAM rebaja las dimensiones de defectos admisibles para incrementar la resistencia total de la viga o columna una vez terminada. Por ser madera seca a 12% de humedad las piezas construidas con XILOLAM son estables ante los cambios dimensionales durante la vida de la obra.

PRESERVACIÓN:

El sistema de preservación a que se somete las vigas de XILOLAM® da como resultado una madera impregnada con sustancias que repelen el ataque de insectos xilófagos y de hongos de pudrición. Esto gracias a un producto químico alemán: el MicroPro, el cual no contiene arsénico ni cromo dentro de su formulación para una mayor seguridad ecológica, tanto para humanos como para el medio ambiente. La cantidad de preservante depositado en la madera depende del uso final de la madera. Para uso bajo techo se usa a 1.7 Kg/m³, y para uso a intemperie se usa a 3.3 kg/m³.

ADHESIVO:

Para unir las piezas de madera, después del saneo por ensambles de tipo “Fingerjoint”, así como para la unión horizontal de lamelas entre sí; utilizamos el adhesivo de tipo MUF Catalizado fabricado por Akzo Nobel de Noruega. Por su rigidez bajo cargas no produce fluencia lenta como ocurre con otros tipos de adhesivos, además posee una excelente resistencia termoestable a la intemperie.

Este adhesivo, por su grado estructural, es el mejor para la laminación de madera XILOLAM, es de tipo “wet-use” para uso en condiciones de humedad. Las normas bajo las cuales se utiliza son: NTI Noruega, CTBA Francia, FMPA Alemania y DHBC No 32289 de Holanda.

Las pruebas de laboratorio realizadas en el Instituto Tecnológico de Costa Rica para la empresa XILO, reportan que la falla por esfuerzo cortante en la superficie de encolado ocurre en la madera en el 100% de los ensayos. Por tanto para el cálculo del esfuerzo de diseño en cortante de las vigas rige el de la madera de Pino radiata.





Central de Servicios Químicos S.A.

Alto de Ochomogo, diagonal a la estación de servicio Cristo Rey

Tel.: 2279 7985 // E-mail: xiloquim@racsa.co.cr // www.grupoxilo.com

PROPIEDADES DE DISEÑO:

- Densidad a 19% de contenido de humedad 500kg/m³
- Módulo de flexión: MOE 90.000 kg/cm²
- Esfuerzo a compresión paralelo al grano Fc: 54 kg/cm²
- Esfuerzo a compresión perpendicular al grano Fp: 24 kg/cm²
- Esfuerzo a cortante paralelo al grano Fv: 8.82 Kg/cm²
- Esfuerzo a cortante perpendicular al grano: no aplica
- Esfuerzo a flexión-tensión paralelo al grano MOR: 90Kg/cm²
- Esfuerzo a tensión perpendicular al grano: no aplica
-

ESPECIFICACIONES DE LA MADERA LAMINADA:

- Toda la madera será Pino Radiata.
- Cepillada las cuatro caras.
- Seca al 12% de humedad relativa al momento de ser encolada.
- Curada bajo Método Vacío-Presión con preservante Micro Pro. Libre de cromo o arsénico.
- La penetración del preservante será de albura completa.
- Se utiliza Cola Estructural MUF1242, termoestable e impermeable.



Se pueden fabricar piezas rectas o curvas de madera laminada con dimensiones máximas de 20 metros de largo, 1.2 metros de ancho y 24cm de espesor. En piezas estructuralmente críticas, se rebaja las dimensiones de defectos admisibles de la madera a laminar, para incrementar la resistencia total de la pieza una vez terminada.





LISTA DE PRECIOS 2023

Diámetros	Precio Unitario
Caña de Bambú curada 2" x 6 metros	¢7.330
Caña de Bambú curada 3" x 6 metros	¢13.075
Caña de Bambú curada 4" x 6 metros	¢18.825
Caña de Bambú curada 5" x 6 metros	¢24.700
Caña de Bambú curada 6" x 6 metros	¢39.155

Bambú negro	Precio Unitario
Caña de Bambú curada 2" x 6 metros	¢8.400
Caña de Bambú curada 3" x 6 metros	¢14.700

Bambú para cielorrasos	Metro cuadrado
Bambú Aurea de diámetro de 1" - 1¼" (largos a escoger en 3, 4 y 5 metros).	¢9.255
Esterilla de bambú (40-50 cm aproximadamente) x 3 metros de largo	¢7.635
Bambú Aurea venta por unidad	Unidad
Bambú Aurea de diámetro de 1" - 1¼" x 3 metros	¢840
Bambú Aurea de diámetro de 1" - 1¼" x 4 metros	¢1.050
Bambú Aurea de diámetro de 1" - 1¼" x 5 metros	¢1365
Bambú Aurea de diámetro de 1¼" - 1½" x 5 metros	¢2.965

Otros Productos	Precio Unitario
Tiras de bambú en 1.5 pulgadas x 10 metros	¢3.590
Tableta de bambú de 2 pulgadas de ancho x 2 metros de largo (cepillada incrementa un 20% SOBRE EL PRECIO)	¢2.215
Esqueletos de bambú en 3 metros de largo	¢9.790
Deckambú (30 cm de ancho, 2 metros de largo x 3 cm de espesor aproximadamente)	¢42.850

Nota: Los precios anteriores no incluye:

* Servicio de transporte (con gusto se lo cotizamos).

RECOMENDACIONES AL EMPLEAR BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN

*Se debe contar con mano de obra capacitada en la creación del diseño estructural apropiado para la construcción con bambú.

*Es de gran importancia elegir un material que se encuentre previamente inmunizado y en su punto óptimo de maduración.

*Si requiere almacenar bambú previo a su utilización, es necesario colocarlo de tal forma que el material esté ventilado para evitar humedad, preferiblemente en forma vertical.

*El espesor de su pared y diámetro es variable en toda su longitud por lo que es necesario tomar estas consideraciones para la correcta utilización y ubicación del material, logrando su aprovechamiento total.

*No es recomendable que el bambú este en contacto permanente con la humedad del suelo, es recomendable utilizar cimientos de concreto, que sirvan de plataforma aisladora de humedad.

*El bambú no debe clavarse con puntillas o clavos que generalmente se emplean en la madera, sino debe utilizarse grapas o clavos con pistola neumáticas para evitar ranuras en el material.

*Como acabado se le puede aplicar al bambú un producto que ayude a repelar la humedad del ambiente y que a la vez no selle los poros del material, para que el mismo pueda eliminar la humedad interna. Se recomienda SAYERLACK (HI 100), HI500, HI600.

Tel: (506) 27718570/27718569
Pérez Zeledón, San José Costa Rica
www.bamboocostarica.com
bambutico@gmail.com



CATALOGO DE PRODUCTOS



Teléfono: 2771-8569
bambutico@gmail.com
www.bambutico.com



Bambú Tico



Bambu Tico de Paramo S.A

Cañas de bambú de 1" a 1 ½"

Este producto es especialmente recomendado para su uso en cielo rasos, paneles livianos y detalles constructivos con fines estéticos.

Está disponible en presentaciones de 3, 4 y 5 metros de largo.

El color del acabado puede ser natural (amarillo claro) o color caramelo, según el proceso que se utilice para la eliminación de la resina existente.

Bambú de la especie *Phyllostachys Aurea*.



Bambú Cocinado

Proceso que se hace mediante agua caliente y soda caustica, para la eliminación de la resina natural del bambú.

Color: amarillo claro

Recomendaciones: Aplicar acabado protector con barniz Sayerlack HI500 (brillante), HI600 (mate) o HI100 (satinado).





Bambú Horneado

Proceso que se hace mediante horno para la eliminación de la resina natural del bambú.

Color final: caramelo

Recomendaciones: Aplicar acabado protector con barniz Sayerlack HI500 (brillante), HI600 (mate) o HI100 (satinado).



APLICACIONES DE LAS CAÑAS
DE BAMBÚ 1" A 1 ½"



ESTERILLA



ESTERILLA

Producto elaborado mediante un proceso manual el cual consiste en golpear cada nudo presente en la caña de bambú hasta que esta ceda por la presión en su interior y se abra, tomando forma de lámina.

Generalmente es utilizada para la construcción de paredes y confección de cielo rasos gracias a sus propiedades térmico-aislantes, su flexibilidad y sencilla instalación.

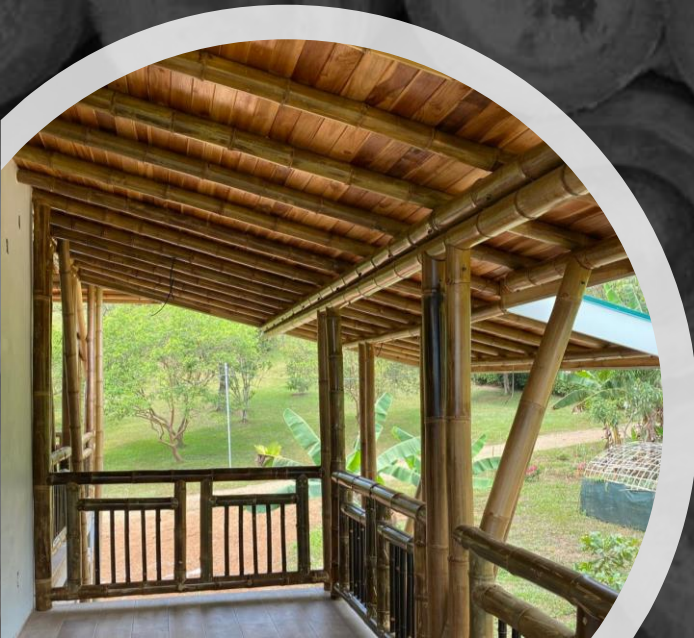
Cada pieza mide 3 metros de largo y su ancho oscila entre los 35cm y los 45cm.

Producto elaborado con la especie *Dendrocalamus Asper*.





CULMOS DE
BAMBU DE 2" A
6½"



Los culmos de bambú son generalmente utilizados para la construcción de infraestructuras gracias a su resistencia y flexibilidad, así como las características sismo-resistentes que le convierten en una excelente opción de materia prima para la construcción de edificaciones ecológicas.

Disponible en presentación estandarizada de 6m de largo en las especies *Guadua Angustifolia* & *Dendrocalamus Asper*.

TABLETA

Por lo general este material es utilizado para detalles estéticos en construcciones, elaboración de muebles, cercas y cielo rasos.

Disponible en presentaciones de 2m de largo y 2 pulgadas de ancho.

El bambú utilizado en este material es el *Dendrocalamus Asper*.



DECKAMBÚ

Piso de bambú:

Producto utilizado como piso para deck, gracias a su forma impide la acumulación de agua y facilita la limpieza.

Disponible en presentaciones de 2 metros de largo, 30cm de ancho y 3 centímetros de espesor.

Bambú de la especie;
Dendrocalamus Asper.



Tiras de Bambú


Útiles en la construcción de infraestructuras y cercas.

Gracias a su extraordinaria flexibilidad se convierte en una excelente opción para invernaderos.

Disponible en presentaciones de 10 metros de largo y 2" de ancho.

Bambú de la especie Gigantocloa Attar.





Esqueletos de
Bambu para
Decoración de
Espacios



Otros Materiales Utilizados
Como Elementos Decorativos

RECOMENDACIONES

- Se debe contar con mano de obra capacitada en la creación del diseño estructural apropiado para la construcción con bambú.
- Si requiere almacenar bambú previo a su utilización, es necesario colocarlo de tal forma que el material esté ventilado para evitar exceso de humedad, preferiblemente en forma vertical y no expuesto directamente al sol.
- Si el es lavado, es necesario aplicar un acabado protector (Sayerlack)
- El espesor de la pared y diámetro es variable en toda su longitud, por lo que es necesario tomar estas consideraciones para la correcta utilización y ubicación del material, logrando su aprovechamiento total.
- El bambú no debe estar en contacto permanente con la humedad del suelo, lo recomendable es utilizar cimientos de concreto, que sirvan como plataforma aisladora. No se recomienda utilizar expuesto a la intemperie.
- El bambú no debe clavarse con puntillas o clavos de los que generalmente se emplean en madera, en su lugar debe utilizarse grapas o clavos de pistola neumática para evitar rajaduras en el material.
- La garantía es contra insectos y hongos, no cubre contra reventaduras por mal manejo del material.



Método Boucherie

Aunado a las maravillosas características naturales que presenta el bambú hemos desarrollado métodos de inmunización química por inyección, el método boucherie consiste en la sustitución de la sabia presente en el bambú por sales de bórax y sulfato de cobre, con lo cual garantizamos el producto contra insectos taladradores y hongos.

Los productos deben superar rigurosos controles de calidad durante todo el proceso productivo, desde el momento de la corta del bambú hasta que este se almacena listo para su venta.

La mano de obra altamente calificada y con más de 35 años de experiencia en la manipulación del bambú garantiza un manejo óptimo del material procesado.

Este método de tratamiento utilizado, es el más eficaz, especializado y adaptado para la inmunización del bambú.

Garantía

La empresa BAMBUTICO S.A respalda la calidad del bambú con una garantía de 20 años, bajo el uso adecuado del material y el buen almacenamiento del mismo. El material no debe ser expuesto a la intemperie y se debe haber aplicado el acabado protector recomendado.





CONCRETOS CARIBEÑOS, S.A

**CONCRETOS CARIBEÑOS
SOCIEDAD ANONIMA**

Concretos Caribeños S.A.

Ident. Jurídica: 3-101-683531

Teléfono: +(506) 2711-3535/2711-3434

Fax: +(506) 0

Correo: felectronica@concretoscaribenos.com

Dirección: 500 mts sur del cruce Calle Uno,
Jiménez, Pococí.

Receptor: Rodríguez constructores asociados, S.A

Ident. :

Teléfono: +(506) 6128-5870

Correo: ecastro@rocacr.com

Condición de Venta: Contado

Dirección:

Medio de Pago: Transferencia-Depósito Bancario

Líneas de Detalle

Código	Cantidad	Unidad Medida	Descripción del Producto/Servicio	Precio Unitario	Descuento	Naturaleza del Descuento.	SubTotal	Monto Impuestos
006	35.00	metro cúbico	Concreto Premezclado fc 210 Kg/cm2 a 28 días. Proyecto en Delegación Guácimo.	73,450.00	0.00		2,570,750.00	334,197.50

Notas: La forma de pago, por anticipado.

Entrega por descarga directa, hasta donde sea posible el acceso de los camiones automezcladores.

Entrega a coordinar, de acuerdo a cronograma.

La vigencia de la oferta es de 20 días naturales.

Subtotal Neto:	¢	2,570,750.00
Total IVA:	¢	334,197.50
Total Otros Imp:	¢	0.00
Total Exonerado:	¢	0.00
Total Proforma:	¢	2,904,947.50

DOS MILLONES NOVECIENTOS CUATRO MIL
NOVECIENTOS CUARENTA Y SIETE COLONES CON
50/100

Consulta en www.facturaelectronica.cr

Este comprobante no puede ser utilizado para fines tributarios, por lo cual no se permitirá su uso para respaldo de créditos o gastos.

Autorizado mediante la resolución DGT-R-033-2019 del veinte de junio de dos mil diecinueve de la Dirección General de Tributación.

Generada por GTI , www.facturaelectronica.cr

Versión del Documento Electrónico: 4.3

