

MONOGRAFÍA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CICLO DE VIDA DE ESTRUCTURA EN
GUADUA: CASO DE ESTUDIO PARA EL DEPARTAMENTO DEL META



DANIEL FERNANDO ROA ROMERO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

MONOGRAFÍA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CICLO DE VIDA DE ESTRUCTURA EN
GUADUA: CASO DE ESTUDIO PARA EL DEPARTAMENTO DEL META

DANIEL FERNANDO ROA ROMERO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniería
Civil

Asesor

Ing. Mg. BREGGY HASSLER CHOQUE JIMÉNEZ

Magister en Ingeniería de Estructuras

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTES GALLEGO, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCIA JARA, O. P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBON

Secretaria de División Sede Villavicencio

Mg. Luis Fernando DIAZ CRUZ

Decano de la Facultad Ingeniería Civil

Dedicatoria

Queridos papá y mamá,

Esta dedicatoria es un pequeño gesto para agradecerles por todo el amor, apoyo y sacrificio que han brindado a lo largo de mi vida. Su guía y ejemplo han sido la brújula que me ha dirigido hacia el camino del éxito.

Cada logro, cada alegría y cada aprendizaje que he tenido, lleva impreso su amor y dedicación. Gracias por ser mis más grandes inspiraciones, por creer en mí incluso cuando yo dudaba de mí mismo y por estar siempre a mi lado en cada paso que he dado.

Esta obra no solo es un reflejo de mi esfuerzo, sino también de la gran enseñanza y valores que me han inculcado. Espero que este trabajo les haga sentir orgullosos, pues cada página escrita lleva un pedacito de ustedes en ella.

Con todo mi amor y gratitud,

Daniel Fernando Roa Romero.

Agradecimientos

Quiero aprovechar este momento para expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido de alguna manera en este camino lleno de aprendizajes y logros.

A mis padres, por ser mi roca y mi guía a lo largo de toda mi vida. Gracias por su amor incondicional, su apoyo constante y por creer en mí cuando yo dudaba de mis propias capacidades.

A mis seres queridos, por estar siempre a mi lado, por brindarme ánimo y por compartir conmigo momentos tanto de alegría como de desafíos. Su amistad y compañía han sido un regalo invaluable en mi vida.

A mis maestros y mentores, por compartir su conocimiento, experiencia y sabiduría conmigo. Gracias por inspirarme, motivarme y por ser ejemplos a seguir en mi camino profesional y personal.

Contenido

	Pág.
Resumen	12
Abstract.....	13
1. Introducción.....	14
2. Formulación del Problema	15
3. Justificación.....	16
4. Objetivos	17
4.1. Objetivo general.....	17
4.2. Objetivos específicos	17
5. Marco de referencia.....	18
5.1. Marco teórico	18
5.1.1 Teorías de Sostenibilidad y Desarrollo Sostenible	18
5.1.2 Economía Circular y Biomimética.....	19
5.1.3 Arquitectura vernácula.....	19
5.2. Estado de arte	20
5.2.1 Evaluación del Ciclo de Vida (ACV)	21
5.2.2 Aplicación de la ACV en la construcción de edificaciones: Importancia y relevancia.....	21
5.2.3 Guadua angustifolia en la Construcción	22
5.2.4 Emisiones de Carbono en la Construcción	23
5.2.5 Evaluación de las Emisiones de Carbono	23
5.2.6 Elección de Materiales Sostenibles.....	23
5.2.7 Prácticas de Construcción Eficientes	24
5.2.8 Normativas y Certificaciones Ambientales	24
6. Diseño.....	25
6.1. Descripción del proyecto	25
6.2. Diseño de las viviendas en Guadua y Materiales Tradicionales	25
6.3. Diseño de la vivienda en AUTOCAD y REVIT24.....	28

6.4.	Diseño de columnas para la vivienda en Guadua	35
6.5.	Sistema de muros para la vivienda en Guadua	37
6.5.1	Aspectos Técnicos Relevantes de la Vivienda en Guadua	38
6.6.	Sistema de cubierta para ambas viviendas.....	39
6.6.1	Aspectos Técnicos Relevantes.....	40
7.	Cálculos	41
7.1.	Combinación de cargas	41
7.1.1	Consideraciones Clave.....	41
7.1.2	Beneficios de un análisis estructural riguroso	42
7.2.	Cargas muertas.....	42
7.2.1	Metodología	42
7.2.2	Fórmula.....	43
7.3.	Cargas vivas	43
7.4.	Tipo de Suelo	44
7.4.1	Parámetros Normativos.....	44
7.4.2	Clasificación del Suelo	44
7.4.3	Análisis del Suelo	45
7.4.4	Impacto en el Diseño	45
7.4.5	Uso Residencial y Coeficiente de Importancia	45
7.5.	Sistema estructural	46
7.5.1	Componentes Clave	46
7.5.2	Ventajas del Sistema.....	46
7.5.3	Consideraciones de Diseño	47
7.6.	Evaluación del ciclo de vida	47
7.7.	Costos del ciclo de vida	50
7.7.1	Consideraciones adicionales	50
7.7.2	Comparativa de una casa en guadua y una tradicional	50
7.7.3	Análisis comparativo	55
7.8.	Impacto ambiental por el transporte de Guadua Angustifolia.	56
8.	Análisis de resultados	58
8.1.	Emisiones de Carbono	58

8.2.	Análisis Económico	58
8.3.	Impacto ambiental para el transporte de guadua angustifolia.....	58
9.	Recomendaciones	60
9.1.	Identificación de las Etapas Críticas	60
9.1.1	Estrategias de Reducción del Impacto	61
9.1.2	Hacia una Vivienda Sostenible y Resiliente	62
9.1.3	Eficiencia económica	62
10.	Conclusiones	63
11.	Referencias.....	64

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1 <i>Presupuesto de vivienda con materiales tradicionales</i>	53
--	----

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Diseño de la vivienda en Guadua vista frontal 3D SketchUp	26
Figura 2 Diseño de la vivienda en Guadua Vista 3D SketchUp.....	26
Figura 3 Diseño de la vivienda en Materiales Tradicionales Vista 3D (izquierda) Revit2024. ..	27
Figura 4 Diseño de la vivienda en Materiales Tradicionales Vista 3D (derecha) Revit2024.....	27
Figura 5 Diseño de la vivienda sin cubierta en Materiales Tradicionales en Revit2024.....	28
Figura 6 Distribución Arquitectónica de la vivienda en guadua AutoCAD.	29
Figura 7 Distribución Arquitectónica de la vivienda en Materiales Tradicionales Revit2024....	30
Figura 8 Distribución Arquitectónica 3D de la vivienda en Materiales Tradicionales Revit2024.....	31
Figura 9 Distribución de las guaduas en la Vivienda	32
Figura 10 Armazón Estructural y Cubierta de la vivienda en Materiales Tradicionales	32
Figura 11 Armazón Estructural con cimentación y Cubierta de la vivienda en Materiales Tradicionales.....	33
Figura 12 Vista frontal de la vivienda en Guadua AutoCAD.....	33
Figura 13 Vista frontal de la vivienda en Materiales Tradicionales Revit2024.	34
Figura 14 Vista Lateral de la vivienda en guadua	34
Figura 15 Vista Lateral de la vivienda Materiales Tradicionales Revit2024	35
Figura 16 Prototipo 1	36
Figura 17 Prototipo 2	36
Figura 18 Prototipo 3	37
Figura 19 Cargas Muertas de la cubierta	43
Figura 20 Cargas vivas mínimas uniformemente distribuidas.....	44
Figura 21 Cargas vivas Mínimas en cubiertas	44
Figura 22 Valores del coeficiente de importancia I.....	46
Figura 23 Datos de Ciclo de Vida para vivienda en Materiales Tradicionales.....	48
Figura 24 Datos de Ciclo de Vida para vivienda en Guadua.....	48
Figura 25 Ciclo de vida Carbón Biogénico	49

Figura 26 Presupuesto vivienda en guadua.....	51
Figura 27 Gráfico de costos	55
Figura 28 Gráfico de análisis.	55

Resumen

El presente estudio explora la viabilidad de construir viviendas sostenibles con guadua angustifolia en el departamento del Meta, Colombia. Se analiza el ciclo de vida de la vivienda, desde la producción de la guadua hasta su fin de vida, evaluando su impacto ambiental. Se realiza un análisis del ciclo de vida (ACV) de la vivienda, siguiendo las normas ISO 14040 e ISO 14044 y la NSR-10. Se recopilan datos sobre la producción, transporte, construcción, uso y mantenimiento de la guadua angustifolia. Se calculan las emisiones de carbono y otros impactos ambientales en cada etapa del ciclo de vida. Las etapas con mayor impacto ambiental son la producción y la construcción. Se identifican las actividades que generan la mayor cantidad de emisiones de carbono y otros impactos ambientales. Teniendo enfoque holístico que integra el diseño bioclimático, la construcción sostenible, el uso responsable de los recursos y la selección de materiales de bajo impacto ambiental es fundamental para crear un futuro más verde y habitable.

Palabras Clave: Análisis Ambiental, Ciclo De Vida, Construcción Sostenible, Guadua Angustifolia, Impacto Ambiental, Vivienda Sostenible.

Abstract

This study explores the feasibility of building sustainable housing with guadua angustifolia in the department of Meta, Colombia. The life cycle of the housing is analyzed, from the production of the guadua to its end of life, evaluating its environmental impact. A life cycle analysis (LCA) of the housing is carried out, following the ISO 14040 and ISO 14044 standards and NSR-10. Data is collected on the production, transportation, construction, use and maintenance of guadua angustifolia. Carbon emissions and other environmental impacts are calculated for each stage of the life cycle. The stages with the greatest environmental impact are production and construction. The activities that generate the greatest amount of carbon emissions and other environmental impacts are identified. Taking a holistic approach that integrates bioclimatic design, sustainable construction, responsible use of resources and selection of low environmental impact materials is fundamental to creating a greener, more livable future.

Key Word- Guadua Angustifolia, Sustainable Housing, Life Cycle, Environmental Analysis, Sustainable Construction, Environmental Impact.

1. Introducción

La construcción sostenible, la búsqueda de alternativas ecoeficientes y de bajo impacto ambiental se ha convertido en un imperativo para mitigar los efectos adversos de la actividad humana en el entorno. En este sentido, la *Guadua angustifolia*, un bambú nativo de América del Sur, ha emergido como una opción prometedora para la edificación sostenible. Su rápido crecimiento, propiedades estructurales excepcionales y baja huella ambiental la posicionan como un material de construcción viable.

Esta investigación bibliográfica se sumergió en la evaluación del ciclo de vida de edificaciones construidas con *Guadua angustifolia* en el departamento del Meta, Colombia. La evaluación no se limita a aspectos estructurales y estéticos, sino que abarca la totalidad del ciclo, desde la producción hasta la demolición, considerando las emisiones de carbono y los costos asociados.

La decisión de abordar este tema radica en la necesidad de comprender a fondo el impacto ambiental y económico de la *Guadua angustifolia* en la construcción de viviendas unifamiliares en una región específica. Con este propósito, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influyen las emisiones de carbono y los costos a lo largo del ciclo de vida de viviendas construidas con *Guadua angustifolia* en el departamento del Meta, en comparación con las edificaciones convencionales?

Para responder a esta interrogante, se llevará a cabo una evaluación minuciosa que abarcará desde la producción de la *Guadua* hasta la operación de las viviendas, incluyendo el transporte y los procesos constructivos. Este enfoque holístico permitirá identificar no solo las ventajas medioambientales sino también evaluar la viabilidad económica de esta alternativa constructiva.

2. Formulación del Problema

La construcción sostenible y la reducción de emisiones de carbono se han convertido en aspectos cruciales en la agenda global para mitigar el cambio climático y promover un desarrollo más sostenible. En este contexto, el uso de materiales de construcción alternativos y renovables ha ganado interés significativo. La *Guadua angustifolia*, una variedad de bambú nativa de América del Sur, ha emergido como una opción prometedora debido a su rápido crecimiento, abundancia y bajo impacto ambiental en comparación con materiales convencionales como el concreto y el acero (Cely Moreno y otros, 2012).

Sin embargo, a pesar de su potencial, la *Guadua angustifolia* todavía no ha sido ampliamente utilizada en la construcción en muchas regiones, incluyendo el departamento del Meta, Colombia (Velez, 2020). La falta de información y evidencia con respecto a su desempeño ambiental y su ciclo de vida en términos de emisiones de carbono representa un obstáculo importante para su adopción generalizada en proyectos de construcción.

Por lo tanto, surge la necesidad de realizar una evaluación del ciclo de vida basada en emisiones de carbono para edificaciones construidas con *Guadua angustifolia* en el departamento del Meta. Esta evaluación proporcionaría información crucial sobre el impacto ambiental de la construcción con *Guadua* en comparación con materiales tradicionales, permitiendo a los arquitectos, ingenieros y constructores tomar decisiones más informadas y sostenibles (Gutiérrez González y otros, 2017).

¿Cuál es el impacto ambiental en términos de emisiones de carbono y los costos a lo largo del ciclo de vida de viviendas construidas con *Guadua angustifolia* en el departamento del Meta y cómo se compara con las edificaciones convencionales, considerando aspectos como la producción, el transporte, los procesos constructivos y la operación?

3. Justificación

La implementación de formas de construcción sostenible, específicamente mediante el uso de *Guadua angustifolia* en las zonas rurales del departamento del Meta, Colombia, representa un compromiso significativo y multifacético con el desarrollo económico, social y ambiental de la región y del país en su conjunto. Este proyecto surge como una respuesta urgente y pertinente a los desafíos cada vez más apremiantes que enfrenta el mundo en términos de cambio climático, escasez de recursos naturales y necesidades básicas no cubiertas, como el acceso a viviendas dignas. Desde la perspectiva de futuros ingenieros civiles, nuestra participación en esta iniciativa no solo implica un ejercicio académico, sino un compromiso con la transformación positiva de nuestras comunidades y del entorno en el que vivimos.

La construcción sostenible se ha consolidado como un imperativo global, en consonancia con la urgencia de mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, el sector de la construcción desempeña un papel fundamental debido a su significativo impacto en el consumo de recursos naturales y en la generación de residuos y contaminación ambiental. La *Guadua angustifolia* emerge como una alternativa prometedora a los materiales de construcción convencionales, gracias a su rápido crecimiento, versatilidad y bajo impacto ambiental. Sin embargo, su adopción en la construcción, especialmente en regiones como el departamento del Meta, enfrenta desafíos significativos, entre ellos la falta de información técnica y científica que respalde su desempeño a lo largo de su ciclo de vida.

En este contexto, el proyecto no solo aspira a abordar el déficit de vivienda digna en las zonas rurales del departamento del Meta, sino también a sentar las bases para una práctica constructiva más responsable y sostenible. Nuestra colaboración busca explorar nuevas formas de construir que no solo sean resistentes y duraderas, sino también respetuosas con el medio ambiente y socialmente inclusivas. El uso de *Guadua angustifolia* como material de construcción representa una oportunidad única para promover la conservación de los recursos naturales y fomentar el desarrollo económico local, al tiempo que se mejora la calidad de vida de las comunidades rurales.

Es importante destacar que nuestro proyecto no se limita únicamente a consideraciones técnicas y científicas, sino que también reconoce la importancia de la participación comunitaria y el diálogo interdisciplinario. La construcción sostenible no es solo una cuestión de tecnología y materiales, sino también de valores, prácticas y relaciones sociales. Por lo tanto, esta labor involucra no solo la investigación y la innovación, sino también el compromiso con las comunidades locales, la capacitación y la transferencia de conocimientos.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar de manera integral las emisiones de carbono y los costos a lo largo del ciclo de vida de una vivienda unifamiliar construida con guadua en el departamento del Meta.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar las emisiones de carbono asociadas a la producción de Guadua angustifolia utilizada en la construcción de viviendas unifamiliares en el departamento del Meta.
- Realizar un análisis económico detallado para determinar los costos totales a lo largo del ciclo de vida de una vivienda unifamiliar construida con Guadua angustifolia.
- Analizar el impacto ambiental y las emisiones de carbono resultantes del transporte de la Guadua angustifolia desde su lugar de origen hasta el sitio de construcción.

5. Marco de referencia

5.1. Marco teórico

5.1.1 *Teorías de Sostenibilidad y Desarrollo Sostenible*

Las teorías de sostenibilidad y desarrollo sostenible, como la "triple dimensión" de la sostenibilidad, son especialmente relevantes para la investigación. Este enfoque reconoce la interdependencia entre el medio ambiente, la sociedad y la economía, aspecto que resuena con la evaluación del ciclo de vida de la construcción en *Guadua angustifolia*. Al considerar no solo los impactos ambientales, sino también las implicaciones sociales y económicas de esta forma de construcción, mi estudio puede contribuir a un enfoque más holístico y equilibrado del desarrollo urbano (Gutiérrez Garza, 2017).

Asimismo, la teoría de la resiliencia cobra relevancia en esta investigación. En un mundo marcado por el cambio climático y la incertidumbre ambiental, la capacidad de resistir y recuperarse de perturbaciones y cambios es crucial. Al evaluar la resiliencia de las edificaciones construidas en *Guadua angustifolia*, el estudio busca no solo entender su desempeño ambiental, sino también su capacidad para adaptarse y responder a los desafíos emergentes.

Por último, la teoría de la justicia ambiental es un aspecto clave que no puedo pasar por alto. La elección de materiales de construcción, como la *Guadua angustifolia*, puede tener implicaciones significativas en términos de equidad y distribución de beneficios y cargas ambientales (Gallopín, 2018). La investigación se compromete a examinar cómo estas decisiones afectan a diferentes grupos sociales y comunidades en el departamento del Meta, buscando promover un desarrollo más equitativo y sostenible.

Integrar estas teorías en el marco teórico no solo enriquecerá el estudio, sino que también proporcionará una comprensión más completa de la importancia y el impacto de la evaluación del ciclo de vida de la construcción en *Guadua angustifolia* en el contexto del desarrollo urbano sostenible.

5.1.2 Economía Circular y Biomimética

La economía circular propone un modelo de producción y consumo que se inspira en los sistemas naturales, donde los recursos se utilizan de manera eficiente y se minimiza la generación de residuos (Centro de Estrategia y Prospectivas Industrial (CEPI), 2023). En el contexto de la construcción sostenible, la economía circular aboga por la reutilización, el reciclaje y la remanufactura de materiales, fomentando la creación de ciclos cerrados donde los productos y materiales se mantienen en uso durante el mayor tiempo posible. Aplicado a la investigación, esto implica explorar cómo la *Guadua angustifolia* puede integrarse en sistemas circulares de construcción, desde su cultivo y cosecha hasta su reutilización y reciclaje al final de su vida útil.

Por otro lado, la biomimética busca imitar y aprender de los procesos biológicos y las estructuras naturales para diseñar soluciones innovadoras y sostenibles. En el caso de la *Guadua angustifolia*, este enfoque podría inspirar nuevas formas de aprovechar sus propiedades estructurales y funcionales en el diseño de edificaciones más eficientes y resistentes. La biomimética también puede informar estrategias de diseño que promuevan la integración armoniosa de la construcción con su entorno natural, aprovechando los principios de adaptación y eficiencia encontrados en la naturaleza.

Al incorporar la economía circular y la biomimética en la investigación, podré explorar nuevas posibilidades y enfoques para la construcción sostenible con *Guadua angustifolia*. Estos marcos conceptuales no solo ofrecen herramientas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los procesos de construcción, sino que también promueven una mayor armonía entre la actividad humana y el medio ambiente. En última instancia, el estudio aspira a contribuir a un enfoque más holístico y regenerativo de la construcción, que honre y respete los principios de la naturaleza en el diseño y la gestión de nuestros entornos construidos para viviendas de una planta.

5.1.3 Arquitectura vernácula

La arquitectura vernácula se refiere al estilo de construcción tradicional que se desarrolla en una región específica, utilizando materiales y técnicas disponibles localmente, así como adaptándose a las condiciones climáticas, culturales y sociales del lugar. Esta forma de arquitectura

ha existido a lo largo de la historia y refleja la sabiduría acumulada de las comunidades en relación con su entorno construido.

Uno de los aspectos más destacados de la arquitectura vernácula es su capacidad para integrarse armoniosamente con el medio ambiente circundante. Esto se logra mediante el uso de materiales locales, como madera, barro, piedra y paja, que están disponibles en abundancia y son sostenibles en términos de recursos (Pérez Gil, 2017). Estos materiales no solo se adaptan al entorno natural, sino que también pueden proporcionar un excelente aislamiento térmico y acústico, lo que contribuye a la comodidad y habitabilidad de los espacios construidos.

Además, la arquitectura vernácula suele reflejar las tradiciones culturales y estéticas de una comunidad en particular. Los diseños y detalles arquitectónicos pueden estar influenciados por creencias religiosas, prácticas sociales, rituales ceremoniales y la historia local. Esto crea una identidad única para cada región y fomenta un sentido de pertenencia y arraigo en sus habitantes.

Otro aspecto importante de la arquitectura vernácula es su adaptabilidad a las condiciones climáticas locales. Las técnicas de construcción y el diseño de los edificios se ajustan para aprovechar al máximo el sol, el viento y la lluvia, así como para protegerse de condiciones climáticas extremas, como calor intenso, frío intenso o fuertes vientos. Esto se logra mediante la orientación de los edificios, la creación de espacios sombreados, la ventilación cruzada y otros métodos pasivos de control climático.

5.2. Estado de arte

La construcción sostenible se ha erigido como un pilar fundamental en la lucha contra el cambio climático y la conservación de recursos naturales. En este contexto, la *Guadua angustifolia*, una variedad de bambú nativa de América del Sur, ha surgido como una alternativa prometedora a los materiales de construcción convencionales debido a su rápido crecimiento, versatilidad y, lo que es más relevante, su bajo impacto ambiental. En particular, su aplicación en la construcción de viviendas sostenibles se ha convertido en objeto de creciente interés.

5.2.1 *Evaluación del Ciclo de Vida (ACV)*

La evaluación del ciclo de vida (ACV) se ha consolidado como una metodología fundamental para medir el impacto ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida completo. Esta metodología no solo aborda las emisiones de carbono asociadas a la fase de operación de las edificaciones, sino que también se extiende a las etapas de producción de materiales, transporte, procesos constructivos y mantenimiento (Becerra bayona & Acevedo pabón, 2018). En esta búsqueda por reducir el impacto ambiental de la construcción, la Guadua angustifolia se presenta como un material sostenible que merece una evaluación minuciosa.

La ACV se basa en tres fases interrelacionadas:

1. **Inventario del Ciclo de Vida:** En esta etapa, se recopila y cuantifica exhaustivamente la información sobre todos los flujos de materiales, energía y emisiones asociados a la construcción de un edificio. Esto incluye desde la producción de materias primas, el transporte, los procesos constructivos hasta la operación y mantenimiento.
2. **Evaluación del Impacto Ambiental:** Una vez recopilados los datos en la fase de inventario, se evalúa el impacto ambiental en términos de emisiones de carbono, consumo de recursos naturales, contaminación del aire, agua y suelo, entre otros indicadores. Estos impactos se ponderan y se expresan en términos de categorías de impacto ambiental.
3. **Interpretación de Resultados:** Finalmente, los resultados de la ACV se interpretan y se utilizan para tomar decisiones informadas y estratégicas. Esto incluye la identificación de áreas de mejora y la implementación de medidas para reducir el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del edificio.

5.2.2 *Aplicación de la ACV en la construcción de edificaciones: Importancia y relevancia*

La construcción de edificaciones, la aplicación de la ACV es de suma importancia. Esto se debe a que la construcción representa una de las principales fuentes de emisiones de carbono y otros impactos ambientales significativos a nivel global (Rodríguez Miranda y otros, 2016). La ACV permite no solo evaluar el impacto ambiental de las edificaciones durante su vida útil, sino también considerar las etapas previas y posteriores a su uso activo.

5.2.3 *Guadua angustifolia en la Construcción*

La *Guadua angustifolia*, una variedad de bambú nativa de América del Sur, ha emergido como un material de construcción sostenible con un creciente interés debido a sus propiedades únicas y su bajo impacto ambiental. Diversas investigaciones han explorado las propiedades estructurales, térmicas y otras características clave de la *Guadua*, lo que la convierte en un candidato atractivo para la construcción sostenible, especialmente en el contexto del departamento del Meta (Toro-Arango y otros, 2023).

Propiedades Estructurales de la Guadua

- La *Guadua angustifolia* es conocida por su excepcional resistencia y rigidez, lo que la hace apta para diversas aplicaciones en la construcción. Investigaciones han demostrado que la *Guadua* tiene una alta relación resistencia-peso, lo que la convierte en un material estructural eficiente.
- Estudios de ingeniería estructural han evaluado la capacidad de carga de la *Guadua* y su comportamiento bajo diferentes cargas, lo que ha proporcionado información valiosa para su aplicación en la construcción de edificaciones, incluyendo viviendas.

Propiedades Térmicas y Ambientales

- La *Guadua angustifolia* también presenta propiedades térmicas notables. Su estructura porosa contribuye a un aislamiento térmico efectivo, lo que puede ser beneficioso para la eficiencia energética en las edificaciones.
- Además, la *Guadua* es un recurso renovable y de rápido crecimiento, lo que la hace respetuosa con el medio ambiente en comparación con materiales convencionales como el concreto y el acero.

Idoneidad en la Construcción de Viviendas

- Estudios anteriores han evaluado la idoneidad de la *Guadua angustifolia* en la construcción de viviendas, destacando su versatilidad y su capacidad para adaptarse a diferentes estilos arquitectónicos.

- La Guadua se ha utilizado en una variedad de proyectos de viviendas sostenibles en diferentes regiones de América Latina, lo que ha demostrado su aplicabilidad en diversas condiciones climáticas y geográficas.

5.2.4 Emisiones de Carbono en la Construcción

La construcción es una de las industrias que más contribuye a las emisiones de carbono a nivel mundial debido a su alto consumo de energía y recursos. La reducción de estas emisiones se ha convertido en una prioridad en la lucha contra el cambio climático (Aceves Gutiérrez y otros, 2021). Investigaciones previas han arrojado luz sobre estrategias para abordar este desafío y minimizar el impacto ambiental de las edificaciones.

5.2.5 Evaluación de las Emisiones de Carbono

- Las investigaciones han utilizado metodologías como la Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) para cuantificar y evaluar las emisiones de carbono asociadas a la construcción de edificios. Esto incluye la producción de materiales de construcción, el transporte, los procesos constructivos y la fase de operación.
- La identificación de las principales fuentes de emisiones de carbono en la construcción es esencial para desarrollar estrategias efectivas de reducción.

5.2.6 Elección de Materiales Sostenibles

- Se ha investigado la elección de materiales de construcción sostenibles como una estrategia clave para reducir las emisiones de carbono. La selección de materiales con una huella de carbono más baja, como la Guadua angustifolia, puede contribuir a una construcción más respetuosa con el medio ambiente.

5.2.7 *Prácticas de Construcción Eficientes*

- La optimización de los procesos constructivos y la implementación de prácticas eficientes también se han destacado como enfoques efectivos para reducir las emisiones de carbono. Esto incluye la gestión de residuos, la eficiencia energética en la obra y la elección de métodos de construcción sostenibles.

5.2.8 *Normativas y Certificaciones Ambientales*

- Investigaciones previas han examinado el papel de las normativas gubernamentales y las certificaciones ambientales en la promoción de prácticas constructivas más sostenibles y la reducción de emisiones de carbono en la construcción.

6. Diseño

6.1. Descripción del proyecto

Para evaluar las emisiones de carbono y los costos a lo largo del ciclo de vida de la construcción en *Guadua angustifolia*, se tomó como referencia el proyecto de grado denominado “*Diseño y construcción de un prototipo de vivienda de un piso con materiales no convencionales, como solución habitacional de una familia campesina en el municipio de Chinavita, Boyacá*” (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022). Los datos resultantes de la anterior investigación fueron insumos para la elaboración del presente documento.

En referencia al diseño, el prototipo de vivienda elaborado en este material, ofrece un ejemplo concreto de aplicación práctica de los principios de construcción sostenible en una familia vulnerable. El diseño arquitectónico, desarrollado mediante software como AutoCAD y SketchUp, refleja un enfoque centrado en satisfacer las necesidades básicas de una familia en Chinavita, Boyacá, mientras se maximiza la eficiencia de los recursos y se minimiza el impacto ambiental.

El énfasis en la distribución funcional del espacio, con dos habitaciones, cocina, sala-comedor y baño, responde directamente a las necesidades habitacionales de la familia beneficiada. Además, la inclusión de elementos como ventanas perimetrales para iluminación natural, instalación sanitaria en PVC y cubierta con teja arquitectónica a un agua demuestran consideraciones prácticas y de sostenibilidad en el diseño.

Aunque el proyecto no incluyó estudios de suelos debido a restricciones presupuestarias, esta decisión resalta la importancia de equilibrar la viabilidad económica con las necesidades habitacionales inmediatas. Además, el acceso a energía eléctrica y la planificación para el futuro crecimiento de la familia, como la inclusión de una ventana adicional para el baño, reflejan una visión holística y a largo plazo del diseño habitacional.

6.2. Diseño de las viviendas en Guadua y Materiales Tradicionales

Para el diseño de la vivienda en *guadua*, se tomó el del proyecto en mención, ya que será desde este punto que se inicie para investigar sobre la *guadua Angustifolia*. A raíz de que no se tiene el espacio y el presupuesto, se optó por esta opción cualitativa.

Figura 1 *Diseño de la vivienda en Guadua vista frontal 3D SketchUp*



Nota. diseño de la vivienda modelado el SketchUp, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

Figura 2 *Diseño de la vivienda en Guadua Vista 3D SketchUp*



Nota. diseño de la vivienda modelado el SketchUp, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

Para el diseño de la vivienda en materiales tradicionales, se utilizó el modelo arquitectónico de la vivienda en guadua con la diferencia de materiales empleados.

Figura 3 *Diseño de la vivienda en Materiales Tradicionales Vista 3D (izquierda) Revit2024.*

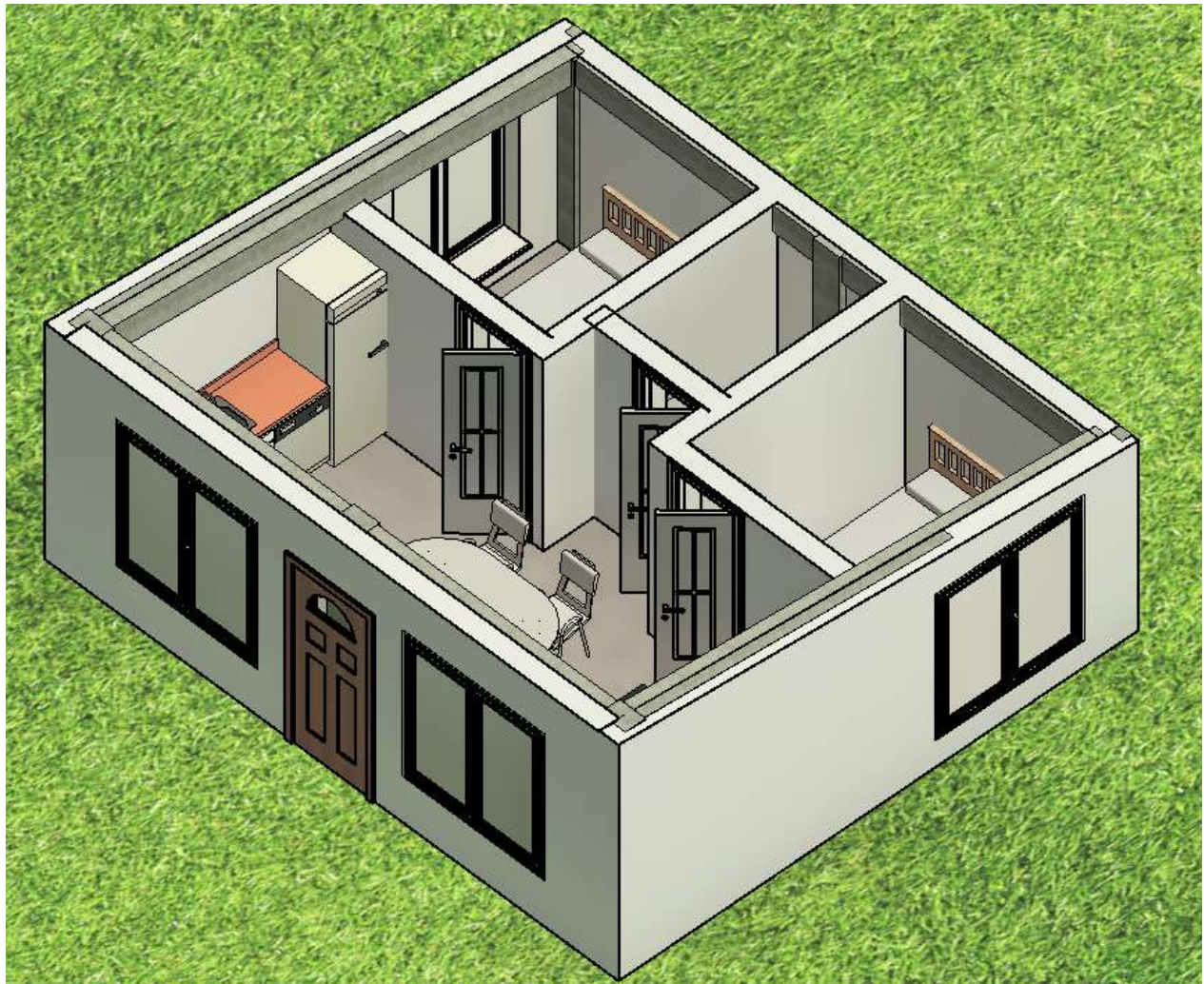


Nota. Diseño de la vivienda en Materiales Tradicionales.

Figura 4 *Diseño de la vivienda en Materiales Tradicionales Vista 3D (derecha) Revit2024*



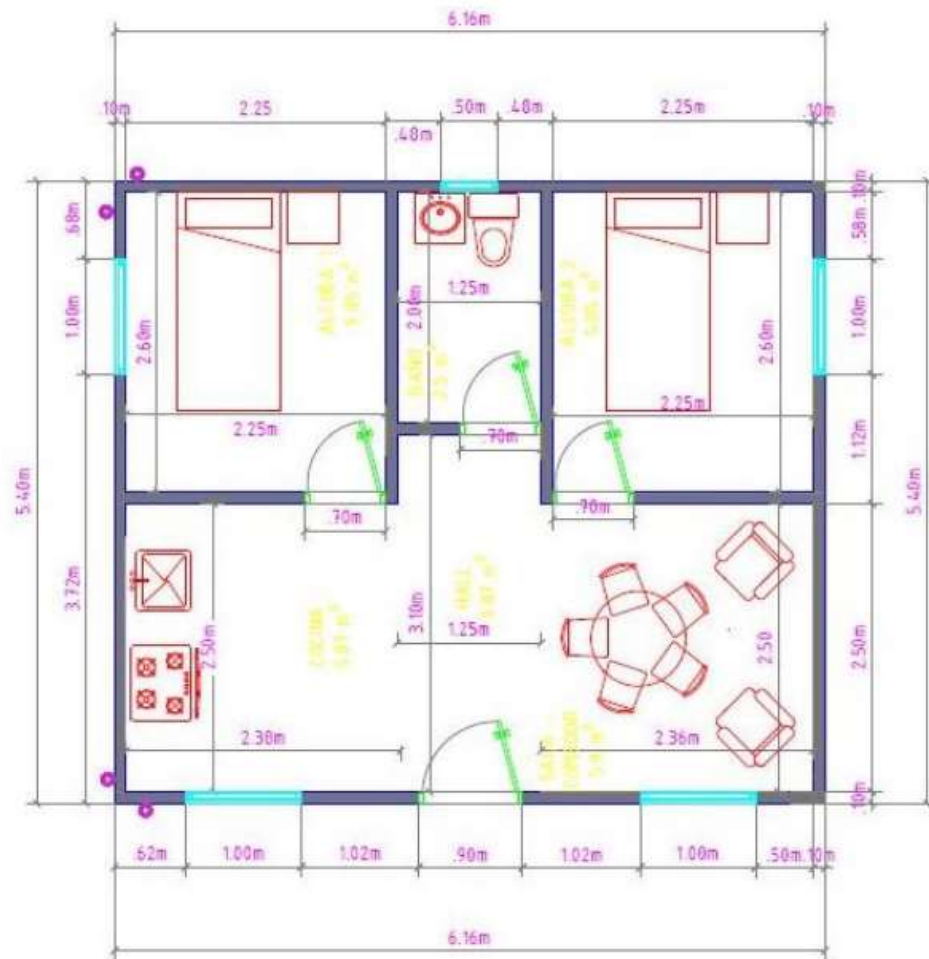
Nota. Diseño de la vivienda en Materiales Tradicionales.

Figura 5 *Diseño de la vivienda sin cubierta en Materiales Tradicionales en Revit2024*

Nota. Diseño de la vivienda sin cubierta en Materiales Tradicionales.

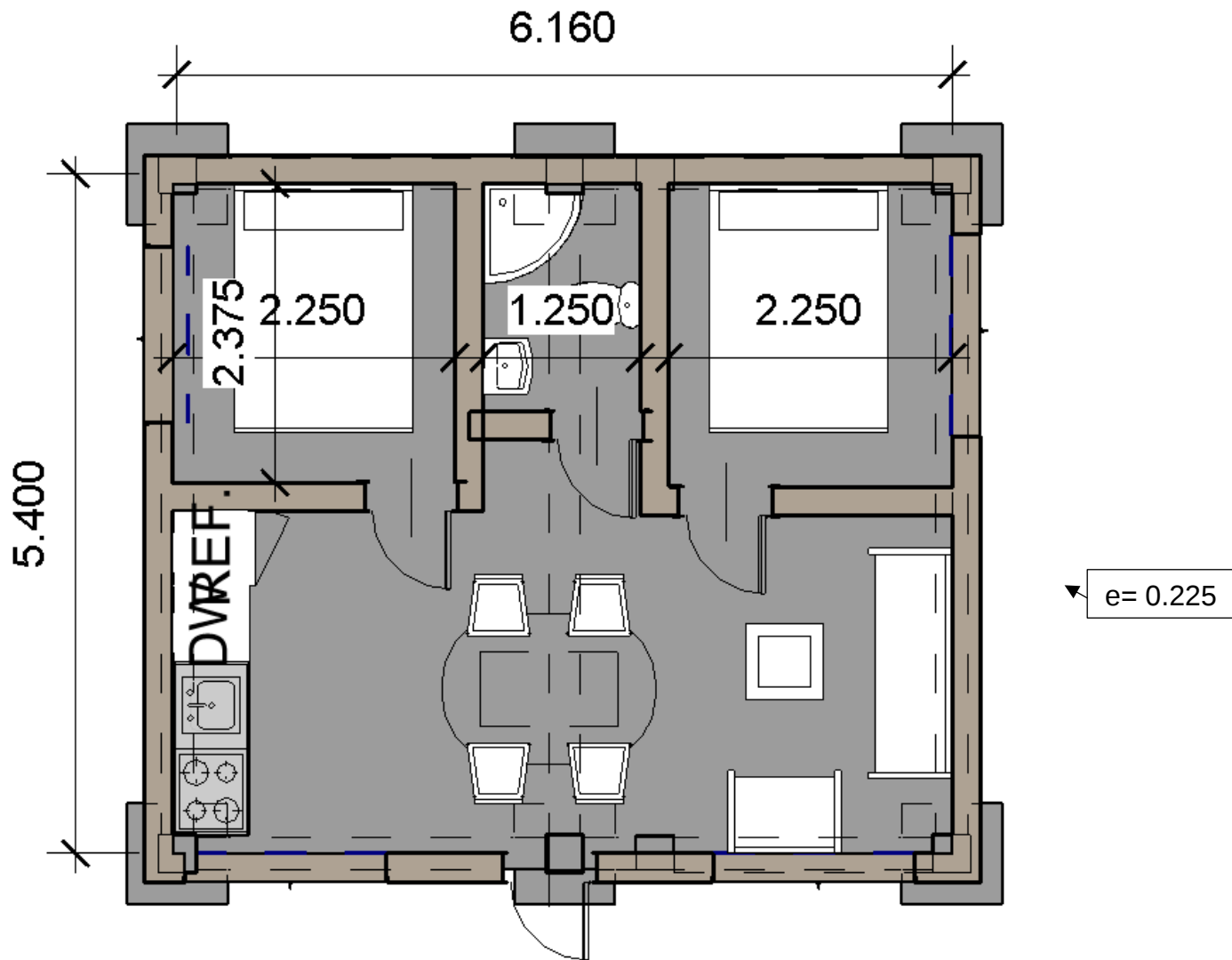
6.3. Diseño de la vivienda en AUTOCAD y REVIT24

Utilizando las capacidades del software AutoCAD, se llevó a cabo la elaboración del diseño arquitectónico correspondiente, detallando la distribución de espacios y la disposición de la *Guadua angustifolia*. Las guaduas fueron trazadas verticalmente como columnas, horizontalmente como vigas, y en diagonal como refuerzos para estabilizar las vigas horizontales. Este enfoque permitió una visualización detallada de cada elemento especificado dentro del diseño propuesto, brindando una comprensión clara de la estructura y distribución del proyecto de vivienda.

Figura 6 Distribución Arquitectónica de la vivienda en guadua AutoCAD.

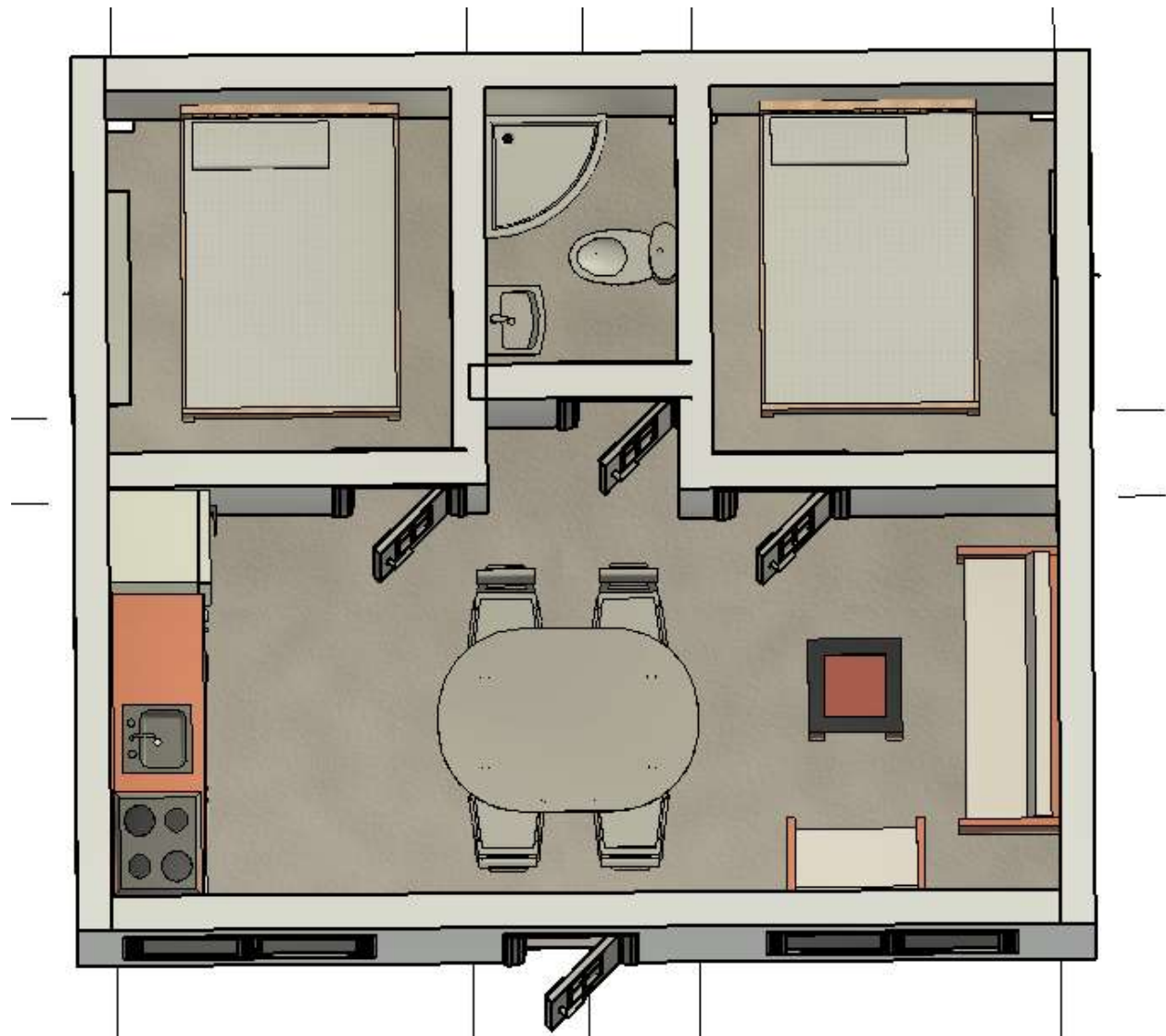
Nota. Distribución vivienda en AutoCAD, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

Teniendo en cuenta el modelo de vivienda propuesto en el proyecto en mención. Se realizó el mismo diseño en Revit2024 para una vivienda con la misma distribución, medidas, ubicación de ventanas y puertas, y demás características con el fin de tener dos diseños iguales, pero con materiales distintos.

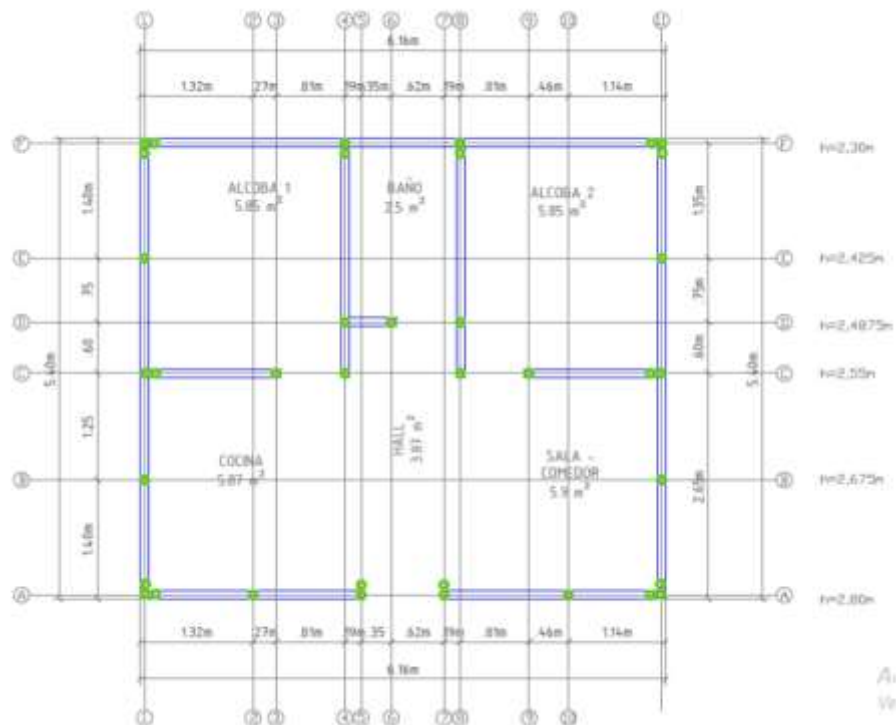
Figura 7 Distribución Arquitectónica de la vivienda en Materiales Tradicionales Revit2024.

Nota. Distribución vivienda en Materiales Tradicionales Revit2024.

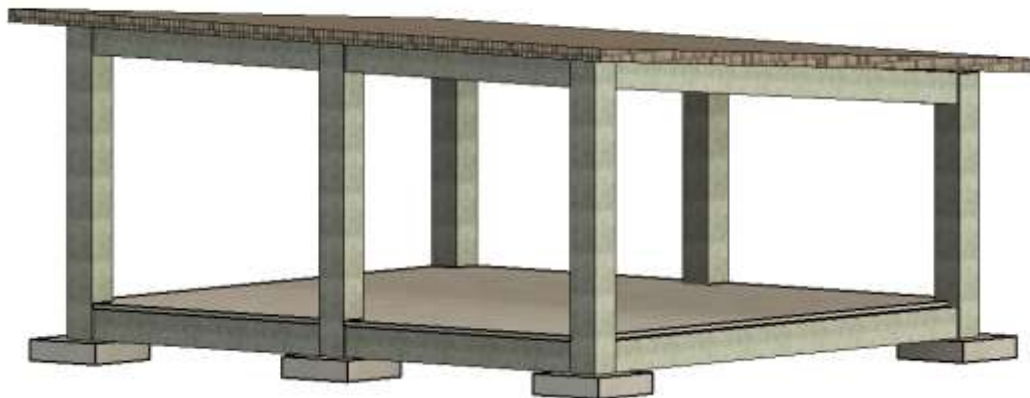
Figura 8 Distribución Arquitectónica 3D de la vivienda en Materiales Tradicionales Revit2024.



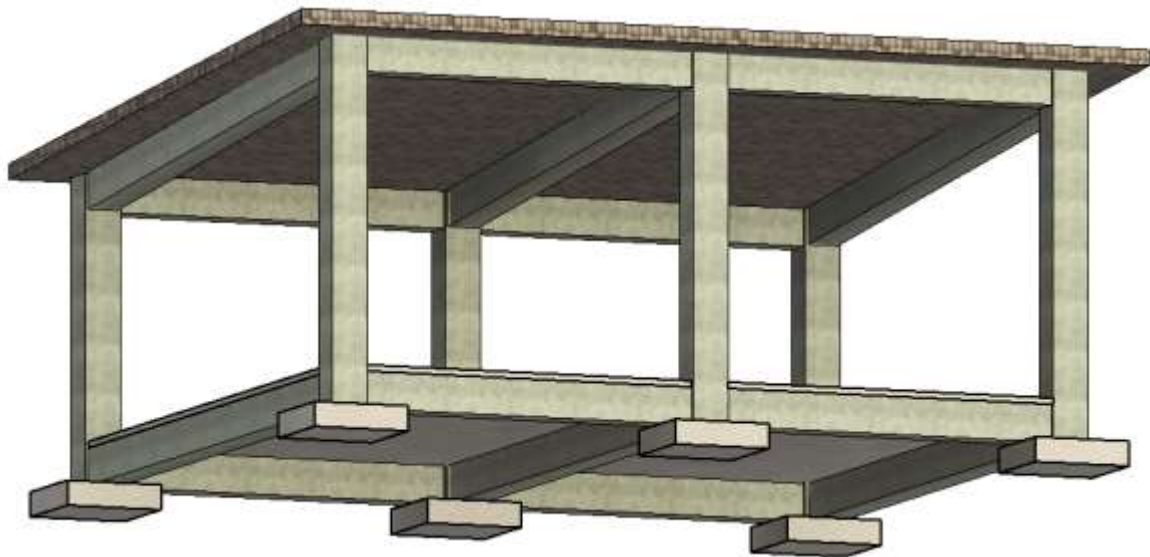
Nota. Distribución vivienda 3D en Materiales Tradicionales Revit2024

Figura 9 Distribución de las guaduas en la Vivienda

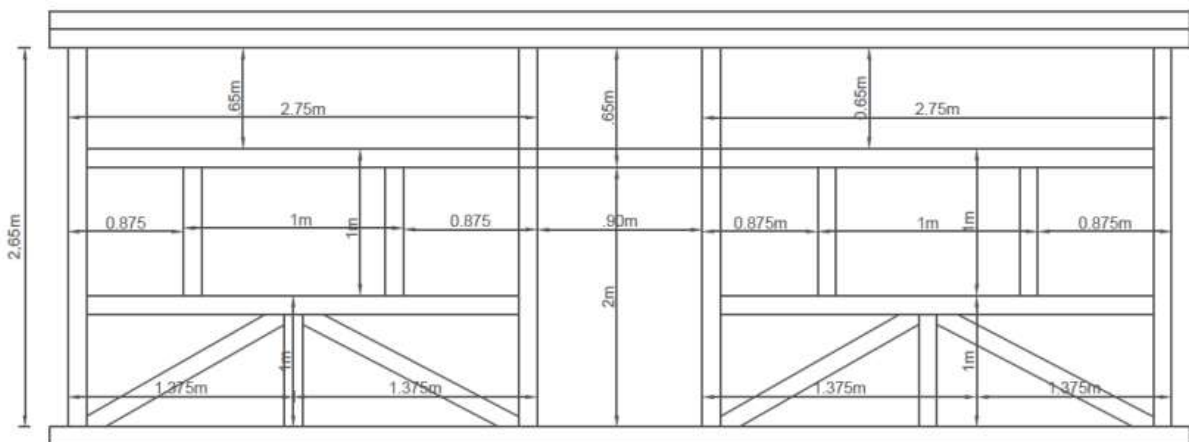
Nota. Distribución de las guaduas en la Vivienda, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

Figura 10 Armazón Estructural y Cubierta de la vivienda en Materiales Tradicionales

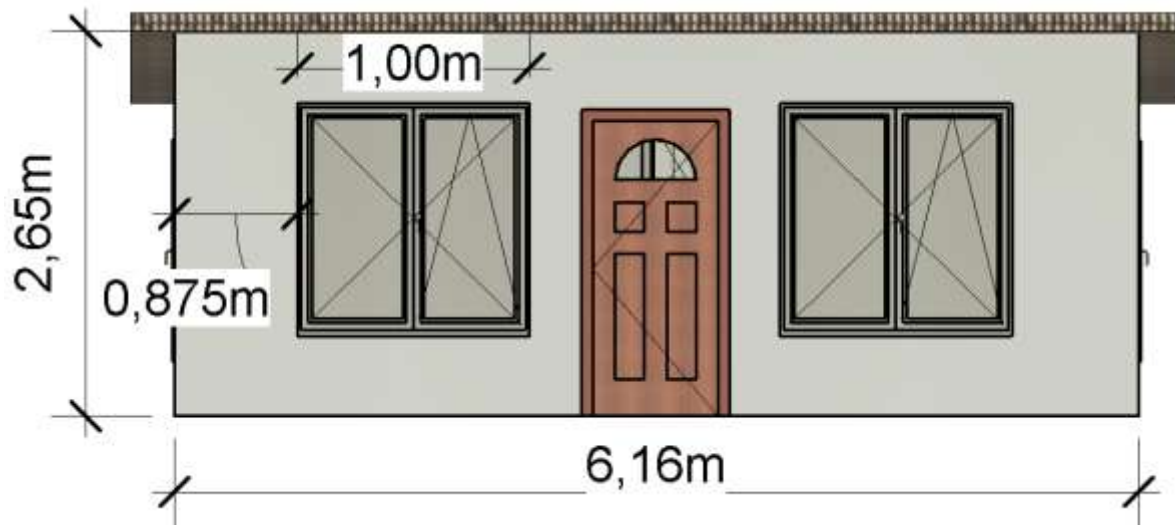
Nota. Armazón estructural y cubierta de la vivienda en Materiales Tradicionales.

Figura 11 Armazón Estructural con cimentación y Cubierta de la vivienda en Materiales Tradicionales

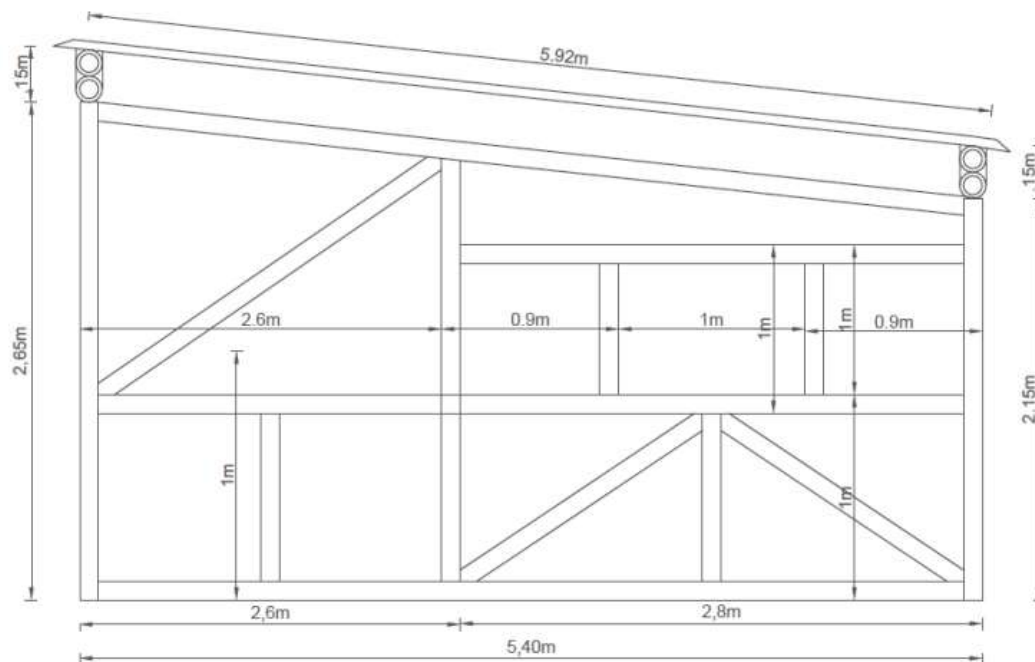
Nota. Armazón estructural y cubierta de la vivienda en Materiales Tradicionales.

Figura 12 Vista frontal de la vivienda en Guadua AutoCAD

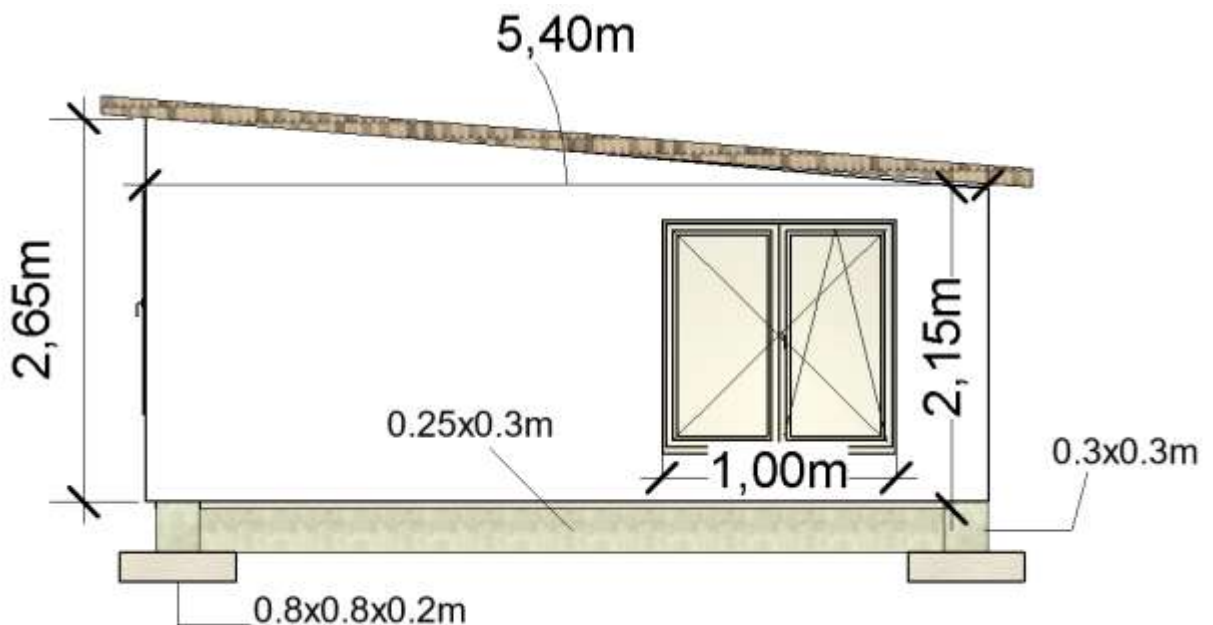
Nota. Vista frontal de la vivienda, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

Figura 13 Vista frontal de la vivienda en Materiales Tradicionales Revit2024.

Nota. Vista frontal de la vivienda en materiales tradicionales, fuente propia.

Figura 14 Vista Lateral de la vivienda en guadua

Nota. Vista Lateral de la vivienda, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

Figura 15 Vista Lateral de la vivienda Materiales Tradicionales Revit2024

Nota. Vista Lateral vivienda en materiales tradicionales, fuente propia.

6.4. Diseño de columnas para la vivienda en Guadua

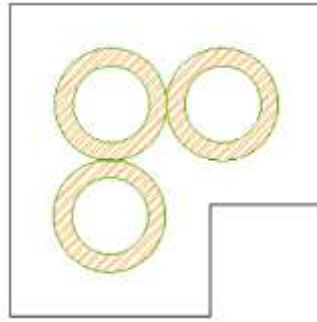
Para el diseño de las columnas de la vivienda en *Guadua angustifolia* se tomó como referencia el análisis estructural realizado en el proyecto anteriormente mencionado del prototipo de vivienda en este material en Chinavita, Boyacá.

El diseño y análisis de tres prototipos de columnas para una vivienda unifamiliar, considerando las necesidades específicas de carga en cada sección de la estructura. Se busca optimizar la eficiencia estructural y la estética del diseño utilizando bambú como material principal, sin generar contaminación ni huella de carbono al ecosistema.

1. **Análisis de cargas:** Se realizó un análisis detallado de las cargas muertas, vivas y accidentales que actúan sobre la estructura de la vivienda en cada sección.
2. **Diseño de prototipos:** Se diseñaron tres prototipos de columnas con diferentes configuraciones de bambú, atendiendo a las necesidades de carga y resistencia en cada zona:

- **Prototipo 1 (Columnas perimetrales):** Consta de tres guaduas unidas en las esquinas de la vivienda, funcionando como una sola columna. Esta configuración ofrece alta resistencia y soporte a vigas, cubierta y otras cargas.

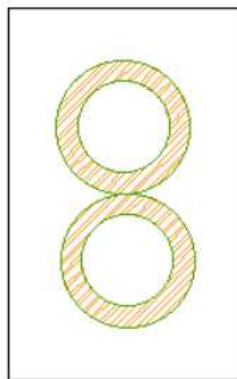
Figura 16 Prototipo 1



Nota. Prototipo de columnas perimetrales, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

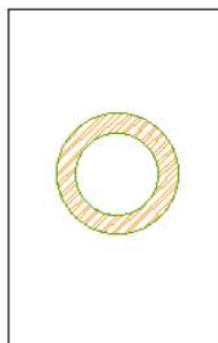
- **Prototipo 2 (Columnas interiores):** Compuesto por dos guaduas unidas en forma de "H", ideal para zonas con cargas intermedias.

Figura 17 Prototipo 2



Nota. Prototipo de columnas interiores, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

- **Prototipo 3 (Columnas de soporte):** Formado por una guadua en forma cuadrada, diseñado para soportar grandes cargas puntuales.

Figura 18 Prototipo 3

Nota. Prototipo de columnas de soporte, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

6.5. Sistema de muros para la vivienda en Guadua

El sistema de muros implementado en el proyecto anteriormente mencionado, se basa en la técnica ancestral del "bahareque encementado", reinterpretada y optimizada para ofrecer una solución estructural robusta y sostenible. El diseño se fundamenta en la sinergia entre tres elementos clave:

- 1. Esqueleto:** Formado por esterilla de guadua, material natural de alta resistencia y flexibilidad, que actúa como armazón principal del muro.
- 2. Refuerzo:** Se emplea una malla de alambre galvanizado, estratégicamente clavada o anclada a la esterilla con puntillas y grapas cada 10 y 5 cm respectivamente. La malla aporta cohesión y estabilidad al conjunto, fortaleciendo la estructura contra cargas y esfuerzos.
- 3. Revestimiento:** Se aplica un revoque de mortero de cemento sobre la malla, creando una capa protectora y estética que sella el muro, impermeabiliza la superficie y mejora la resistencia a la intemperie.

Ventajas y Beneficios de la Vivienda en Guadua: Con el fin de resaltar algunas de las ventajas de este material.

- **Eficiencia Estructural:** El diseño optimizado del entramado de guadua y la integración de la malla metálica generan un sistema altamente resistente a las fuerzas compresivas, de flexión y cortante, garantizando la seguridad y estabilidad del muro.
- **Sostenibilidad:** El uso de la guadua como material principal reduce significativamente la huella de carbono en comparación con materiales tradicionales como el ladrillo o el

concreto. La guadua es un recurso renovable de rápido crecimiento y bajo impacto ambiental.

- **Flexibilidad y Adaptabilidad:** El sistema se adapta a diferentes necesidades de diseño y construcción, permitiendo la creación de muros de diversas formas, alturas y espesores, satisfaciendo las exigencias específicas del proyecto.
- **Confort Ambiental:** La guadua posee propiedades naturales de aislamiento térmico y acústico, contribuyendo a un ambiente interior más confortable y energéticamente eficiente.
- **Estética Natural:** La textura y el color natural de la guadua aportan una estética única y distintiva a los espacios, integrando la construcción al entorno natural de forma armoniosa.

6.5.1 Aspectos Técnicos Relevantes de la Vivienda en Guadua

- **Materiales:**
 - Esterilla de guadua: Seleccionada por su alta resistencia a la tracción y compresión, flexibilidad y durabilidad.
 - Malla de alambre galvanizado: Brinda refuerzo y cohesión al sistema, asegurando la estabilidad estructural.
 - Mortero de cemento: Compuesto por cemento, arena y agua, crea una capa protectora y resistente a la intemperie.
- **Proceso de Construcción:**
 - **Preparación de la esterilla:** Se seleccionan y ensamblan las varas de guadua para formar la esterilla, siguiendo patrones específicos para garantizar la resistencia.
 - **Colocación de la malla:** La malla se fija a la esterilla con puntillas y grapas, creando una estructura rígida y uniforme.
 - **Revoque de mortero:** Se aplica una capa de mortero de cemento sobre la malla, sellando y protegiendo el muro, además de mejorar su estética.
- **Consideraciones de Diseño:**
 - Espesor del muro: Se define en función de las necesidades estructurales y de aislamiento térmico.

- Altura del muro: Se determina considerando las cargas a soportar y la altura total de la edificación.
- Tipo de cimentación: Se selecciona en base a las características del terreno y las cargas del muro.

6.6. Sistema de cubierta para ambas viviendas

El sistema de cubierta es el mismo para ambas viviendas al igual que otros parámetros de diseño, esto con el fin de lograr que ambas viviendas compartan equitativamente las mismas dimensiones, aquellos materiales que, por durabilidad, comodidad, factibilidad o alguna otra razón fundamentada no puedan ser reemplazados por la guadua angustifolia serán compartidos o reemplazados. De esta manera se logra tener un análisis económico más justo con ambos tipos de construcción.

La cubierta se concibe como un sistema integral que aborda funcionalidad, estética y eficiencia. Se caracteriza por:

- **Forma:** Diseño a un agua con pendiente adecuada para evacuar eficientemente el agua lluvia y evitar empozamientos.
- **Material de Cubierta:** Teja arquitectónica, seleccionada por su resistencia a la intemperie, durabilidad y atractivo estético.
- **Estructura:** Sistema de vigas de guadua apiladas y dispuestas estratégicamente para soportar la teja y asegurar su correcta instalación.

Ventajas y Beneficios:

- **Protección Eficaz:** La pendiente y la teja arquitectónica garantizan la impermeabilización total de la vivienda, protegiéndola de la lluvia, el viento y la nieve.
- **Durabilidad:** Los materiales empleados, guadua y teja, son altamente resistentes a la intemperie, asegurando una larga vida útil de la cubierta.
- **Eficiencia Estructural:** El diseño optimizado de las vigas de guadua proporciona la resistencia necesaria para soportar el peso de la teja y las cargas adicionales (viento, nieve).
- **Estética:** La combinación de la guadua y la teja crea una estética natural y elegante, integrando la vivienda al entorno de forma armoniosa.

- **Confort Ambiental:** La pendiente de la cubierta permite la ventilación natural, contribuyendo a un ambiente interior más fresco y agradable.

6.6.1 Aspectos Técnicos Relevantes

- **Materiales:**
 - Teja arquitectónica: Disponible en diversos materiales (cerámica, concreto, metal) y estilos, se selecciona según las preferencias estéticas y las condiciones climáticas.
- **Proceso de Construcción para vigas de cubierta en Guadua:**
 - **Instalación de las vigas de guadua:** Se apilan y fijan de forma estratégica para crear la estructura portante de la cubierta.
 - **Colocación de la teja:** Se instala sobre las vigas de guadua, siguiendo las recomendaciones del fabricante para garantizar la impermeabilización.
 - **Remates y detalles:** Se instalan elementos adicionales como canaletas, bajantes y remates para asegurar el correcto funcionamiento de la cubierta.
- **Consideraciones de Diseño:**
 - Pendiente de la cubierta: Se define en función de la intensidad de las lluvias y el material de la teja.
 - Espesor de las vigas: Se determina considerando las cargas a soportar y la distancia entre apoyos.
 - Tipo de teja: Se selecciona en base a las condiciones climáticas, la estética deseada y el presupuesto disponible.

7. Cálculos

7.1. Combinación de cargas

Para el diseño estructural de la vivienda en guadua del proyecto en mención, se fundamenta en un análisis estructural exhaustivo que cumple con la normativa NSR-10, específicamente el Título B, apartado B.2.3-1 "Combinaciones Básicas". Este apartado define las combinaciones de cargas que se deben considerar para garantizar la seguridad y la resistencia de la edificación ante diferentes escenarios.

7.1.1 Consideraciones Clave

- **Cargas:** Se tienen en cuenta las siguientes cargas:
 - **D:** Carga muerta, peso propio de la estructura y elementos permanentes.
 - **L:** Carga viva, peso variable de personas, muebles y objetos.
 - **Lr:** Carga viva sobre la cubierta, nieve o viento.
 - **Ey:** Sismo en la dirección Y.
 - **Ex:** Sismo en la dirección X.
- **Combinaciones de Cargas:** Se analizan las siguientes combinaciones:
 - **1.4 D:** Mayor carga muerta para verificar la capacidad de la estructura.
 - **1.2 D + 1.6 Lr + 0.5 L:** Combinación para evaluar la resistencia ante cargas vivas y sismo en una dirección.
 - **1.2 D + 1.6 L:** Combinación para evaluar la resistencia ante cargas vivas.
 - **1.2 D – 1.0 Ex – 0.3 Ey + 1.0 L:** Combinación para evaluar la resistencia ante sismo en dirección X, con cargas vivas y reducción de sismo en dirección Y.
 - **1.2 D – 1.0 Ex + 0.3 Ey + 1.0 L:** Similar a la anterior, pero con sismo en dirección Y.
 - **1.2 D – 1.0 Ey - 0.3 Ex + 1.0 L:** Similar a la anterior, pero con reducción de sismo en dirección X.
 - **1.2 D – 1.0 Ey + 0.3 Ex + 1.0 L:** Similar a la anterior, pero con sismo en dirección X.

- **1.2 D + 1.0 Ex + 0.3 Ey + 1.0 L:** Combinación para evaluar la resistencia ante sismo en dirección X, con cargas vivas y aumento de sismo en dirección Y.
- **1.2 D + 1.0 Ey + 0.3 Ex + 1.0 L:** Similar a la anterior, pero con sismo en dirección Y.
- **D + L:** Combinación básica para verificar la capacidad de la estructura bajo cargas muertas y vivas.

7.1.2 *Beneficios de un análisis estructural riguroso*

- **Seguridad:** La vivienda estará preparada para soportar las cargas previstas en la normativa, garantizando la seguridad de sus ocupantes.
- **Durabilidad:** La estructura tendrá una vida útil más larga gracias a su capacidad para resistir las fuerzas y deformaciones.
- **Eficiencia:** Se optimiza el diseño utilizando la cantidad de material necesaria para cumplir con los requisitos de seguridad.
- **Confort:** Se minimizan las vibraciones y deformaciones de la estructura, mejorando el confort de los ocupantes.

7.2. Cargas muertas

La carga muerta, definida en la NSR-10 como el peso propio de la estructura y de todos los materiales de construcción permanentes, es un factor crucial para el diseño y la seguridad de una edificación. Este análisis se enfoca en la estimación precisa de las cargas muertas en la cubierta de guadua y teja, utilizando un método basado en el peso específico y el volumen de los elementos.

7.2.1 *Metodología*

Cálculo de la carga muerta de la guadua:

- Se determina el peso específico de la guadua (kg/m^3).
- Se calcula el volumen de la guadua por metro cuadrado de cubierta (m^3/m^2).

- Se multiplica el peso específico por el volumen para obtener la carga muerta de la guadua (kg/m^2).

Cálculo de la carga muerta de la teja:

- Se determina el peso por unidad de área de la teja (kg/m^2).
- Se multiplica el peso por unidad de área por el área total de la cubierta (m^2) para obtener la carga muerta de la teja (kg).

Carga muerta total:

- Se suma la carga muerta de la guadua y la carga muerta de la teja para obtener la carga muerta total de la cubierta (kg/m^2).

7.2.2 Fórmula

Carga muerta total = (Peso específico guadua * Volumen guadua) + (Peso por unidad de área teja * Área cubierta)

Figura 19 Cargas Muertas de la cubierta

<i>ESTIMACIÓN DE CARGAS MUERTAS</i>		
Guadua cubierta	0,162862087	KN/m ²
Teja Arquitectónica en Zinc	0,0385	KN/m ²
Total	0,201362087	KN/m ²
Carga en cada Columna	0,020136209	KN/m ²

Nota. Cargas Muertas de la cubierta, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

7.3. Cargas vivas

Las cargas vivas, definidas en la NSR-10 como las fuerzas variables que actúan sobre la estructura debido al uso y ocupación de la edificación, son un factor importante en el diseño estructural. Este análisis se enfoca en la estimación precisa de las cargas vivas para una vivienda, considerando diferentes escenarios de uso y ocupación.

Figura 20 Cargas vivas mínimas uniformemente distribuidas

Ocupación o uso		Carga uniforme (kN/m ²) m ² de área en planta	Carga uniforme (kgf/m ²) m ² de área en planta
Residencial	Cuartos privados y sus corredores	1.8	180

Nota. Cargas vivas mínimas uniformemente distribuidas, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

Figura 21 Cargas vivas Mínimas en cubiertas

Tipo de cubierta	Carga uniforme (kN/m ²) m ² de área en planta	Carga uniforme (kgf/m ²) m ² de área en planta
Cubiertas inclinadas con más de 15° de pendiente en estructura metálica o de madera con imposibilidad física de verse sometidas a cargas superiores a la aquí estipulada	0.35	35

Nota. Cargas vivas Mínimas en cubiertas, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

7.4. Tipo de Suelo

El estudio del tipo de suelo es fundamental para el diseño y construcción del prototipo de vivienda, ya que este determina las características geotécnicas que influyen en la capacidad portante del terreno y, por ende, en la estabilidad de la edificación.

7.4.1 Parámetros Normativos

La Norma Sismorresistente Colombiana NSR-10 establece los parámetros y requisitos para el diseño y construcción de estructuras en Colombia. En el caso del tipo de suelo, la NSR-10 lo define como uno de los aspectos a considerar para determinar la categoría sísmica del proyecto.

7.4.2 Clasificación del Suelo

Para la clasificación del suelo, se recomienda realizar estudios geotécnicos que incluyan:

- **Ensayos de laboratorio:**
 - Densidad del suelo.
 - Granulometría.
 - Límites de Atterberg.
 - Resistencia al corte.

- **Ensayos de campo:**
 - Penetración estándar (SPT).
 - Presión de cono (CPT).

7.4.3 *Análisis del Suelo*

Con base en los resultados de los estudios geotécnicos, se puede clasificar el suelo según la NSR-10 en:

- **Suelo Tipo S:** Suelos rocosos o suelos granulares densos.
- **Suelo Tipo A:** Suelos arenosos o limosos con baja plasticidad.
- **Suelo Tipo B:** Suelos arcillosos de plasticidad media a alta.
- **Suelo Tipo C:** Suelos expansivos o licuables.

7.4.4 *Impacto en el Diseño*

El tipo de suelo determina las siguientes variables en el diseño de la vivienda:

- **Capacidad portante:** Define la carga máxima que el suelo puede soportar sin sufrir deformaciones excesivas.
- **Profundidad de cimentación:** Determina la profundidad a la que se debe instalar la cimentación para garantizar la estabilidad de la edificación.
- **Tipo de cimentación:** Define el tipo de cimentación más adecuado para el tipo de suelo y las cargas que debe soportar.

7.4.5 *Uso Residencial y Coeficiente de Importancia*

De acuerdo con la NSR-10, la vivienda se clasifica como un uso residencial, que pertenece al Grupo de Uso I. La Tabla A.2.5-1 de la norma establece un coeficiente de importancia de 1.0 para este tipo de uso, lo que indica que la edificación debe diseñarse para resistir un evento sísmico de mayor intensidad.

Figura 22 *Valores del coeficiente de importancia I***Tabla A.2.5-1**
Valores del coeficiente de importancia, I

Grupo de Uso	Coeficiente de Importancia, I
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

Nota. Coeficiente de importancia, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

7.5. Sistema estructural

El sistema estructural del prototipo de vivienda se basa en una combinación de guadua y bahareque encementado/esterilla de guadua, creando una estructura sismorresistente eficiente y sostenible. La disposición estratégica de los elementos estructurales permite la transmisión de cargas y esfuerzos hacia la cimentación, garantizando la estabilidad y seguridad de la vivienda.

7.5.1 Componentes Clave

- **Vigas y columnas de guadua:** La guadua, por su resistencia y flexibilidad, se utiliza para la construcción de las vigas y columnas que conforman el esqueleto estructural.
- **Muros de bahareque encementado/esterilla de guadua:** Estos muros aportan rigidez lateral a la estructura, además de brindar cerramiento y aislamiento térmico.
- **Cubierta en tejas arquitectónicas:** La cubierta protege la vivienda de las inclemencias del clima y complementa la estética del diseño.
-

7.5.2 Ventajas del Sistema

- **Sismorresistencia:** La combinación de guadua y bahareque encementado/esterilla de guadua crea una estructura capaz de resistir las fuerzas sísmicas.
- **Eficiencia estructural:** La disposición estratégica de los elementos optimiza el uso de materiales, reduciendo costos y maximizando la eficiencia.
- **Sostenibilidad:** La guadua es un material natural renovable y de bajo impacto ambiental, lo que contribuye a la sostenibilidad del proyecto.

- **Flexibilidad de diseño:** El sistema permite adaptar la vivienda a diferentes necesidades y estilos arquitectónicos.

7.5.3 Consideraciones de Diseño

- **Selección de la guadua:** Se debe seleccionar guadua de alta calidad, libre de defectos y con las dimensiones adecuadas para cada elemento estructural.
- **Dimensionamiento de los elementos:** El dimensionamiento de las vigas, columnas y muros debe realizarse por un ingeniero o arquitecto con experiencia en estructuras de guadua.
- **Uniones y conexiones:** Las uniones entre los diferentes elementos del sistema estructural deben ser cuidadosamente diseñadas y ejecutadas para garantizar la resistencia y estabilidad de la estructura.
- **Cimentación:** La cimentación debe ser adecuada para el tipo de suelo y las características de la estructura.

7.6. Evaluación del ciclo de vida

El análisis permitió determinar cuál material tiene un menor impacto ambiental para la construcción de edificios. La guadua angustifolia es la mejor opción desde el punto de vista ambiental, aunque también se deben considerar otros factores como la resistencia mecánica, la durabilidad y el costo.

En el siguiente análisis se incluyen los valores de carbón incorporado en toneladas (tCO₂e) para los distintos materiales de ambas viviendas en las siguientes etapas de su ciclo de vida:

- **A1, A2, A3:** Corresponden a las emisiones de carbono generadas en las etapas de fabricación o producción según corresponda para cada material.
- **A4:** Corresponde a las emisiones generadas en el transporte del material desde su lugar de producción y/o fabricación, hasta el sitio de obra.
- **A5:** Corresponde a las emisiones de carbono generadas por el material en la instalación y/o construcción en obra del material.

A continuación, se realiza una conversión de cantidades tomando como referencia los datos obtenidos en el artículo de investigación que lleva por título *Comparative analysis of the sustainability and seismic performance of a social interest house using RC moment frames and bahareque as structural systems* (Tello Ayala y otros, 2023), en donde se reemplazan las cantidades de material empleadas en cada una de las viviendas, las cuales se encuentran en los presupuestos correspondientes. Para el caso que corresponde a la vivienda en guadua las cantidades se plasman en la figura 26 y en la tabla 1 el cálculo de presupuesto final para la vivienda en materiales tradicionales.

En ambos casos, se calcula la cantidad de carbón incorporado para cada uno de los modelos, obteniendo un valor total final, el cual corresponde a la sumatoria del carbón incorporado de todos los materiales.

Figura 23 Datos de Ciclo de Vida para vivienda en Materiales Tradicionales

Datos de Ciclo de Vida para vivienda en Materiales Tradiconales				
Descripción	Especificación	Volumen (m3) o masa (kg)	Cantidad de material (m3, kg)	Carbón Incorporado (tCO2e)
Cimentación	$f_c = 21 \text{ Mpa}$	Volumen (m3)	2,68	0,9
Vigas			1,91	0,7
Columnas			1,30	0,5
Loza Base			1,66	0,6
Barra Acero #4	$f_y = 420 \text{ Mpa}$	Masa (kg)	1019,316	0,9
Valor total de Carbón Incorporado (tCO2e)				3,5

Nota.: Datos Ciclo de vida.

Figura 24 Datos de Ciclo de Vida para vivienda en Guadua

Datos de Ciclo de Vida para vivienda en Guadua					
Descripción	Especificación	Volumen (m3) o masa (kg)	Cantidad de material (m3, kg)	Carbón Incorporado (tCO2e)	Carbono biogenico (tCO2e)
Vigas	Guadua $f_c = 34 \text{ Mpa}$	Volumen (m3)	0,37	0,2	-0,4292
Columnas	Guadua $f_c = 34 \text{ Mpa}$		0,86	0,5	-0,9976
Loza Base	$f_c = 21 \text{ Mpa}$		1,66	0,6	0
Acero Refuerzo	$f_y = 420 \text{ Mpa}$	kg	178,90	0,2	0
Valor total de Carbón Incorporado y Biogénico (tCO2e).				1,5	-1,4268

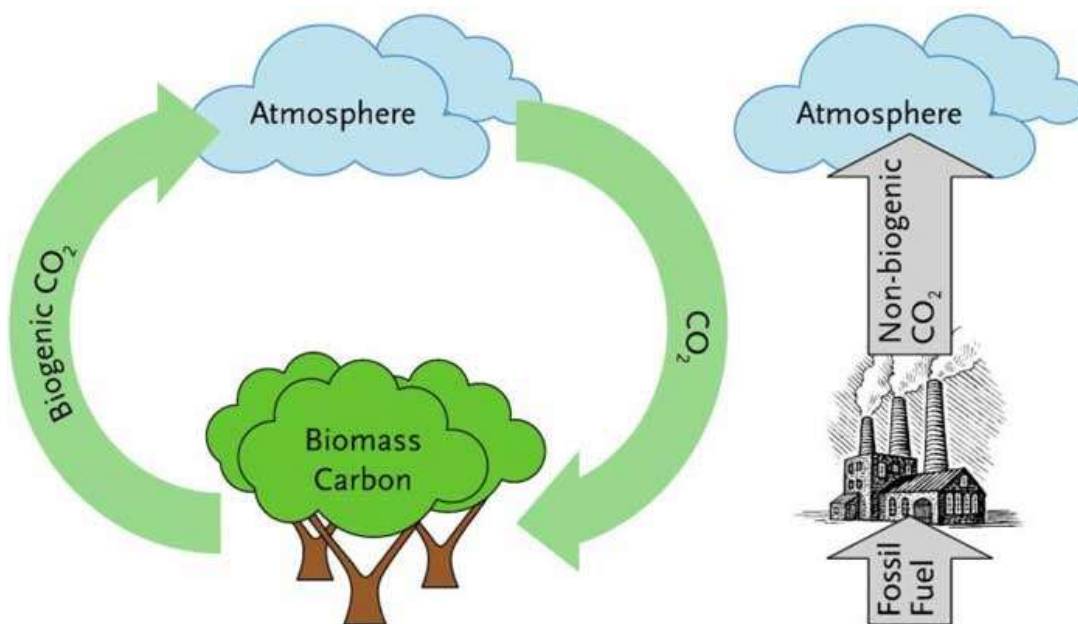
Nota 24: Datos Ciclo de vida.

Los resultados del estudio indicaron que la guadua tiene un menor impacto ambiental que el hormigón, teniendo esta anterior 2tCO2e por debajo de la vivienda en materiales tradicionales,

no solo en la totalidad de la vivienda, sino también en todos sus apartados constructivos y seguramente en cada una de las etapas del ciclo de vida. Esto se debe a que la producción de guadua angustifolia requiere menos energía y produce menos emisiones que la producción de hormigón.

El estudio también encontró que la guadua tiene la capacidad de secuestrar carbono. Es decir, cuando la planta muere esta libera a la atmosfera carbón biogénico, el cual corresponde a la cantidad de dióxido de carbono que la planta en su proceso de fotosíntesis absorbió durante su crecimiento y maduración. Dicha clase de carbono no genera ningún daño o impacto irreversible a la atmosfera debido a que este ya se encontraba en el entorno biosfera-atmosfera. A diferencia de la guadua, la producción de los materiales del concreto si implica la combustión de materiales fósiles que generan dióxido de carbono. A continuación, una imagen que explica el ciclo del carbón biogénico y el uso de combustibles fósiles.

Figura 25 *Ciclo de vida Carbón Biogénico*



Nota. Ciclo de vida Carbón Biogénico tomado de sitio web. (cLIMATE cHANGE, iea bIOENERGY, 2019)

En general, el estudio concluyó que la guadua es una opción más sostenible que el hormigón para la construcción. Sin embargo, es importante tener en cuenta otros factores como la resistencia mecánica, la durabilidad y el costo al seleccionar materiales de construcción.

7.7. Costos del ciclo de vida

Para realizar un presupuesto preciso del ciclo de vida de una construcción de una casa con guadua, se requieren detalles específicos del proyecto, como la ubicación, el tamaño, el diseño, los acabados y los materiales adicionales. Sin embargo, gracias a la información recopilada se tiene el siguiente presupuesto para la construcción de la casa en guadua cuyo diseño estructural y arquitectónico fue mostrado anteriormente.

7.7.1 Consideraciones adicionales

- El precio de la guadua puede variar según la región, la calidad del material y la fecha en que se esté cotizando.
- Los costos de mano de obra pueden variar según la experiencia y la disponibilidad de los trabajadores en la zona.
- Es importante considerar el uso de materiales sostenibles y técnicas de construcción bioclimáticas para reducir el impacto ambiental y los costos operativos a largo plazo.
- Se recomienda consultar con profesionales especializados en construcción con guadua para obtener un presupuesto más preciso y detallado para su proyecto específico.

7.7.2 Comparativa de una casa en guadua y una tradicional

Casa de guadua:

- **Superficie:** 33,264 m²
- **Diseño:** Moderno, un solo piso
- **Acabados:** Intermedios
- **Ubicación:** Zona rural

Presupuesto estimado: El costo total para la elaboración del prototipo en este material fue de \$ 17.795.223. (Anexo 1)

Figura 26 Presupuesto vivienda en guadua.

PRESUPUESTO FINAL						
INDICE	ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	FUENTE DE FINANCIACIÓN
1	Guadua	Unidad	100	\$ 5.000,00	\$ 500.000	RECURSOS PROPIOS
2	Ventanas	Und	4	\$ 400.000	\$ 1.600.000	ALCALDIA
3	Varilla tornillo 3/8 (1 m)	Und	60	\$ 5.000	\$ 300.000	ALCALDIA/RECURSOS PROPIOS
4	Varilla 1/2" (6m)	Unidad	30	\$ 27.000,00	\$ 810.000,00	ALCALDIA/RECURSOS PROPIOS
5	Union 4"	Unidad	3	\$ 6.500	\$ 19.500	ALCALDIA/RECURSOS PROPIOS
6	Tubería de 3"	m	1	\$ 8.000	\$ 8.000	ALCALDIA/RECURSOS PROPIOS
7	Disco corte madera	Unidad	1	\$ 6.800	\$ 6.800	RECURSOS PROPIOS
8	Tuerca	Und	500	\$ 150	\$ 75.000	ALCALDIA/RECURSOS PROPIOS
9	Tubo sanitario 3" (6m)	Unidad	4	\$ 85.000,00	\$ 340.000	ALCALDIA
10	Tubo de presión 1/2" (6m)	Unidad	2	\$ 12.000	\$ 24.000	ALCALDIA
11	Tubo Conduit 1/2"	Unidad	4	\$ 3.500	\$ 14.000	ALCALDIA
12	Tubo bajante 3" (6m)	Und	0,5	\$ 33.000	\$ 16.500	ALCALDIA
13	Transporte de materiales	Global	5	\$ 200.000	\$ 1.000.000	ALCALDIA
14	Toma corriente	Unidad	9	\$ 7.500	\$ 67.500	RECURSOS PROPIOS
15	Thiner	GALON	3	\$ 19.000	\$ 57.000	ALCALDIA/RECURSOS PROPIOS
16	Teja 0.90 x 3.5	Unidad	17	\$ 15.943,00	\$ 510.176	ALCALDIA
17	Tee 2"	Unidad	4	\$ 700	\$ 2.800	ALCALDIA
18	Tabla para formaletas	Global	1	\$ 90.000	\$ 90.000	ALCALDIA
19	soldadura PVC	Gl	1	\$ 75.000	\$ 75.000	ALCALDIA
20	Sifa 3"	Unidad	1	\$ 6.000	\$ 6.000	ALCALDIA
21	Sifa 2"	Und	2	\$ 6.500	\$ 13.000	ALCALDIA
23	Roseta plástica	Unidad	7	\$ 2.500	\$ 17.500	ALCALDIA
24	Reducción 3" a 1 1/2"	Und	1	\$ 3.500	\$ 3.500	ALCALDIA
25	Puntilla 2"	Lb	12	\$ 4.400	\$ 52.800	ALCALDIA/RECURSOS PROPIOS
26	Puerta (incluye chapa)	Und	4	\$ 450.000	\$ 1.800.000	ALCALDIA
27	Pintura tipo 1 blanco (5 Gl)	Und	1	\$ 118.000	\$ 118.000	ALCALDIA

Figura 26 Continuación

38	Enchape para baño	m2	4,8	\$ 17.000	\$ 81.600	ALCALDIA
39	Disco corte fino 4 1/2	Und	1	\$ 5.000	\$ 5.000	ALCALDIA
40	Copa sierra 3"	Und	1	\$ 36.000	\$ 36.000	ALCALDIA
41	Combo sanitario	Und	1	\$ 210.000	\$ 210.000	ALCALDIA
42	Codo 2"	Unidad	4	\$ 6.000,00	\$ 24.000	ALCALDIA
43	Semi Codo 2"	Und	1	\$ 4.000	\$ 4.000	ALCALDIA
44	Codo 1/2"	Unidad	3	\$ 500	\$ 1.500	ALCALDIA
45	Cinta aislante	Und	1	\$ 5.500	\$ 5.500	ALCALDIA
46	cemento	bulto	58	\$ 26.500,00	\$ 1.537.000,00	ALCALDIA
47	Canal	M	6	\$ 7.000	\$ 42.000	ALCALDIA
48	Cable N°12	M	100	\$ 1.400	\$ 140.000	ALCALDIA
49	Broca rápida 3/8	Und	1	\$ 20.000	\$ 20.000	ALCALDIA
50	Boquilla para enchape	Kg	1	\$ 11.000	\$ 11.000	ALCALDIA
51	Arena de peña	m3	7,5	\$ 100.000,00	\$ 750.000,00	ALCALDIA
52	Arandela	Und	250	\$ 450	\$ 112.500	ALCALDIA
53	Anticorrosivo gris	Gl	1	\$ 30.000	\$ 30.000	ALCALDIA
54	Amarre teja de zinc	Und	100	\$ 400	\$ 40.000	ALCALDIA
55	Alambre negro de amarre	Kg	8	\$ 5.900	\$ 47.200	ALCALDIA
56	Alambre de púa	Rollo	1	\$ 108.900	\$ 108.900	ALCALDIA
57	Agregado Mixto	m3	4,8	\$ 88.000,00	\$ 422.400,00	ALCALDIA
58	Maestro de obra	Día	32	\$ 50.000,00	\$ 1.600.000,00	RECURSOS PROPIOS
59	Ayudante de obra	Día	41	\$ 30.000,00	\$ 1.230.000,00	RECURSOS PROPIOS
60	Llana para revoque	Und	1	\$ 18.000,00	\$ 18.000,00	RECURSOS PROPIOS
61	Llana cola de ratón	Und	1	\$ 13.000,00	\$ 13.000,00	RECURSOS PROPIOS
62	Taco #40	Und	1	\$ 15.000,00	\$ 15.000,00	RECURSOS PROPIOS
63	Pintura para piezas de aluminio	Gln	1	\$ 57.000,00	\$ 57.000,00	RECURSOS PROPIOS
64	Bombillo	Und	4	\$ 2.050,00	\$ 8.200,00	RECURSOS PROPIOS
65	Flotador de cadena	Und	1	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00	RECURSOS PROPIOS
66	Ayudante de obra	día	10	\$ 35.000,00	\$ 350.000,00	RECURSOS PROPIOS
67	Maestro de obra	día	10	\$ 50.000,00	\$ 500.000,00	RECURSOS PROPIOS
68	Flejes	Und	24	\$ 2.500	\$ 60.000	ALCALDIA
COSTO SUBTOTAL					\$ 16.177.476,00	ALCALDIA/RECURSOS PROPIOS
IMPREVISTOS				10%	\$ 1.617.747,60	RECURSOS PROPIOS
COSTO TOTAL					\$ 17.795.223,60	ALCALDIA/RECURSOS PROPIOS

Nota Presupuesto final casa en guadua, tomado de la tesis de grado (Ruiz Algarra & Bustos Diaz, 2022)

Construcción tradicional

- **Superficie:** 33,264 m²
- **Diseño:** Moderno, un solo piso
- **Acabados:** Intermedios
- **Ubicación:** Zona rural

Presupuesto estimado: El siguiente presupuesto corresponde al diseño de la casa en materiales tradicionales conservando, modificando y agregando algunos ítems debido a procesos constructivos y diferencia de materiales.

Tabla 1 Presupuesto de vivienda con materiales tradicionales

RESUPUESTO DE VIVIENDA CON MATERIALES CONVENCIONALES						
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNID	CANT	VR. UNIT	VR. TOTAL	
1	Preliminares					
1.1	Localización y replanteo obra arquitectónica	m2	33,26	\$ 1.361,08	\$	45.274,97
1.2	Descapote manual y retiro	m2	33,26	\$ 34.533,37	\$	1.148.718,02
2	Cimentación					
2.1	Solado de zapatas de 2 cm	m3	0,77	\$ 300.015,27	\$	230.411,73
2.2	Concreto de zapatas 3000 psi	m3	0,77	\$ 345.068,00	\$	265.012,22
2.3	Concreto de 3000 psi para viga de amarre	m3	1,91	\$ 508.585,77	\$	973.433,16
2.4	Placa de piso e=0,05 3000 psi en concreto	m3	1,66	\$ 121.282,43	\$	201.716,94
2.5	Malla electrosoldada para placa base, armado, colocación y amarre. Suministro e instalación	kg	44,35	\$ 28.072,10	\$	1.245.053,78
3	Estructura					
3.1	Columna en concreto 3000 psi mezcla en obra, suministro y construcción (no incluye acero)	m3	1,30	\$ 607.022,63	\$	786.701,33
3.2	Acero estructural # 4 para elementos estructurales	kg	1019,32	\$ 2.686,71	\$	2.738.601,39
4	Mampostería					
4.1	Muro en bloque No.5	m2	67,79	\$ 65.183,51	\$	4.418.790,14
5	Enchapes de pisos y muros					
5.1	Alistado de piso	m2	32,00	\$ 57.116,66	\$	1.827.733,12
5.2	Mineral Verde	libra	6,00	\$ 6.100,00	\$	36.600,00
6	Cubierta					
6.1	Teja 0,9x3.5	Unidad	17,00	\$ 15.943,00	\$	271.031,00
6.2	Viga de cubierta en concreto 3000 psi mezcla en obra, suministro y construcción (no incluye acero)	m3	1,91	\$ 345.068,00	\$	660.460,15

Tabla 1 Continuación

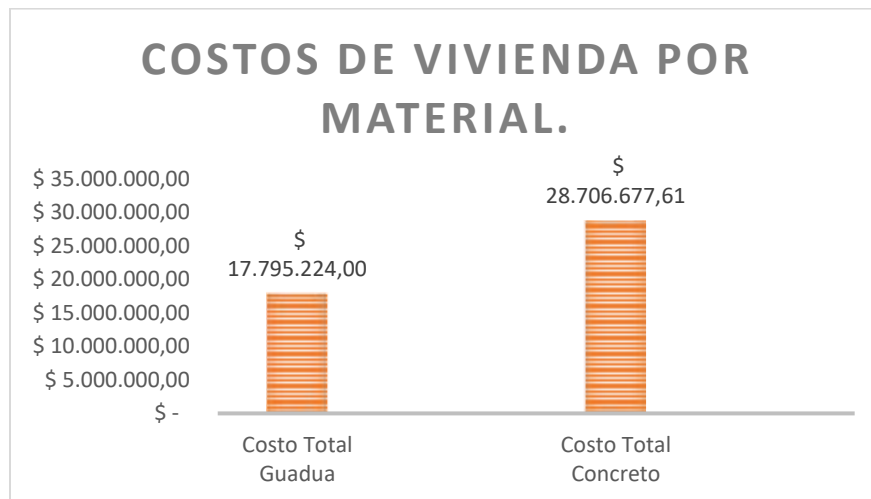
7		Aparatos sanitarios			
7.1	Suministro e instalación de combo sanitarios y lavamanos	Unidad	1,00	\$ 210.000,00	\$ 210.000,00
8		Vidrios			
8.1	Suministro e instalación de ventanas	Unidad	4,00	\$ 400.000,00	\$ 1.600.000,00
9		Cimentación			
9.1	Pañete muros	m2	129,42	\$ 34.952,38	\$ 4.523.441,69
9.2	Pintura para exteriores tipo 1 blanco (5G)	Unidad	1,00	\$ 118.000,00	\$ 118.000,00
10		Cimentación			
10.1	Unión 4"	Unidad	3,00	\$ 6.500,00	\$ 19.500,00
10.2	Tubería de 3"	m	1,00	\$ 8.000,00	\$ 8.000,00
10.3	Tubo sanitario 3"x6m	Unidad	4,00	\$ 85.000,00	\$ 340.000,00
10.4	Tubo de Presión 1/2"x6m	Unidad	2,00	\$ 12.000,00	\$ 24.000,00
10.5	Tubo Conduit 1/2"	Unidad	4,00	\$ 3.500,00	\$ 14.000,00
10.6	Tubo bajante 3"	Unidad	0,50	\$ 33.000,00	\$ 16.500,00
10.7	Transporte de materiales	Global	5,00	\$ 200.000,00	\$ 1.000.000,00
10.8	Toma corriente	Unidad	9,00	\$ 7.500,00	\$ 67.500,00
10.9	Soldadura PVC	Gl	1,00	\$ 75.000,00	\$ 75.000,00
10.1	Sifa 3"	Unidad	1,00	\$ 6.000,00	\$ 6.000,00
10.1	Sifa 2"	Unidad	2,00	\$ 6.500,00	\$ 13.000,00
10.1	Reducción 3" a 1y1/2"	Unidad	1,00	\$ 3.500,00	\$ 3.500,00
10.1	Roseta Plastica	Unidad	3,00	\$ 2.500,00	\$ 17.500,00
10.2	Puerta Incluye chapa	Unidad	4,00	\$ 450.000,00	\$ 1.800.000,00
10.2	Limpiador PVC	Gl	1,00	\$ 75.000,00	\$ 75.000,00
10.2	Interruptor Sencillo	Unidad	6,00	\$ 5.500,00	\$ 33.000,00
10.2	Enchape para baño	m2	4,80	\$ 17.000,00	\$ 81.600,00
10.2	Codo 2"	Unidad	4,00	\$ 6.000,00	\$ 24.000,00
10.2	Semi Codo 2"	Unidad	1,00	\$ 4.000,00	\$ 4.000,00
10.2	Codo 1/2"	Unidad	3,00	\$ 500,00	\$ 1.500,00
10.2	Canal	m	6,00	\$ 7.000,00	\$ 42.000,00
10.2	Cable N12	m	100,00	\$ 1.400,00	\$ 140.000,00
10.2	Anti corrosivo gris	Gl	1,00	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00
10.3	Amarre de teja Zinc	Unidad	100,00	\$ 400,00	\$ 40.000,00
10.3	Alambre negro de amarre	kg	8,00	\$ 5.900,00	\$ 47.200,00
10.3	Taco # 40	Unidad	1,00	\$ 15.000,00	\$ 15.000,00
10.3	Bombillo	Unidad	4,00	\$ 2.050,00	\$ 8.200,00
12		Personal de Obra			
11.1	Maestro de obra	Día	10,00	\$ 50.000,00	\$ 500.000,00
11.2	Ayudante de obra	Día	10,00	\$ 35.000,00	\$ 350.000,00
Costo Subtotal					\$ 26.096.979,65
Imprevistos (10%)					\$ 2.609.697,96
Costo Total					\$ 28.706.677,61

Nota. Presupuesto final casa en materiales tradicionales.

7.7.3 Análisis comparativo

De ambos presupuestos se obtiene una diferencia de \$ 10.911.453,61 pesos siendo la casa en guadua más económica.

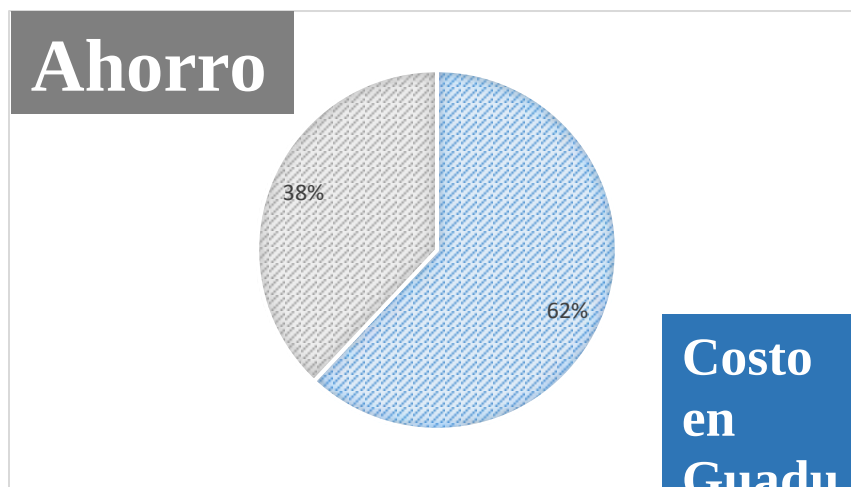
Figura 27 Gráfico de costos



Nota. Gráfico de costos.

Por lo tanto, se obtiene que el valor de la casa en guadua representa un 62% del valor de la casa en materiales tradicionales. Con lo cual, se logra un ahorro en dinero del 38%.

Figura 28 Gráfico de análisis.



Nota. Gráfico de análisis, fuente propia.

No obstante, también es importante mencionar que el tiempo de construcción y su complejidad es menor para la casa de guadua debido a los procesos constructivos, tiempos de instalación y demás diferencias implicadas en la elaboración de cada vivienda.

7.8. Impacto ambiental por el transporte de Guadua Angustifolia.

Para analizar el impacto ambiental del transporte de Guadua Angustifolia, se deben evaluar varios aspectos. Los posibles impactos pueden recaer en distintos ecosistemas como los que se nombran a continuación.

- **Agua:**
 - Derrames de combustible y lubricantes: Durante el transporte pueden ocurrir accidentes, esto da la oportunidad para que estos productos se filtren y contaminen ríos, arroyos, acuíferos y demás cuerpos de agua en general.
 - Sedimentación: La construcción y el mantenimiento de carreteras pueden provocar la erosión del suelo y aumentar la sedimentación en los cuerpos de agua cercanos.
- **Aire:**
 - Emisiones de gases contaminantes: Los vehículos emiten gases como dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas en suspensión, provocando contaminación del aire y cambio climático.
 - Ruido: El tráfico continuo de vehículos pesados crea contaminación acústica que afecta la vida silvestre y las comunidades humanas cercanas.
- **Flora y fauna:**
 - Alteración del hábitat: La construcción de nuevas vías, el mantenimiento de las mismas y el tráfico continuo pueden destruir los hábitats naturales y afectar la biodiversidad local.
 - Introducción de especies invasoras: El transporte puede promover la propagación de especies no nativas que compiten con la flora y fauna nativas.
- **Terreno:**
 - Compactación del suelo: El tráfico intenso compacta el suelo, reduciendo su capacidad de infiltración y aumentando el riesgo de erosión superficial.
 - Cambio de topografía: la construcción de carreteras y otras infraestructuras puede cambiar la topografía natural, alterar los patrones de escorrentía y afectar la estabilidad del suelo.

- **Otros:**

- Sociales y económicos: En algunos casos, la construcción de nuevas rutas puede requerir el desplazamiento de comunidades locales, afectando su forma de vida, desarrollo económico, su cultura. Si bien el transporte de *Guadua angustifolia* crea empleos e impulsa la economía, también ejerce presión sobre los recursos naturales tanto en los humanos como en la naturaleza.

8. Análisis de resultados

8.1. Emisiones de Carbono

El análisis concluyó que la guadua es la mejor opción medioambiental para la construcción del prototipo de vivienda evaluado en ambos casos, aunque también hay que considerar factores como la resistencia mecánica, la durabilidad y el costo. Al evaluar las emisiones de carbono en algunas etapas del ciclo de vida de un material (producción, transporte e instalación), se obtuvo que la vivienda en guadua tiene menores emisiones, 2 tCO₂e menos que la vivienda en materiales tradicionales. Lo anterior, porque requiere menos energía para su producción y genera menos emisiones. Además, la guadua secuestra carbón biogénico, mientras que la producción de hormigón implica la quema de materiales fósiles.

8.2. Análisis Económico

Para calcular un presupuesto preciso para una casa en Guadua, se requiere información específica del proyecto. Aquí hay algunos puntos a considerar:

Los precios de la Guadua varían según la región y la calidad. Los costos de mano de obra varían según la experiencia y la disponibilidad. El uso de materiales sostenibles y métodos de construcción bioclimáticos pueden reducir el impacto ambiental y los costos operativos.

Según el análisis comparativo, se pudo observar que la construcción en Guadua es más económica, con una diferencia de costos de \$ 10.911.453,61 de pesos colombianos menos, respecto a la vivienda construida con materiales tradicionales. La construcción en Guadua equivale al 62% del valor de las casas tradicionales, lo que le permite ahorrar un 38%. Además, el material de la Guadua tiene menos tiempo y complejidad de construcción.

8.3. Impacto ambiental para el transporte de guadua angustifolia

Es importante mencionar que el impacto del transporte de materiales; no solo de la guadua angustifolia, sino el transporte en general, es una labor que puede generar economía, empleos e incluso es capaz de resolver muchas dificultades para todos. De la misma forma en que puede

ocasionar una serie de daños irreversibles al entorno, al medio ambiente, a los recursos naturales y a la comunidad en general que se vea directa e indirectamente afectada por esto.

Sin embargo, el transporte de materiales tradicionales como el concreto y el acero, conllevan un impacto levemente mayor. Al ser cargas tan pesadas, es más riesgoso para los transportadores acarrear este tipo de materiales, hay mayor desgaste de infraestructura vial, en el caso del concreto hay una contaminación al aire por el desprendimiento de partículas, por lo tanto, el transporte de guadua angustifolia sigue siendo más sostenible para el medio ambiente.

9. Recomendaciones

El análisis del ciclo de vida (ACV) de una vivienda permite identificar las etapas que generan la mayor cantidad de emisiones de carbono y otros impactos ambientales. A partir de esta información, se pueden implementar estrategias para reducir el impacto ambiental de la edificación a lo largo de su ciclo de vida.

9.1. Identificación de las Etapas Críticas

1. Etapa de Producción:

- **Cultivo y manejo de la guadua:**
 - Análisis del impacto ambiental de la extracción de la guadua.
 - Eficiencia del transporte de la guadua.
 - Implementación de prácticas sostenibles en el cultivo.
 - Certificaciones de manejo forestal responsable.
- **Producción de materiales complementarios:**
 - Evaluación del impacto ambiental de la producción de materiales como cemento, ladrillo, acero, tejas de cubierta y otros.
 - Selección de materiales con menor huella de carbono.
 - Uso de materiales reciclados o de bajo impacto ambiental.

2. Etapa de Construcción:

- **Transporte de materiales:**
 - Optimización del transporte de materiales para reducir emisiones.
 - Uso de vehículos con bajas emisiones de carbono.
- **Generación de residuos:**
 - Minimización de la generación de residuos durante la construcción.
 - Clasificación y reciclaje de residuos de construcción.
 - Reutilización de materiales y componentes.
- **Consumo de energía:**
 - Uso de energía renovable en la obra.
 - Implementación de medidas de eficiencia energética.

3. Etapa de Uso:

- **Consumo de energía:**
 - Diseño bioclimático para optimizar la eficiencia energética.
 - Instalación de sistemas de energía renovable.
 - Uso de electrodomésticos eficientes.
 - Implementación de prácticas de ahorro energético.
- **Consumo de agua:**
 - Instalación de sistemas de recolección de aguas lluvias.
 - Uso eficiente del agua en el hogar.
- **Generación de residuos:**
 - Minimización de la generación de residuos.
 - Clasificación y reciclaje de residuos domésticos.
 - Compostaje de residuos orgánicos.

4. Etapa de Mantenimiento:

- **Reparaciones y reemplazos:**
 - Selección de materiales duraderos y de bajo mantenimiento.
 - Reparación y reutilización de componentes antes de su reemplazo.
 - Uso de materiales reciclados o de bajo impacto ambiental en las reparaciones.

Una vez identificadas las etapas críticas en las fases de construcción, se procede a buscar algunas estrategias en cada una de estas que pueda generar una reducción del impacto ambiental causado por las mismas.

9.1.1 Estrategias de Reducción del Impacto

- **Producción:**
 - Cultivo y manejo sostenible de la guadua con prácticas que minimicen el uso de agroquímicos y la deforestación.
 - Implementación de técnicas de secado y procesamiento eficientes que reduzcan el consumo de energía.
 - Certificación de la guadua bajo estándares de manejo forestal responsable.
- **Construcción:**
 - Diseño bioclimático que optimice la eficiencia energética y la ventilación natural.

- Uso de materiales de bajo impacto ambiental como guadua, bahareque encementado, esterilla de guadua y tejas de barro.
- Implementación de prácticas de construcción sostenible como el reciclaje de materiales, la reducción de residuos y el uso de maquinaria eficiente.
- **Uso:**
 - Implementación de medidas de ahorro de energía y agua como la instalación de sistemas eficientes, el uso de electrodomésticos de bajo consumo y la recolección de aguas lluvias.
 - Minimización de la generación de residuos mediante la clasificación, el reciclaje y el compostaje.
 - Concientización de los ocupantes sobre la importancia de un estilo de vida sostenible.
- **Mantenimiento:**
 - Reparación y reutilización de componentes antes de su reemplazo.
 - Uso de materiales de bajo impacto ambiental en las reparaciones.
 - Monitoreo y mantenimiento periódico de la vivienda para asegurar su eficiencia y durabilidad.

9.1.2 *Hacia una Vivienda Sostenible y Resiliente*

La implementación de estas estrategias permitirá construir viviendas con guadua que sean más sostenibles, ambientalmente responsables y resilientes al cambio climático. La adopción de un diseño bioclimático, la construcción sostenible, el uso responsable de los recursos y la selección de materiales de bajo impacto ambiental es fundamental para crear un futuro más verde y habitable.

9.1.3 *Eficiencia económica*

La construcción de una casa de guadua es una opción más económica que la construcción tradicional, con un ahorro significativo en el costo total del proyecto. Esto se debe principalmente al menor costo de los materiales y la complejidad de los procesos constructivos.

10. Conclusiones

El estudio del ciclo de vida de la vivienda construida con guadua angustifolia en el departamento del Meta evidenció que la producción de guadua, incluyendo la extracción, el transporte y el procesamiento, genera emisiones de carbono y otros impactos ambientales debido a la maquinaria utilizada, el consumo de energía y la generación de residuos. Sin embargo, también es importante resaltar que las emisiones de carbono de la guadua angustifolia como material de construcción, no solo corresponden al carbón incorporado en tCO₂e, sino también, al carbón biogénico. El cual, ya se evidenció que no es toxico ni genera alteraciones al medio ambiente a diferencia del dióxido de carbono generado por el aprovechamiento de combustibles fósiles. La construcción en materiales tradicionales, por su parte, genera impactos mayores en todas las etapas de su ciclo de vida comparándola con la construcción en guadua. Por lo tanto, el consumo de agua y energía, la generación de residuos y la alteración del terreno son mayores para la construcción en materiales convencionales, teniendo esta 2 tCO₂e por encima de la construcción en guadua.

Con lo anterior, es preciso afirmar que la construcción en guadua es mucho más sostenible si de emisiones de carbono se trata.

No obstante, también se obtuvo que la construcción en guadua es significativamente más económica que la misma con materiales convencionales. Para este caso de estudio en particular se obtuvo una diferencia en precios de \$ 10.911.453,61 pesos colombianos, lo cual, hace que sea mucho más económico utilizar la guadua como material de construcción.

Dichas características hacen de la guadua un material más sostenible y económico que los usados tradicionalmente en la actualidad. Por esta razón, la vivienda con guadua tiene un gran potencial para contribuir a la sostenibilidad ambiental y social en Colombia. Su bajo impacto ambiental, su capacidad de adaptación a diferentes condiciones climáticas y su potencial para generar empleos y desarrollo local la convierten en una alternativa atractiva para la construcción de viviendas sostenibles y resilientes.

11. Referencias

- Aceves Gutiérrez, H., Mercado Ibarra, S. M., López Chávez, O., & Arévalo Razo, J. L. (2021). Procesos de construcción, emisión de dióxido de carbono y resultados socio-económicos durante la pandemia del covid-19 en México. *Telos*, 23(2), 485-502. <https://doi.org/10.36390/telos232.17>
- Aleman, M., Jáuregui, A., & Cuello, J. (2019). Análisis numérico de un puente compuesto de acero y hormigón utilizando el software de elementos finitos ANSYS. *Journal of Physics: Conference Series*. https://oa.upm.es/50284/1/TFG_Mauricio_Aleman.pdf
- Becerra bayona, S., & Acevedo pabón, S. (2018). Evaluación del análisis del ciclo de vida para la producción de Biodiesel a partir de aceite de Higuierilla, empleando la metodología "De la cuna a la Cuna". *Revista ION*, 21(1), 17-26. <https://www.redalyc.org/pdf/3420/342030279002.pdf>
- Cely Moreno, L., Hernández Rojas, W., & Gutiérrez Junco, O. (2012). Caracterización de la Guadua Angustifolia Kunth cultivada en Miraflores (Boyaca) de acuerdo con la NSR-10. *Revista Facultad de Ingeniería*, 21(33), 53-71. <https://www.redalyc.org/pdf/4139/413940772006.pdf>
- Centro de Estrategia y Prospectivas Industrial (CEPI). (2023). *Economía circular en la industria*. CEPI. https://cepi.eoi.es/sites/default/files/documents/EC%20N%C2%BA4%20T12023_OK.pdf
- cLIMATE cHANGE, iea bIOENERGY. (2019). ¿Qué es el carbono biogénico? forestalmaderero.com: <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/que-es-el-carbono-biogenico.html>
- Correal, J., & López, L. (2019). Estudio exploratorio de los laminados de bambú Guadua angustifolia como material estructural. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 11(3), 171-182. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2009000300001>
- Gallopín, G. (2018). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/items/2dbadebc-a3ec-4bf6-8b4f-fe1beb511ad8>

- Gutiérrez Garza, E. (2017). De las teorías del desarrollo del desarrollo. *Trayectorias*, IX(25), 45-60. <https://www.redalyc.org/pdf/607/60715120006.pdf>
- Gutiérrez González, M., Bonilla Santos, J., & Cruz Amado, M. (2017). Expansión lineal y punto de saturación de las fibras de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Colombia Forestal*, 21(1), 69-80. <https://doi.org/10.14483/2256201X.11501>
- Han, L., & Zhang, Z. (2019). Experimental and numerical study on steel tube-reinforced composite wall with waste polyethylene terephthalate (PET) bottle as formwork. *Journal of Cleaner Production*, 222, 557-569.
- Hernández, C., Suárez, O., & Villalba, C. (2017). Estudio experimental y numérico de la interacción suelo-estructura en pilotes sometidos a cargas laterales. [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional. Revista de la Facultad de Ingeniería: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59904>
- Kim, M., & Jang, I. (2021). *Finite element modeling of steel-reinforced sand-filled PET bottle wall panels*.
- Naranjo, L., Quiceno, E., & Quintero, M. (2019). Análisis numérico de la estabilidad de taludes en suelos residuales. *Revista de la Facultad de Ingeniería*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57334/analisisdeestabilidaddetaludes.pdf>
- Ortiz, A., Giraldo, S., & Vargas, L. (2018). Modelación numérica de un muro de contención en suelo reforzado con geosintéticos mediante el software ANSYS. [Trabajo de grado, Universidad Militar nueva granada]. Repositorio Institucional. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/43881?show=full>
- Paez, C., Cardona, A. M., & Gallego, F. (2019). Calibration of finite element models for seismic analysis of structures. *International Journal of Computational*. <https://doi.org/10.2495/cmcm-v7-n5-758-767>
- Pérez Gil, J. (2017). Un marco teórico y metodológico para la arquitectura vernácula. *Ciudades*(21), 01-28. <https://doi.org/10.24197/ciudades.21.2018.01-2>
- Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A., & Zafra Mejía, C. A. (2016). El análisis del ciclo de vida aplicado a las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Ciencia y Sociedad*, 41(3), 617-636. <https://www.redalyc.org/pdf/870/87048049007.pdf>

- Ruiz Algarra, F., & Bustos Diaz, J. (2022). *Diseño y construcción de un prototipo de vivienda de un piso con materiales no convencionales, como solución habitacional de una familia campesina en el municipio de Chinavita, Boyacá*. [Trabajo de grado no publicado]. Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
- Tello Ayala, K., Garcia Troncoso, N., E. Silva, C., Zuñiga Olvera, C., Narvaez Moran, J., Malaga Chuqutaype, C., & Mouka, T. (2023). Comparative analysis of the sustainability and seismic performance of a social interest house using RC moment frames and bahareque as structural systems. *Sustainable Design and Construction*. <http://dx.doi.org/10.3389/fbuil.2023.1150826>
- Toro-Arango, A., Torrado-García, D., Arena-Navarro, M. T., Chinchilla-García, A. F., de la Rosa-Oñate, M. C., Hoyos-Patiño, J. F., & Velásquez-Carrascal, B. L. (2023). Guadua (Guadua angustifolia) material of innovation for design. *Formación Estratégica*, 30(2), 81-96. <https://formacionestrategica.com/index.php/foes/article/view/104>
- Velez, S. (2020). *La Gudua Angustifolia "El Bambú Colombiano"*. Universitat Politècnica de Catalunya. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93442/06_ESD_Cos_pp_35_81.pdf
- Xue, Lu, X., & YU, T. (2019). Numerical and experimental investigation on the behavior of PET bottle-steel composite beams under bending. *Thin-Walled Structures*, 142, 234-244.
- Zuluaga, C., Gómez, J., & Rodríguez, R. (2019). *Análisis numérico de la respuesta estructural de un muro de contención en suelos*. Revista de la Facultad de Ingeniería.