



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

CARRERA DE ARQUITECTURA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN MODALIDAD

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

**MADERA COMO ALTERNATIVA FRENTE A SISTEMAS CONSTRUCTIVOS
TRADICIONALES DE HORMIGÓN ARMADO EN MANABÍ**

AUTORES:

CASTRO ALVAREZ ARIANY NAYELY

NAVIA PEÑARRIETA JANNER JESÚS

TUTOR:

ING. DELGADO SANZ FRANCISCO JAVIER

MANTA – ECUADOR

2026

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En calidad de docente tutor de la Carrera de Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, certifico que he acompañado, orientado y revisado el desarrollo del trabajo de titulación bajo la modalidad de PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, titulado: “MADERA COMO ALTERNATIVA FRENTE A SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE HORMIGÓN ARMADO EN MANABÍ”, el trabajo fue ejecutado cumpliendo un total de 384 horas de dedicación académica, de conformidad con las disposiciones establecidas por la institución y en concordancia con lo dispuesto en el Reglamento de Régimen Académico vigente. Tras la revisión correspondiente, se verifica que la investigación reúne las condiciones metodológicas, académicas, técnicas y formales requeridas para su presentación y evaluación ante el tribunal de titulación que sea designado por la autoridad competente.

Asimismo, se certifica que la autoría del trabajo corresponde a los estudiantes CASTRO ALVAREZ ARIANY NAYELY Y NAVIA PEÑARRIETA JANNER JESÚS, perteneciente a la Carrera de Arquitectura, período académico 2026 (1), quienes han cumplido satisfactoriamente con los requisitos exigidos y se encuentra habilitado para la defensa y sustentación de su trabajo de titulación.

Se expide la presente certificación para los fines académicos y legales que correspondan.

Manta, 13 de julio de 2026.

Atentamente,



ING. FRANCISCO JAVIER DELGADO SANZ

C.C.131008272-0

Tutor

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, elaborado por **CASTRO ALVAREZ ARIANY NAYELY Y NAVIA PEÑARRIETA JANNER JESÚS**, para optar por el Grado de Abogado de los Tribunales y Juzgados de la República, cuyo título es: **“MADERA COMO ALTERNATIVA FRENTE A SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE HORMIGÓN ARMADO EN MANABÍ”** considero que este trabajo **REÚNE** los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador que se designe, por lo que **APRUEBO**, a fin de que sea habilitado para continuar con el proceso.



ING. FRANCISCO JAVIER DELGADO SANZ

C.C.131008272-0

Tutor

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

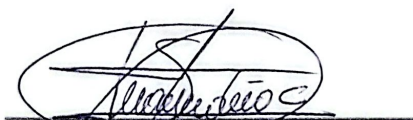
En calidad de miembro del Tribunal de Titulación de la Carrera de Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico haber revisado el Trabajo de Titulación desarrollado bajo la modalidad de Proyecto Integrador, titulado: " **MADERA COMO ALTERNATIVA FRENTE A SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE HORMIGÓN ARMADO EN MANABÍ**".

Luego del análisis y evaluación correspondiente, se verifica que el trabajo ha sido elaborado de conformidad con los lineamientos académicos e institucionales establecidos para la modalidad escogida, así como en cumplimiento de las disposiciones contempladas en el Reglamento de Régimen Académico vigente.

Por tal motivo, APRUEBO el mencionado proyecto por reunir los méritos académicos, metodológicos y formales necesarios, considerándolo apto para continuar con el proceso de defensa y sustentación ante el tribunal correspondiente.

Expido la presente certificación para los fines académicos y legales pertinentes.

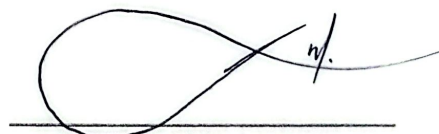
En la ciudad de Manta, a los 14 días del mes de agosto de dos mil veinte y seis.



Arq. Cedeño Candela Juan, Mg.

1303553778

Tribunal 1



Arq. Cristhian Melgar Veliz, Mg.

1310153836

Tribunal 2

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **CASTRO ALVAREZ ARIANY NAYELY** con CC: 0944165901 y **NAVIA PEÑARRIETA JANNER JESUS** con CC: 1314681154, autores del presente Trabajo de Titulación bajo la modalidad de Proyecto Investigación, denominado **“MADERA COMO ALTERNATIVA FRENTE A SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES DE HORMIGÓN ARMADO EN MANABÍ”**, declaramos que el contenido desarrollado es de nuestra autoría y responsabilidad académica, realizado bajo la dirección del tutor ING. FRANCISCO JAVIER DELGADO SANZ.

Asimismo, certificamos que el trabajo presentado es original y ha sido elaborado con base en fuentes bibliográficas y técnicas debidamente citadas. Declaramos que se han respetado las normas éticas y académicas vigentes en la elaboración de este proyecto, reconociendo y referenciando adecuadamente los aportes de los autores consultados.

En la ciudad de Manta, a los 13 días del mes de julio de dos mil veinte y seis.

CASTRO ALVAREZ ARIANY NAYELY

C.C. 094416590-1

Autor

NAVIA PEÑARRIETA JANNER JESUS

C.C. 131468115-4

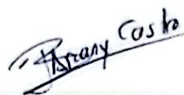
Autor

DEDICATORIA

A mi madre, **BEATRIZ MAGALI CASTRO ALVAREZ**, por ser la mujer que me enseñó el valor del esfuerzo y la perseverancia. Tu amor incondicional y tu fortaleza han sido mi mayor inspiración a lo largo de toda mi vida. Este logro es tuyo también.

A mis hermanos, quienes con su presencia, compañía y palabras de aliento hicieron más llevadera cada etapa de este camino.

Porque sin ustedes, nada de esto hubiera sido posible. Los llevo siempre en el corazón.



CASTRO ALVAREZ ARIANY NAYELY

C.C. 094416590-1

Autora

A mis padres, **JESÚS CECILIA PEÑARRIETA TUÁREZ** y **JOSELO ALFREDO NAVIA ÁVILA**, por ser el pilar más sólido de mi vida. Gracias por cada sacrificio silencioso, por su amor sin condiciones y por guiarme con el ejemplo en cada paso de mi formación. Todo lo que soy se lo debo a ustedes.

A mis hermanos por su compañía, su cariño y por celebrar conmigo cada pequeño triunfo a lo largo de este camino.

Este logro es el resultado del amor y la confianza que siempre depositaron en mí.



NAVIA PEÑARRIETA JANNER JESÚS

C.C.131468115-4

Autor

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por darme la salud, la fuerza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa de mi vida profesional.

A mi familia, por su apoyo incondicional durante todo el proceso de formación académica. Su amor y confianza fueron mi mayor motivación.

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí y a la Facultad de Arquitectura, por brindarme una formación integral y los conocimientos necesarios para desempeñarme como profesional.

A mi tutor de tesis, Ing. DELGADO FRANCISCO, por su guía, paciencia y dedicación a lo largo del desarrollo de este trabajo. Sus observaciones y consejos fueron fundamentales para alcanzar los resultados obtenidos.

A los docentes que formaron parte de mi carrera universitaria, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias con generosidad y compromiso.

A mi compañero/a de tesis, NAVIA JANNER, por el trabajo en equipo, la dedicación compartida y por hacer de este proceso una experiencia de crecimiento mutuo.

A todos, mi más sincero agradecimiento.

CASTRO ALVAREZ ARIANY NAYELY

C.C. 094416590-1

Autor/a

Expreso mi más profundo agradecimiento a Dios, por iluminar mi camino y permitirme alcanzar esta meta tan anhelada.

A mis padres, por ser mi apoyo incondicional, por cada sacrificio realizado y por nunca dejar de creer en mí. Sin ustedes este logro no hubiera sido posible.

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, institución que me acogió y formó durante estos años, y a cada uno de los docentes que contribuyeron a mi desarrollo académico y personal.

A mi tutor de tesis, Ing. DELGADO FRANCISCO, por su orientación constante, sus aportes valiosos y su disposición en cada etapa de este proceso investigativo.

A cada uno de los docentes que acompañaron mi formación universitaria, por transmitir sus conocimientos con vocación y entrega, dejando en mí una huella que trasciende las aulas.

A mi compañero/a de tesis, CASTRO ARIANY, por la constancia, el compromiso y el apoyo mutuo a lo largo de este trabajo.

Gracias a todos quienes de una u otra manera fueron parte de este proceso.

NAVIA PEÑARRIETA JANNER JESÚS

C.C. 131468115-4

Autor/a

RESUMEN

La presente investigación evalúa la viabilidad técnica, ambiental, económica y sociocultural de la madera (laminada y maciza) como sistema constructivo alternativo frente al tradicional hormigón armado en la provincia de Manabí, Ecuador. Mediante un enfoque metodológico mixto y de estudio de caso comparativo, se contrastó el desempeño integral de la "Casa Ceibo" (Montecristi), estructurada en madera, con una vivienda tipo de hormigón armado (Manta). Los análisis estructurales demuestran que la madera reduce en un 82% la masa inercial de la edificación, optimizando significativamente la respuesta sismo-resistente en una zona de alta amenaza (Zona V). Ambientalmente, el sistema de madera opera como un sumidero activo de carbono, contrastando con las altas emisiones generadas por el hormigón. En el ámbito térmico-energético, el diseño multicapa y la baja transmitancia de la madera logran un ahorro del 84% en la demanda de climatización anual. Económicamente, el Costo de Ciclo de Vida (LCC) a 30 años posiciona a la madera como la opción más rentable, amortizando su mayor inversión inicial gracias a la drástica reducción del consumo energético. Sin embargo, el diagnóstico sociocultural revela una fuerte disonancia en la población local, que asocia erróneamente la pesadez del hormigón con seguridad sísmica. Se concluye que la madera representa una solución superior y resiliente para el desarrollo de infraestructuras sostenibles en la región costera, requiriendo alfabetización técnica, actualización normativa y políticas públicas para superar las barreras culturales y consolidar su implementación masiva.

Palabras Claves:

Construcción sostenible, Madera laminada, Hormigón armado, Resiliencia sísmica, Huella de carbono, Eficiencia energética.

ABSTRACT

This research evaluates the technical, environmental, economic, and sociocultural viability of wood (laminated and solid) as an alternative building system to traditional reinforced concrete in the province of Manabí, Ecuador. Through a mixed methodological approach and a comparative case study, the comprehensive performance of "Casa Ceibo" (Montecristi), structured in wood, was contrasted with a standard reinforced concrete house (Manta). Structural analyses show that wood reduces the building's inertial mass by 82%, significantly optimizing the seismic-resistant response in a high-hazard zone (Zone V). Environmentally, the timber system operates as an active carbon sink, contrasting with the high emissions generated by concrete. In the thermo-energetic field, the multilayer design and low transmittance of wood achieve an 84% saving in annual cooling demand. Economically, the 30-year Life Cycle Cost (LCC) positions wood as the most profitable option, amortizing its higher initial investment through a drastic reduction in energy consumption. However, the sociocultural diagnosis reveals a strong dissonance in the local population, who mistakenly associate the heaviness of concrete with seismic safety. It is concluded that wood represents a superior and resilient solution for the development of sustainable infrastructure in the coastal region, requiring technical literacy, regulatory updates, and public policies to overcome cultural barriers and consolidate its massive implementation.

Keywords:

Sustainable construction, Glulam, Reinforced concrete, Seismic resilience, Carbon footprint, Energy efficiency.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2.1. Marco Contextual.....	19
2.2. Formulación Del Problema.....	20
2.2.1. Problema central y subproblemas asociados al objeto de estudio:	20
2.3. Objeto De Estudio	21
2.3.1. Definición de objeto de estudio	21
2.3.2. Delimitación Espacial	21
2.3.3. Delimitación Temporal	22
2.4. Campo De Acción Del Objeto De Estudio.....	23
2.5. Objetivos.....	23
2.5.1. General.....	23
2.5.2. Específicos	23
2.6. Justificación	24
2.6.1. Social.....	24
2.6.2. Arquitectónica.....	24
2.6.3. Académica.....	25
2.6.4. Institucional.....	25
2.7. Tareas Científicas Desarrolladas	25
2.7.1. Tc1: Revisión bibliográfica y elaboración del marco teórico y referencial sobre sistemas constructivos sostenibles	25
2.7.2. Tc2: Elaboración del diseño metodológico de la investigación.....	26
2.7.3. Tc3: Diagnóstico comparativo y análisis de resultados.....	26
3. CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO, REFERENCIAL Y LEGAL.....	27
3.1. Marco Antropológico	27
3.2. Marco teórico.....	30
3.2.1. Teoría de la Arquitectura y Materiales Sostenibles	30
3.2.2. Teoría de la Innovación Tecnológica en Construcción con Madera Laminada....	30
3.2.3. Teoría del Desarrollo Sustentable en Construcción con Madera.....	32

3.2.4.	Teoría de las Infraestructuras Inteligentes que Respiran en la Construcción con Madera	33
3.2.5.	Teoría de la Resiliencia Urbana.....	34
3.3.	Marco Conceptual	36
3.3.1.	Madera Laminada (Glulam).....	36
3.3.2.	Sostenibilidad y Ciclo de Vida	37
3.3.3.	Arquitectura Vernácula y Adaptación Cultural	37
3.3.4.	Innovación Tecnológica y Aceptación Social.....	38
3.3.5.	Proyecto CEIBO: Integración de Conceptos	38
3.4.	Marco Jurídico y Normativo	39
3.4.1.	Normas y Leyes nacionales	40
3.4.2.	Normas Internacionales	42
3.5.	Marco de repertorio	46
3.5.1.	Ejemplo	47
4.	CAPITULO II. DISEÑO METODOLÓGICO.....	48
4.1.	Métodos	49
4.1.1.	Método de Estudio de Caso	51
4.2.	Técnicas y Herramientas	57
4.3.	Fuentes.....	57
5.	CAPITULO III. DIAGNÓSTICO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	59
5.1.	Diagnóstico del Área de Estudio: Manabí.....	59
5.1.1.	Caracterización climática y geográfica del área de estudio	59
5.1.2.	Caracterización sísmica y condiciones de riesgo estructural	59
5.2.	Diagnóstico del Objeto de Estudio	60
5.2.1.	Vivienda de Referencia en Hormigón Armado (Urbanización Tipo, Manta – sector los Gavilanes)	61
5.2.2.	Casa Ceibo en Madera (Ciudadela Golf Club y Villas, Montecristi)	61
5.3.	Análisis Estructural Comparativo.....	62
5.3.1.	Resistencia y capacidad portante de la estructura de madera	62
5.3.2.	Resistencia y capacidad portante de la estructura de hormigón armado	63
5.3.3.	Análisis comparativo de desempeño estructural entre ambos sistemas.....	65

5.4. Análisis ambiental comparativo: huella de carbono y ciclo de vida.....	66
5.4.1. Huella de carbono incorporada y emisiones de CO ₂ por m ³ en la vivienda de madera	66
5.4.2. Huella de carbono incorporada y emisiones de CO ₂ por m ³ en la vivienda de hormigón armado	67
5.4.3. Análisis comparativo de impacto ambiental y ciclo de vida de ambos materiales	68
5.5. Análisis económico comparativo.....	69
5.5.1. Costos de construcción, operación y mantenimiento de la vivienda de madera...	69
5.5.2. Costos de construcción, operación y mantenimiento de la vivienda de hormigón armado	73
5.5.3. Relación costo-beneficio y viabilidad económica comparada.....	77
5.6. Análisis térmico-energético comparativo.....	79
5.6.1. Confort térmico interior y consumo energético en la vivienda de madera	79
5.6.2. Confort térmico interior y consumo energético en la vivienda de hormigón armado	81
5.6.3. Análisis comparativo de transmitancia térmica (valor U) y demanda energética	83
5.7. Análisis acústico comparativo.....	84
5.7.1. Comportamiento acústico y nivel de aislamiento sonoro en la vivienda de madera	84
5.7.2. Comportamiento acústico y nivel de aislamiento sonoro en la vivienda de hormigón armado	86
5.7.3. Análisis comparativo del desempeño acústico de ambos sistemas.....	88
5.8. Análisis contra incendios comparativo.....	89
5.8.1. Resistencia al fuego y comportamiento de la madera bajo normativa vigente.....	89
5.8.2. Resistencia al fuego y comportamiento del hormigón armado bajo normativa vigente	90
5.8.3. Cuadro comparativo de resistencia al fuego entre ambos sistemas	92
5.9. Análisis arquitectónico-funcional comparativo.....	93
5.9.1. Forma, espacialidad y organización funcional de la vivienda de madera.....	93
5.9.2. Forma, espacialidad y organización funcional de la vivienda de hormigón armado	95

5.9.3.	Cuadro comparativo arquitectónico-funcional	96
5.10.	Análisis constructivo comparativo.....	97
5.10.1.	Proceso constructivo, tiempos de ejecución y nivel de industrialización de la madera	97
5.10.2.	Proceso constructivo, tiempos de ejecución y nivel de industrialización en hormigón armado	99
5.10.3.	Cuadro comparativo del proceso constructivo.....	101
5.11.	Análisis social comparativo	102
5.11.1.	Percepción social, aceptación cultural e identidad local de la madera como material constructivo	102
5.11.2.	Percepción social y valoración cultural del hormigón armado en Manabí.....	103
5.11.3.	Cuadro comparativo del impacto social de ambos sistemas	104
5.12.	Síntesis comparativa integral: madera y hormigón armado.....	105
5.12.1.	Dinámica Sismo-Resistente y Disonancia Sociocultural.....	105
5.12.2.	Ecuación Económica: Industrialización y Rentabilidad del Ciclo de Vida (LCC)	106
5.12.3.	Metabolismo Ambiental: Simbiosis entre Confort Bioclimático y Huella de Carbono	106
5.12.4.	Flexibilidad Arquitectónica y Comportamiento Resiliente (Fuego y Acústica)	107
5.12.5.	Matriz de Evaluación Multicriterio.....	108
6.	CONCLUSIONES	110
7.	RECOMENDACIONES	112
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
9.	ANEXOS	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación específica del objeto de estudio	22
Figura 2 Marco Antropológico	29
Figura 3 Marco Teórico.....	35
Figura 4 Aportes de los conceptos investigados	39
Figura 5 Marco legal a la utilización de la madera	46
Figura 6 Esquema Metodológico	48
Figura 7 Proceso de adaptación sostenible urbana a un sistema constructivo de madera.....	50
Figura 8 Aspectos para definir indicadores constructivos de madera	53
Figura 9 Dimensiones adaptables a un sistema constructivo sostenible en madera	54
Figura 10 Fuentes de información.....	58
Figura 11 Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z.....	60
Figura 12 3D estructural vivienda de madera	63
Figura 13 3D estructural vivienda de hormigón.....	64
Figura 14 Análisis comparativo ambiental.....	69
Figura 15 Componentes constructivos de la vivienda de madera	80
Figura 16 Análisis comparativo energético.....	84
Figura 17 Componentes constructivos del entrepiso de la vivienda de madera.....	86
Figura 18 Análisis comparativo acústico.....	88
Figura 19 Planta Baja Arquitectónica de la vivienda de madera.....	94
Figura 20 Corte transversal de la vivienda de madera	95
Figura 21 Evidencias fotográficas de la visita a la vivienda de madera.....	120
Figura 22 Evidencias fotográficas de la visita a la vivienda de hormigón armado	121
Figura 23 Evidencias fotográficas de entrevistas	122
Figura 24 Evidencia fotográfica de planos 2D de ambas viviendas.....	123
Figura 25 Evidencia fotográfica del 3D estructural.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Dimensiones en la construcción sostenible orientadas al uso de madera	52
Tabla 2 Ejes de evaluación basados en las dimensiones de construcción de madera	54
Tabla 3 Indicadores de evaluación de construcción con madera	56
Tabla 4 Cálculo de peso estructural de la vivienda de madera	62
Tabla 5 Cálculo de peso estructural de la vivienda de hormigón.....	64
Tabla 6 Análisis comparativo estructural	65
Tabla 7 Huella de carbono y emisiones en vivienda de madera	67
Tabla 8 Huella de carbono y emisiones en vivienda de hormigón.....	67
Tabla 9 Análisis comparativo ambiental.....	68

Tabla 10	<i>Cálculo económico de la estructura de la vivienda de madera</i>	70
Tabla 11	<i>Costos estimados de la mano de obra en la vivienda de madera</i>	71
Tabla 12	<i>Cálculo económico de la mano de obra de la vivienda de madera</i>	71
Tabla 13	<i>Costos estimados del transporte en la vivienda de madera</i>	72
Tabla 14	<i>Cálculo económico del mantenimiento en la vivienda de madera</i>	72
Tabla 15	<i>Cálculo económico total de la vivienda de madera</i>	73
Tabla 16	<i>Cálculo económico estructural de la vivienda de hormigón</i>	74
Tabla 17	<i>Costos estimados de la mano de obra en la vivienda de hormigón</i>	75
Tabla 18	<i>Cálculo económico de la mano de obra de la vivienda de hormigón</i>	75
Tabla 19	<i>Costos estimados del transporte en la vivienda de hormigón</i>	76
Tabla 20	<i>Cálculo económico del mantenimiento de la vivienda de hormigón</i>	76
Tabla 21	<i>Cálculo económico total de la vivienda de hormigón</i>	77
Tabla 22	<i>Análisis comparativo económico</i>	78
Tabla 23	<i>Propiedades térmicas de los materiales de la vivienda de madera</i>	79
Tabla 24	<i>Propiedades térmicas de los materiales de la vivienda de hormigón</i>	81
Tabla 25	<i>Análisis comparativo energético</i>	83
Tabla 26	<i>Comportamiento acústico de componentes constructivos de la vivienda de madera</i>	85
Tabla 27	<i>Comportamiento acústico en entrepiso de la vivienda de madera</i>	85
Tabla 28	<i>Comportamiento acústico de elementos constructivos de la vivienda de hormigón</i>	86
Tabla 29	<i>Comportamiento acústico en entrepiso de la vivienda de hormigón</i>	87
Tabla 30	<i>Análisis comparativo acústico</i>	88
Tabla 31	<i>Tasa de carbonización de la madera</i>	89
Tabla 32	<i>Comportamiento del hormigón armado ante el fuego</i>	91
Tabla 33	<i>Análisis comparativo resistencia al fuego</i>	92
Tabla 34	<i>Análisis comparativo arquitectónico</i>	96
Tabla 35	<i>Tiempos de ejecución de la vivienda de madera</i>	98
Tabla 36	<i>Tiempos de ejecución de la vivienda de hormigón</i>	100
Tabla 37	<i>Análisis comparativo constructivo</i>	101
Tabla 38	<i>Análisis comparativo social</i>	104
Tabla 39	<i>Resultados de evaluación comparativa</i>	108
Tabla 40	<i>Columna 30×30 cm (8 unidades) altura total: 5.15 m volumen total: 3.71 m³</i>	135
Tabla 41	<i>Columna 20×30 cm (10 unidades) altura total: 5.15 m volumen total: 3.09 m³</i>	135
Tabla 42	<i>Vigas 30×20 cm — nivel entrepiso (50.03 m lineales) sección: 30×20 cm volumen total: 3.00 m</i>	136
Tabla 43	<i>Losa de cimentación (44.27 m²) espesor: 25 cm volumen total: 11.07 m³</i>	136

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible ha surgido como una prioridad global imperativa, particularmente dentro del sector de la construcción, un segmento de la economía que tradicionalmente ha sido uno de los mayores contribuyentes a las emisiones de CO₂ y al consumo intensivo de recursos naturales (United Nations Environment Programme [UNEP], 2019). El desafío actual no es solo construir más, sino construir mejor, utilizando materiales y sistemas que generen menos impacto ambiental, optimicen el uso de energía y equilibren las dimensiones técnicas, ecológicas y sociales. El enfoque se centra en la necesidad de transformar las ciudades hacia modelos resilientes y eficientes que equilibren el impacto ambiental con el entorno urbano.

En este contexto, la búsqueda y establecimiento de esquemas de construcción sostenible para reducir las emisiones de carbono y maximizar la eficiencia de los recursos naturales asume un papel estratégico importante. La presente investigación tiene como objetivo investigar el potencial de la madera como un sistema de diseño económico ecológico, que también es estructuralmente atractivo y una alternativa amigable con el medio ambiente a los sistemas de construcción convencionales de hormigón armado en la provincia de Manabí.

En particular, se sabe que la madera funciona como un sumidero natural de carbono y almacena CO₂ durante su vida útil, además de ser un material renovable, reciclable y biodegradable (Zhao et al., 2022). Cuando se transforma en el producto industrial madera laminada encolada (Glulam), este material seguirá siendo ecológico y ofrecerá una mejora significativa en resistencia, estabilidad y durabilidad, lo que lo convierte en un material prometedor para edificaciones de mediana y gran escala. Su aplicación es una respuesta tangible al desafío de lograr la sostenibilidad del carbono en la construcción y avanzar hacia una arquitectura más regenerativa que devuelva mucho más al medio ambiente de lo que toma.

Esta investigación tiene como objetivo llevar a cabo una evaluación comparativa del sistema de madera de la Casa Ceibo Montecristi frente a una casa tipo de hormigón armado, con respecto a tres ejes de consideración: huella de carbono, confort térmico y eficiencia estructural bajo las condiciones climáticas y sísmicas en Manabí. Este estudio busca producir resultados teóricos a favor del uso e implementación de tecnologías de construcción basadas en madera laminada dentro de las directrices sostenibles y de ahorro energético de la arquitectura contemporánea.

Esta disertación se enmarca en la modalidad de Proyecto de Investigación Aplicada, vinculando el documento directamente al campo de investigación de la carrera de Arquitectura: Ingeniería, Industria, Construcción, Urbanismo y Arquitectura para el Desarrollo Sostenible y Sustentable. También se articula en el contexto del macroproyecto institucional titulado “Uso e implementación de sistemas constructivos sostenibles para el desarrollo de Eco-comunidades”, consolidando así el compromiso académico y social con la innovación responsable y la sostenibilidad ambiental en el contexto ecuatoriano.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Marco Contextual

La provincia de Manabí (región costera de Ecuador) ha estado experimentando una expansión urbana sustancial, y el hormigón armado, preferido por su resistencia estructural y durabilidad contra las condiciones ambientales adversas en la provincia, sigue siendo el material de construcción dominante.

A escala global, el sector de la construcción es responsable de 40% de las emisiones de CO₂, genera el 30% de los residuos sólidos y el 20% de la contaminación de las aguas. En 2022, la demanda de energía y las emisiones del sector de los edificios y la construcción representaron más de una quinta parte de las emisiones mundiales, y un aumento del 1% en las emisiones del sector equivalía a 10 millones de automóviles adicionales circulando alrededor de la Tierra. En Ecuador, estudios de análisis de ciclo de vida demuestran que la huella de carbono de una estructura de hormigón armado es de 64.36% mayor que la de sistemas estructurales alternativos, siendo la cimentación y la estructura los elementos de mayor incidencia en el cómputo total de carbono incorporado. Las emisiones de carbono embebido se miden en kilogramos de CO₂, equivalente por m² construido, y la mayor parte se libera antes de que el edificio sea ocupado, concentrándose precisamente en los elementos estructurales que consumen grandes cantidades de hormigón y acero.

Al mismo tiempo, Manabí tiene una tradición de uso de la madera, respaldada por la disponibilidad de recursos forestales y el conocimiento local aplicado a edificaciones de menor escala. Los sistemas de madera se introducen como una alternativa estructural industrializada que puede mejorar el rendimiento mecánico y la estabilidad dimensional de la madera en este campo, ofreciendo los beneficios de ligereza, comportamiento sísmico, velocidad de construcción y un menor impacto ambiental, y han sido adoptados en edificios sostenibles alrededor del mundo.

Sin embargo, la aplicación en Manabí sigue siendo limitada, y la mayoría de las construcciones continúan utilizando hormigón armado. Tanto los aspectos técnicos como los ambientales deben ser considerados y evaluados en el contexto de la madera como una alternativa de construcción frente a los criterios técnicos, económicos, culturales y regulatorios tradicionales aplicados en el entorno.

2.2. Formulación Del Problema

Uno de los desafíos centrales es el uso insuficiente de materiales sostenibles en la construcción de edificios en la provincia de Manabí como material alternativo al hormigón armado. Además, sus beneficios estructurales, económicos y ambientales son ampliamente reconocidos a nivel internacional, pero hasta la fecha existe una base insuficiente de información técnica, normativa y sociocultural. Por lo cual, el propósito es determinar la capacidad y efectividad de la madera laminada para proporcionar las características técnicas, ambientales y sociales que se adapten a las necesidades de una región.

Con base en lo expuesto, la interrogante que guía la investigación es:

¿En qué medida la madera puede constituirse en una alternativa viable frente a los sistemas constructivos tradicionales de hormigón armado en la provincia de Manabí?

2.2.1. Problema central y subproblemas asociados al objeto de estudio:

La disponibilidad de sistemas de construcción de hormigón armado en la provincia de Manabí ha limitado la incorporación de alternativas estructurales más sostenibles, como la madera, lo cual ha generado una limitación en la diversificación tecnológica del sector de la construcción, así como la exploración de materiales con mayor eficiencia ambiental y menores impactos en el proceso de construcción.

Subproblemas asociados:

- La producción de investigación local es limitada y la validación técnica en la región sobre el desempeño estructural de la madera durante condiciones sísmicas era escasa.
- Escasa claridad en el marco normativo y regulatorio que rige la aplicación de este material en edificaciones, situación que limita su reconocimiento dentro de los procedimientos formales de planificación y autorización.
- Falta de cadenas de producción integradas que contribuyan a la disponibilidad e industrialización de la madera, impactando su disponibilidad y precio en el mercado provincial.

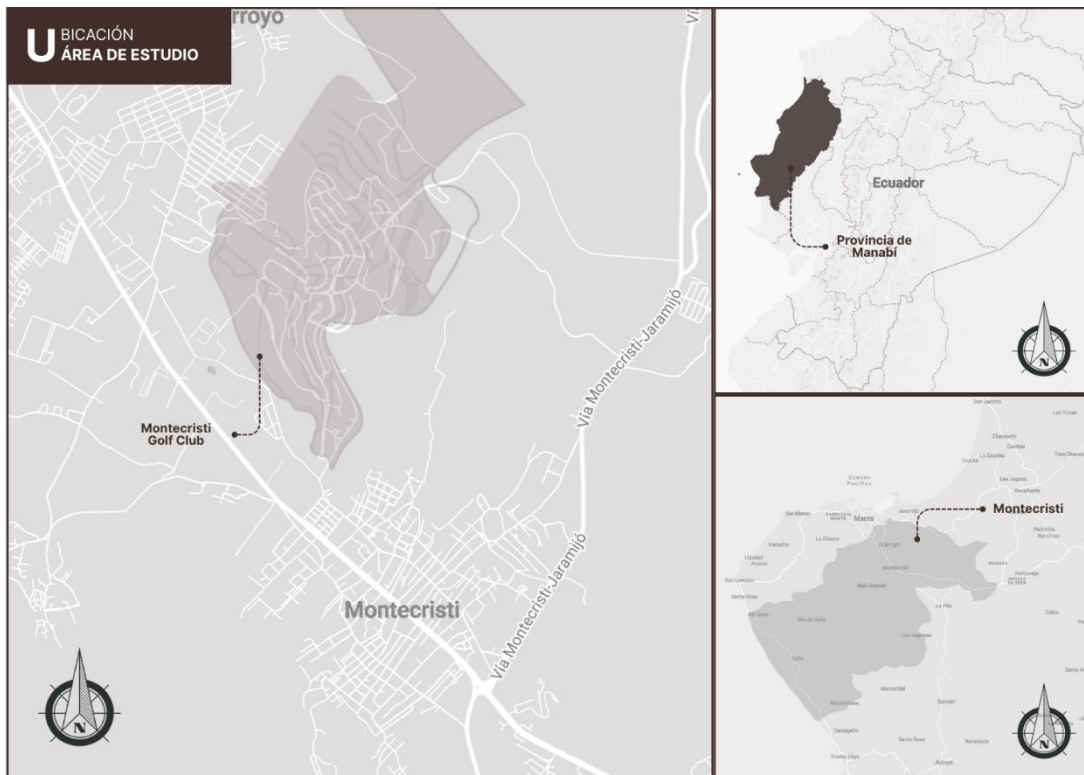
2.3. Objeto De Estudio

2.3.1. Definición de objeto de estudio

El objeto de estudio se enfoca en los sistemas de madera como alternativa a los sistemas constructivos tradicionales de hormigón armado en la provincia de Manabí, con el propósito de analizar el potencial de este método para ser utilizado en el desarrollo local con respecto a la implementación en el contexto local. Se toman en consideración sus características técnicas y estructurales frente a condiciones sísmicas y climáticas, viabilidad económica y productiva en función de los recursos y costos, así como los factores socioculturales y normativos que influyen en su aceptación como opción constructiva.

2.3.2. Delimitación Espacial

El análisis se realiza en el cantón Montecristi en la provincia de Manabí, con la concentración específica del Proyecto CEIBO – Montecristi Golf Resort & Villas. Este complejo residencial y turístico integra infraestructura habitacional y recreativa de alta gama, y establece un referente para la innovación en la construcción en el área circundante. El estudio toma como base este escenario debido a que constituye un espacio estratégico para evaluar la viabilidad de materiales alternativos, como la madera, en comparación con el sistema tradicional de hormigón armado dado la escala y el crecimiento.

Figura 1*Ubicación específica del objeto de estudio**Nota. Elaboración propia.*

2.3.3. Delimitación Temporal

La investigación se delimita temporalmente a partir del inicio del Proyecto CEIBO en el cantón Montecristi, periodo que coincide con una fase de crecimiento urbano y consolidación de la inversión inmobiliaria y turística en la provincia de Manabí, en la cual se ha fortalecido el interés por enfoques constructivos orientados a la sostenibilidad y la eficiencia.

Este marco temporal posibilita el análisis de la evolución reciente de los sistemas constructivos predominantes en la región, así como la proyección del potencial de incorporación de la madera en desarrollos urbanísticos de escala media y alta, en respuesta a las actuales exigencias técnicas, ambientales y de confort habitacional.

2.4. Campo De Acción Del Objeto De Estudio

Este es un proyecto de investigación que se asocia directamente con la línea de investigación institucional de la carrera de Arquitectura: Ingeniería, Industria, Construcción, Urbanismo Y Arquitectura Para Un Desarrollo Sustentable Y Sostenible.

Específicamente, este estudio de caso se enmarca en un proyecto de investigación asociado al ya existente, titulado: Uso e implementación de sistemas constructivos sostenibles para el desarrollo de Eco-comunidades de la carrera de Arquitectura.

2.5. Objetivos

2.5.1. General

Evaluar la madera como sistema constructivo alternativo al hormigón armado, mediante la comparación de su eficiencia estructural, bioclimática y ambiental, económica y sociocultural, para establecer su viabilidad técnica y sostenible en la construcción de viviendas en la región de Manabí.

2.5.2. Específicos

- Examinar los referentes teóricos, estudios de caso y normativas vigentes sobre las propiedades físicas, mecánicas, durabilidad y huella de carbono de la madera y el hormigón armado en sistemas constructivos sostenibles.
- Comparar el desempeño estructural de la madera laminada Glulam GL24h y el hormigón armado $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, mediante el análisis del peso estructural, densidad por m^2 , relación resistencia – peso y luces libres predominantes en ambos sistemas.
- Evaluar el comportamiento térmico – energético de ambos sistemas constructivos a través de la transmitancia térmica de la envolvente, el desfase térmico y la demanda energética anual en el contexto climático tropical – costero de Manabí.

- Determinar la viabilidad económica comparada de ambos sistemas mediante el análisis del costo de materiales, mano de obra, mantenimiento y el costo de ciclo de vida (LCC) ajustado a 30 años.
- Analizar los resultados de la comparación entre la madera y el hormigón armado para identificar su potencial y limitaciones como alternativa constructiva sostenible en Montecristi, Manabí, considerando la percepción social y la aceptación cultural del sistema en el contexto local.

2.6. Justificación

La presente investigación se justifica en la necesidad de ofrecer alternativas constructivas que mitiguen el impacto ambiental y, a su vez, sean técnica y económicamente viables en el contexto de Manabí, una región con alta vulnerabilidad sísmica y potencial forestal. Al realizar una comparación rigurosa entre la madera laminada y el hormigón armado, el estudio genera conocimiento crucial para una transición hacia la construcción sostenible.

2.6.1. Social

El proyecto presenta una importante relevancia social al promover viviendas sostenibles y seguras que contribuyen a mejorar la calidad de vida de la población. El uso de la madera permite reducir la huella de carbono en la construcción y alinearse con los objetivos de desarrollo sostenible, además de impulsar la generación de empleo y la capacitación de la mano de obra local. Asimismo, la evaluación del confort térmico favorece el diseño de espacios habitables más saludables y energéticamente eficientes.

2.6.2. Arquitectónica

La madera como sistema constructivo ofrece una respuesta arquitectónica que se adapta a las condiciones climáticas de Manabí y dialoga con su paisaje natural. Su ligereza y versatilidad estructural permiten diseños eficientes, menores tiempos de ejecución y una reducción de la demanda energética, consolidándola como una alternativa viable frente al hormigón armado. Asimismo, fomenta una arquitectura de identidad local basada en recursos renovables y procesos sostenibles, fortaleciendo la economía circular y el sector de la construcción regional.

2.6.3. Académica

El valor académico de esta investigación radica en la generación de un análisis comparativo cuantitativo —huella de carbono y desempeño térmico y estructural— adaptado a las condiciones de Manabí, que contribuye a reducir un vacío de conocimiento en el sector de la construcción regional. Asimismo, la metodología aplicada y el estudio de caso de la Casa Ceibo constituyen un referente para estudiantes de Arquitectura e Ingeniería interesados en sistemas constructivos sostenibles y para la difusión de resultados en el ámbito académico y profesional.

2.6.4. Institucional

La investigación contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a los que está alineada la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí (ULEAM).

- Contribución a la ULEAM: El proyecto, vinculado al estudio sobre sistemas constructivos sostenibles para el desarrollo de eco-comunidades, aporta al cumplimiento de los ejes estratégicos y líneas de investigación institucional orientados al desarrollo sustentable.
- Alineación ODS: La investigación genera evidencia técnica que contribuye al cumplimiento del ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y del ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles).

2.7. Tareas Científicas Desarrolladas

El proyecto analiza la viabilidad de los sistemas de madera como alternativa sostenible al hormigón armado en Manabí, Ecuador, mediante un enfoque comparativo basado en la eficiencia estructural, el comportamiento bioclimático y la huella de carbono, con el fin de aportar fundamentos para la construcción sostenible y el desarrollo de eco-comunidades.

2.7.1. Tc1: Revisión bibliográfica y elaboración del marco teórico y referencial sobre sistemas constructivos sostenibles

La tarea científica consistió en una revisión sistemática de la literatura sobre la madera y el hormigón armado, considerando sus propiedades físicas, mecánicas y ambientales, lo que permitió establecer los fundamentos teóricos de la investigación e integrar criterios de

sostenibilidad, desempeño estructural, confort térmico y huella de carbono aplicables al contexto de Manabí.

2.7.2. Tc2: Elaboración del diseño metodológico de la investigación

Esta tarea tuvo como finalidad definir el enfoque metodológico comparativo del estudio, estableciendo los parámetros e indicadores de análisis técnico y ambiental, tales como el desempeño estructural, el confort térmico y la huella de carbono incorporada. Asimismo, se seleccionó la Casa Ceibo, ubicada en Montecristi, como caso de estudio de edificación con madera y se estableció su comparación con una vivienda tradicional de hormigón armado.

2.7.3. Tc3: Diagnóstico comparativo y análisis de resultados

El objetivo de esta tarea fue evaluar comparativamente el desempeño de la madera y el hormigón armado en el contexto constructivo de Manabí. Mediante la aplicación del diseño metodológico, se elaboró un diagnóstico que permitió identificar las ventajas y limitaciones de ambos sistemas en términos de eficiencia estructural, sostenibilidad ambiental y respuesta climática. Los resultados obtenidos sirvieron de base para la formulación de conclusiones y recomendaciones orientadas a promover el uso de la madera como alternativa constructiva en la región.

3. CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO, REFERENCIAL Y LEGAL

3.1. Marco Antropológico

La construcción también ha sido un resultado del crecimiento de la cultura y de cómo las personas interpretan su entorno desde los primeros asentamientos humanos. Los materiales, técnicas y diseño de construcción no son solo una reacción al clima o la economía, sino también signos de identidad y sistemas de conocimiento transmitidos a través del tiempo. Construir es un evento cultural, de acuerdo con Ingold (2000), que nos demuestra la interactividad entre los seres humanos, la materia y el paisaje, con cada elección técnica impregnada de significado social y ambiental.

En Manabí, estos materiales de construcción tradicionales de madera, caña guadua y bahareque se han adaptado a lo largo del tiempo al clima tropical seco y a los recursos locales. Estas tipologías de edificios crean no solo una respuesta térmica y estructural aceptable, sino también una indicación del tipo de sociedad que se crea en la tierra, el estilo de vida de las personas y sus relaciones con el territorio (Universidad de Valladolid & ULEAM, 2013). Las viviendas tradicionales, por ejemplo, alzadas sobre pilotes y con amplios corredores, representan una lectura empírica del entorno que articula confort, funcionalidad y estética local.

Sin embargo, en el siglo XX, el hormigón armado asumió una nueva identidad representando el progreso. Se extendió rápidamente, desplazando gradualmente los materiales naturales y unificando la expresión arquitectónica. Este fenómeno puede interpretarse, desde la antropología, como una transformación cultural donde el valor simbólico del material se asocia con modernidad y estatus, relegando prácticas sostenibles y colectivas propias de las comunidades locales (García & Pacheco, 2019). La arquitectura, por lo tanto, perdió parte de su relación con el conocimiento ancestral y la identidad territorial.

La aplicación de la madera laminada (glulam) permite que esta solución armonice la innovación basada en la tecnología con el contenido cultural y estético en áreas rurales. El material consiste en varias capas de madera unidas mediante adhesivos estructurales, mantiene el carácter cálido y natural de la madera tradicional, pero ofrece una resistencia comparable al hormigón o al acero (Espinoza, Proaño, Barrera & Arpi, 2024). La madera, desde el punto de vista antropológico, puede verse como un "material de transición" donde los elementos locales se redimen sin abandonar la modernidad técnica.

El Proyecto CEIBO en Montecristi, desarrollado por Estudio YURA (2020), constituye un referente local de esta convergencia entre técnica e identidad. Su arquitectura combina tecnología de madera laminada con planes pasivos basados en la arquitectura vernácula manabita ventilación cruzada, cubiertas inclinadas y uso de sombras naturales. Este proyecto ilustra cómo la innovación puede comunicarse con la memoria constructiva de la tierra, para establecer una expresión moderna y no perder su identidad histórica.

Pero la aceptación de nuevos materiales depende del grado en que se adapten de manera cultural en el mismo contexto sociopolítico a través del proceso de apropiación (Ayala, 2022). La implementación exitosa de la madera en Manabí requiere, por tanto, de una mediación participativa: formación de oficios locales, transmisión de saberes híbridos y construcción de confianza hacia la tecnología.

La arquitectura se comprende como una práctica socialmente construida, donde los materiales actúan como portadores de significado. La madera es más que un simple sustituto estructural; representa el encuentro entre tradición y modernidad; sostenibilidad y progreso; un puente que une el pasado de la madera con el mañana innovador que Manabí está a punto de emprender.

Figura 2
Marco Antropológico



Nota. Elaboración propia.

3.2. Marco teórico

3.2.1. Teoría de la Arquitectura y Materiales Sostenibles

El papel de los materiales en la arquitectura es crucial para comprender, ya que proporciona la base para el rendimiento, la comodidad y la sostenibilidad del entorno construido. Según Suárez (2002), la arquitectura es más que un diseño físico, se trata de hacer el espacio habitable, cómodo y en armonía con su entorno. Esta regla es especialmente cierta cuando se discute la elección de un material sostenible, incluyendo la madera, ya que la madera es capaz de proporcionar no solo una estructura fuerte, sino también funcionalidad y sostenibilidad ambiental.

En este sentido, la madera laminada se concibe como un material capaz de cumplir los principios fundamentales de la arquitectura vitruviana: firmitas (resistencia y durabilidad), utilitas (funcionalidad) y venustas (estética). Según MITECO (2023), los materiales de madera laminada hacen posible la construcción de edificios que satisfacen requisitos técnicos y estéticos y la integración de entornos naturales dentro de estructuras construidas.

Además, la arquitectura sostenible se construye con material renovable y se preocupa ante todo por las condiciones de vida y el medio ambiente. La madera es liviana y prefabricable, ofrece ventajas sobre el hormigón, tales como rapidez de construcción, menor peso estructural, y eficiencia energética, al mismo tiempo que contribuye a la mitigación del cambio climático al almacenar carbono durante su ciclo de vida (Zhao et al., 2022).

Por otro lado, la integración de la madera en edificaciones promueve un enfoque arquitectónico más humano y conectado con la naturaleza, donde el confort térmico, acústico y visual se optimiza, alineándose con la visión de Suárez (2002) de la arquitectura como una ciencia de la habitabilidad, así como el grado en que el individuo se integra con su entorno

3.2.2. Teoría de la Innovación Tecnológica en Construcción con Madera Laminada

Como uno de los factores impulsores básicos para el progreso en la arquitectura y la construcción, la innovación tecnológica ofrece una mejor optimización de procesos, menor costo y mayor sostenibilidad del proyecto. El Banco Interamericano de Desarrollo (2024) identifica la digitalización y la innovación tecnológica como componentes críticos respecto a la transformación de la industria de la construcción hacia modelos sostenibles, eficientes y

resilientes ante los desafíos ambientales. La madera laminada introducida en la construcción también significa la combinación de la ingeniería estructural con consideraciones ambientales y sociales.

Hasta ahora, la nueva tecnología de construcción se ha dirigido a materiales de construcción y técnicas de construcción que maximizan la fuerza y la durabilidad. La tecnología en la construcción es, como afirmó Serpell (1987), la tecnología aplicada en la construcción tiene múltiples facetas: se orienta tanto al perfeccionamiento técnico-racional como a la incorporación de criterios de eficiencia y sostenibilidad. La madera laminada se inscribe en ambas vertientes, ya que ofrece resistencia estructural comparable al hormigón, a la vez que reduce el impacto ambiental gracias a su origen renovable y a procesos de fabricación controlados.

La tecnología, según Bijker (2005), se conceptualiza bajo tres capas diferentes, como objetos físicos, como actividades humanas y como conocimiento. Entonces, cuando se trata de madera laminada, esto significa que:

1. La madera laminada, como objeto físico, es un elemento estructural fuerte, liviano y versátil utilizado globalmente en diferentes tipologías arquitectónicas.
2. Considerando que es un esfuerzo humano, se diseña, produce y ensambla utilizando procesos industriales avanzados y control de calidad, y por lo tanto requiere conocimientos especializados.
3. La madera laminada, como conocimiento, encarna avances en ingeniería, diseño arquitectónico y sostenibilidad para abordar soluciones nuevas y avanzadas para infraestructura sostenible en edificios contemporáneos.

Además, Keles & Battal (2017) enfatizan que la innovación tecnológica no solo depende del suministro del material, aunque el avance tecnológico es un tema esencial para considerar, sino que también la gestión y adaptabilidad de las organizaciones son elementos cruciales del proceso de innovación. Con la madera laminada, esto significa: adopción de procesos de construcción modernos, mejora en la investigación en durabilidad, resistencia al fuego y monitoreo estructural inteligente, e incorporación en el monitoreo de estructuras para un edificio más seguro, sostenible y resiliente.

3.2.3. Teoría del Desarrollo Sustentable en Construcción con Madera

El desarrollo sostenible es el concepto de planificación urbana y arquitectónica centrada en el ser humano en la que es posible vivir una vida mejorada sin dañar la naturaleza, que proporciona recursos y servicios esenciales (Páez, 2007). En este sentido, la construcción en madera es compatible con la sostenibilidad al proporcionar un material renovable y menos contaminante que el uso convencional del hormigón.

Rosales & Sánchez (2011) enfatizan que el desarrollo sostenible unifica los requisitos humanos y los problemas ecológicos en un patrón armonioso con respecto a la armonía humano-ambiente. Ahora aplicando la misma técnica a la madera, esto significa:

- Reducción de la Huella de Carbono: La producción de madera genera significativamente menos emisiones de CO₂ que la producción de acero y hormigón.
- Eficiencia de recursos: Esto permite el control de las plantaciones utilizando madera para generar beneficios y previene la deforestación indiscriminada.
- Eficiencia energética: Las construcciones de madera requieren menos energía durante su producción y transporte, ya que carece de mayor peso y es más fácil de usar.

La sostenibilidad urbana es un equilibrio entre todas las dimensiones sociales, económicas y ambientales de la ciudad y la región circundante (Páez, 2007). En este sentido, la madera contribuye al desarrollo urbano sostenible, ya que:

- Dimensión social: En el proceso de construcción, crea ambientes saludables y cómodos, mejora el bienestar (térmico y acústico) de los ocupantes.
- Dimensión económica: Menores costos de construcción, transporte y mantenimiento que las estructuras de concreto con períodos de recuperación de inversión favorables.
- Dimensión ambiental: Reduce el uso de recursos no renovables y apoya la protección de los alrededores vecinos.

3.2.4. Teoría de las Infraestructuras Inteligentes que Respiran en la Construcción con Madera

El trabajo de infraestructuras inteligentes en el caso de la construcción en madera enfatiza la construcción de estructuras que satisfacen los requisitos ambientales externos y también interactúan con el entorno ambiental, utilizando así los recursos de la mejor manera posible, mejorando el confort de los usuarios. Este tipo de infraestructuras, a las que se podría denominar "infraestructuras que respiran", se caracterizan por su capacidad de adaptarse a cambios ambientales, gestionar eficientemente la energía, la ventilación y la humedad, y responder de manera dinámica a las condiciones del espacio y del clima. La madera también es ligera, fuerte y flexible, lo que ayuda a ejecutar sistemas inteligentes que pueden incluir sensores, automatización y control ambiental en toda la estructura.

Diversos estudios respaldan el desempeño de la madera laminada en contextos de alta sismicidad. En Nueva Zelanda se desarrolló el sistema de marcos post-tensados en madera laminada (Pres-Lam), pensado específicamente para zonas donde los movimientos sísmicos son frecuentes, ofreciendo capacidad de recentrado tras el evento sísmico (Buchanan et al., 2011). En el ámbito latinoamericano, investigaciones recientes sobre el comportamiento histerético de conexiones en muros de entramado ligero de madera laminada han demostrado que este tipo de sistema presenta baja probabilidad de colapso durante terremotos, gracias a la eficiencia de sus conexiones como controladoras del comportamiento sismorresistente (Rodríguez et al., 2026). Estos antecedentes respaldan la pertinencia de evaluar el Glulam GL24h como alternativa estructural en Manabí, zona de reconocida actividad sísmica.

Además, las infraestructuras inteligentes basadas en madera tienen mejor eficiencia energética y la reducción de huella ambiental. Los sistemas automatizados de iluminación, calefacción y ventilación, automatizados de tal manera que forman parte del diseño en sí; una unidad puede diseñarse para ajustar sus funciones a la ocupación y al clima externo y también para satisfacer las demandas dentro de su entorno. Esta sinergia entre material y tecnología no solo incrementa el confort y la seguridad de los usuarios, sino que también convierte a la construcción en un modelo replicable de arquitectura sostenible y resiliente, alineada con los principios de ciudades inteligentes y desarrollo urbano responsable.

Por último, las infraestructuras que respiran representan un cambio de paradigma en la construcción, donde la madera se convierte en un material protagonista que no solo soporta cargas, sino que participa activamente en la gestión del entorno construido. Desde la producción sostenible y adaptable de tecnología inteligente abre nuevas posibilidades para el diseño arquitectónico, permitiendo crear edificios que se ajustan al ritmo de la vida urbana y a las necesidades de sus ocupantes, garantizando eficiencia, seguridad y bienestar en el mediano y largo plazo.

3.2.5. Teoría de la Resiliencia Urbana

La resiliencia urbana se refiere a la capacidad de las ciudades para adaptarse, recuperarse y transformarse frente a perturbaciones externas, manteniendo su funcionalidad y ofreciendo bienestar a sus habitantes (Gonçalves, 2016). Cuando se aplica a la construcción en madera, esta resiliencia se vuelve concreta: la flexibilidad y adaptabilidad del material permiten responder de manera más eficiente a cambios climáticos, desastres naturales o variaciones en la ocupación del espacio. La madera, al ser ligera pero estructuralmente sólida y fuerte, hace que la infraestructura sea más adaptable a los cambios urbanos.

La resiliencia, según Méndez (2012), no es volver a un estado anterior, sino transformar las condiciones actuales a nuevas circunstancias. En este sentido, el sector de la construcción en madera puede emplearse en enfoques urbanos resilientes como estrategias de gestión urbana con sistemas de monitoreo inteligente que identifican deformaciones o cargas pesadas, adaptan el uso del espacio o mitigan cualquier sobreuso/deformación para que no inhiba la seguridad o el servicio del edificio para usar o apoyar el edificio.

La pandemia del 2020 evidenció la importancia de la resiliencia urbana al forzar la transformación de ciudades y espacios educativos, impulsando la adopción de soluciones tecnológicas y la reconfiguración de infraestructuras (Carrión Mena & Cepeda, 2021). Los edificios de madera son una alternativa versátil ya que responden a tales desafíos en diseños modulares y sistemas inteligentes. Construidos para combinar sostenibilidad, eficiencia y flexibilidad, tales construcciones no solo pueden soportar el cambio, sino que pueden convertirse en catalizadores para la innovación urbana y arquitectónica, permitiendo estilos de vida más equitativos, seguros y efectivos.

En la arquitectura educativa y universitaria, la resiliencia urbana en madera laminada ayuda al diseño de campus para ser resistentes a diferentes usos del espacio, climas o pedagogías. Tales tecnologías inteligentes integradas y sostenibilidad con un enfoque sostenible que cumple no solo con los estándares de comodidad y eficiencia energética, sino que también permite la estabilidad social y ambiental de la comunidad, ayuda a fortalecer el tejido de una solución integral a través de un enfoque tecnológico que describe el avance tecnológico, la sostenibilidad y la adaptación futura de los edificios durante los desafíos urbanos del futuro.

Figura 3

Marco Teórico



Nota. Elaboración propia.

3.3. Marco Conceptual

La construcción es una actividad que no solo responde a necesidades funcionales, sino que también refleja la identidad cultural, las tradiciones y la relación de las comunidades con su entorno natural. En Manabí, una provincia costera de Ecuador, las técnicas constructivas han evolucionado a lo largo del tiempo, adaptándose a las condiciones climáticas, geográficas y sociales de la región. Históricamente, los materiales de construcción en las casas y edificios han sido considerados como aquellos que son de bahareque, caña guadua y madera, y han desempeñado un papel indispensable en la creación de una estructura que es económica, así como en la construcción sostenible.

Sin embargo, materiales como el concreto reforzado, y su material primo, que lo están reemplazando, junto con muchos otros materiales asociados con la globalización y el aumento de nuevas tecnologías. La transición ha producido sus propios desafíos ambientales, de eficiencia energética y culturales. Es sobre esa base que la madera proporciona una alternativa útil que combina los beneficios tecnológicos de los materiales modernos y las preocupaciones ambientales de los materiales tradicionales, manteniendo su relevancia ecológica y cultural.

Durante siglos, estas técnicas centenarias han permitido a los habitantes cultivar edificios sostenibles, lo suficientemente resistentes para soportar fenómenos naturales como terremotos y tormentas, y resistir condiciones climáticas extremas. Sin embargo, con la expansión del hormigón armado como material predominante, se produjo un cambio en la percepción social de la construcción, vinculando modernidad, progreso y durabilidad exclusivamente a un tipo de material, lo que provocó la disminución del uso de técnicas locales y la homogeneización del paisaje construido (García & Pacheco, 2019).

3.3.1. Madera Laminada (Glulam)

La madera laminada es un material de ingeniería que consiste en capas de madera unidas mediante adhesivos estructurales de alta resistencia. Debido a la orientación alterna de estas capas, se mejora la estabilidad dimensional y la resistencia a acciones mecánicas, y se pueden diseñar vigas, columnas y paneles para abarcar grandes distancias y también permitir cargas más altas (Espinoza, Proaño, Barrera & Arpi, 2024).

La madera laminada no solo es resistente, sino que también se puede diseñar de manera diferente para aplicaciones arquitectónicas como curvas, techos inclinados y construcción ligera. Su prefabricación facilita el montaje con un tiempo de construcción relativamente bajo, menos desperdicio de material, mejor precisión dimensional y más adecuada para aplicaciones donde la economía de construcción y la estética, y la adaptación cultural son cruciales.

La madera laminada también posee propiedades acústicas y térmicas favorables, ofreciendo confort interior y reduciendo la necesidad de sistemas artificiales de climatización. Su resistencia al fuego y a la deformación depende del tratamiento y del diseño estructural, por lo que su implementación requiere normas y protocolos claros para garantizar la seguridad estructural.

3.3.2. Sostenibilidad y Ciclo de Vida

La sostenibilidad en la construcción se evalúa considerando el impacto ambiental, social y económico de los materiales a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción hasta la eliminación de materiales. La madera, cuando se produce de manera sostenible, también se ve por su menor huella de carbono, ya que los árboles absorben CO₂ mientras crecen, y lo almacenan convirtiéndose en un sumidero de carbono (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, España, 2020).

El análisis de ciclo de vida (LCA) permite un cálculo completo de cada etapa, producción, transporte, montaje y fases de demolición. Este método demuestra que la madera minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero y produce desechos biodegradables o reciclables, y así ayuda a crear un entorno ambiental sostenible para la construcción. Además, la madera favorece la eficiencia energética en edificaciones al mejorar el aislamiento térmico, reduciendo la demanda de energía para climatización y fomentando un diseño más eficiente.

3.3.3. Arquitectura Vernácula y Adaptación Cultural

La arquitectura vernácula se refiere a la construcción desarrollada a partir de recursos locales y saberes tradicionales, reflejando la identidad cultural y la adaptación al entorno natural (Universidad de Valladolid & ULEAM, 2013). En Manabí equivale a edificios sobre pilotes, cubiertas inclinadas, ventilación cruzada, corredores y porches. Este conocimiento práctico

demuestra las formas en que las comunidades han sido resilientes al abordar el clima, los recursos disponibles y la estructura social.

La madera laminada en el caso de esta aplicación es respetar los patrones culturales y reinterpretarlos mediante técnicas modernas. Esto permite que la innovación tecnológica no sea percibida como ajena, sino como una herramienta complementaria que preserva la identidad de la comunidad y promueve la continuación del conocimiento tradicional a medida que se adapta al mundo moderno.

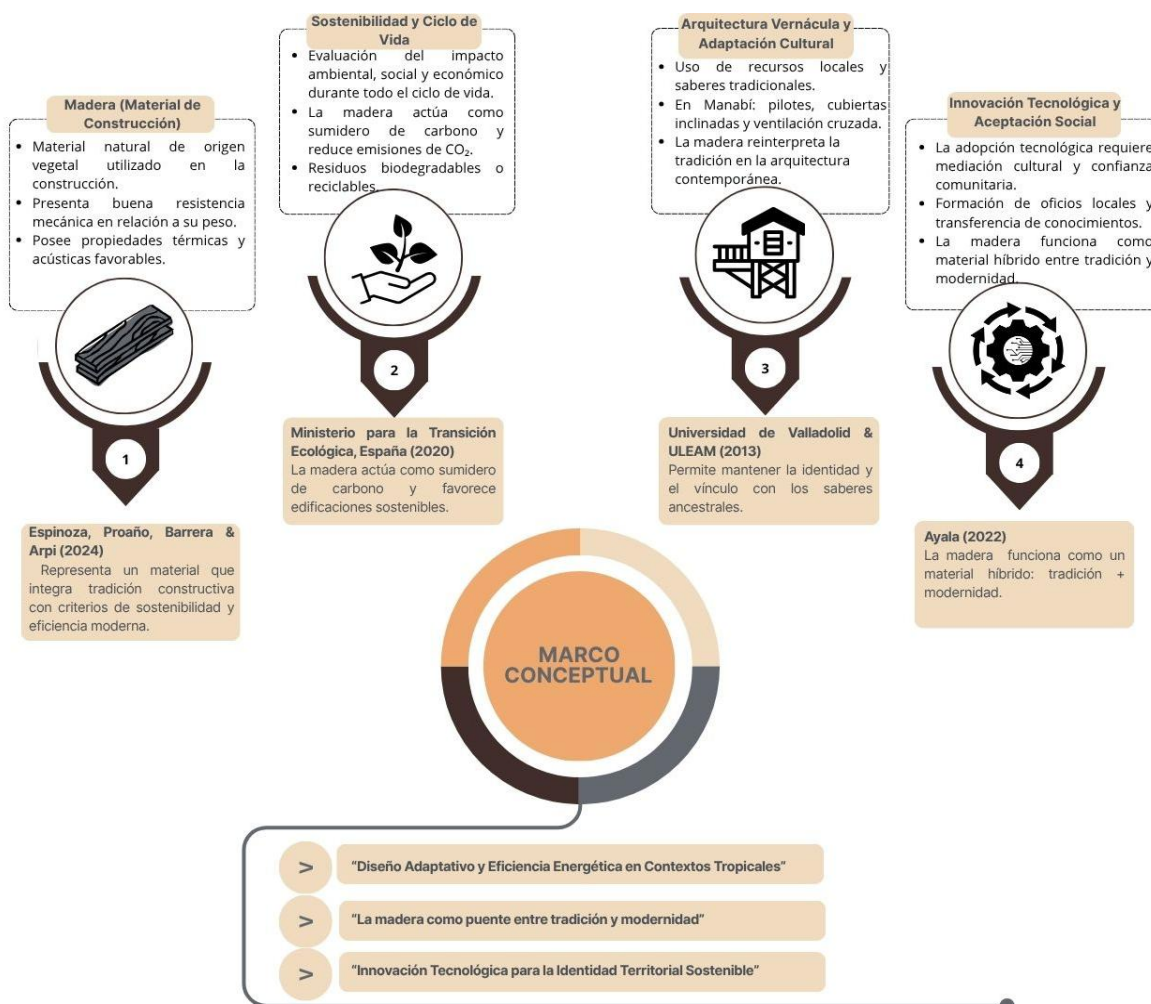
3.3.4. Innovación Tecnológica y Aceptación Social

La aceptación de nuevas tecnologías constructivas depende de la percepción social y cultural de los materiales y de los beneficios que estos aportan. Ayala (2022) sostiene que la incorporación de innovaciones requiere procesos de mediación cultural, incluyendo formación de oficios locales, transferencia de conocimientos y demostración de ventajas técnicas y ambientales.

En este marco, la madera laminada funciona como un material híbrido que combina tradición y modernidad. Su éxito depende de estrategias educativas y de comunicación que transmitan confianza, seguridad y ventajas ambientales a la población, a la vez que promuevan su integración en las prácticas constructivas locales.

3.3.5. Proyecto CEIBO: Integración de Conceptos

El Proyecto CEIBO en Montecristi representa un ejemplo práctico donde se conjugan todos los conceptos anteriores: se emplea madera laminada como material estructural y estético, integrando principios de arquitectura vernácula, sostenibilidad ambiental y eficiencia constructiva (Estudio YURA, 2025).

Figura 4*Aportes de los conceptos investigados**Nota.* Elaboración propia.

3.4. Marco Jurídico y Normativo

El estudio sobre la utilización de la madera como alternativa frente a los sistemas constructivos tradicionales de hormigón armado en Manabí se encuentra respaldado por un conjunto de normas y leyes nacionales e internacionales que promueven la innovación, sostenibilidad, eficiencia energética y seguridad estructural en la construcción. Estas normativas permiten asegurar que los proyectos constructivos cumplan con estándares de calidad, habitabilidad, sostenibilidad y seguridad, además de fomentar el desarrollo de tecnologías constructivas avanzadas adaptadas al contexto local.

3.4.1. Normas y Leyes nacionales

3.4.1.1. Constitución de la Republica del Ecuador

Ecuador, en su condición de país en vías de desarrollo que persigue el bien común como principio rector, en la Constitución de la Republica del Ecuador (2008) se mencionan mecanismos de gran relevancia y aporte para el presente trabajo de investigación.

Orientados a Sostenibilidad Ambiental y Uso Responsable de Recursos

- Constitución de la República del Ecuador, Art. 395: El artículo reconoce el derecho a vivir en un ambiente sano y equilibrado, promoviendo el uso responsable de los recursos naturales. La madera laminada, al ser un material renovable, reduce la dependencia de materiales de alta huella ambiental como el hormigón. Su uso contribuye a la mitigación de las emisiones de CO₂ y a la gestión responsable de los bosques, fomentando prácticas sostenibles en la industria de la construcción y asegurando edificios más ecológicos en Manabí.

3.4.1.2. Reglamentos Técnicos De Construcción

Orientados a Construcción con Madera y Sistemas Estructurales Innovadores

- NEC-SE-MD (Madera, Reglamento Ecuatoriano de la Construcción): El Reglamento Ecuatoriano de la Construcción establece las bases para el diseño seguro y eficiente de estructuras de madera. Su aplicación a la madera permite definir criterios claros de resistencia, durabilidad y clasificación de los elementos estructurales, garantizando que las edificaciones cumplan con altos estándares de seguridad. Sin embargo, un análisis crítico de la NEC-SE-MD evidencia vacíos normativos relevantes: la norma ecuatoriana no contempla criterios específicos de diseño para madera laminada encolada (Glulam) en sistemas de gran luz o media altura, a diferencia de normativas internacionales como la NCh2165/NCh2150 (Chile) o el Eurocódigo 5, que sí detallan parámetros de fabricación y diseño estructural para este material compuesto.

- NTE INEN 3009 (Elementos estructurales de madera): Esta norma asegura que los elementos de madera utilizados en la construcción cumplan con rigurosos criterios de calidad y rendimiento. Su orientación hacia la madera laminada permite que vigas, columnas y paneles estructurales tengan propiedades predecibles de resistencia, reduciendo riesgos en la ejecución de proyectos constructivos y asegurando su durabilidad en el tiempo. Además, fomenta la profesionalización de la industria maderera local y el uso de productos de ingeniería que optimizan recursos y disminuyen desperdicios.

Orientados a Seguridad y Resiliencia Estructural

- NEC-SE-HM (Hormigón armado, Reglamento Ecuatoriano de la Construcción): Aunque esta normativa regula el hormigón armado, sirve como referencia para comparar la eficiencia y seguridad de la madera frente a los sistemas tradicionales. Permite evaluar cómo la combinación de materiales y sistemas híbridos puede generar edificaciones seguras, resistentes a sismos y con un menor impacto ambiental, favoreciendo la transición hacia alternativas sostenibles en Manabí.

3.4.1.3. Plan De Políticas Públicas

- Plan Nacional de Desarrollo 2021–2025: Este plan promueve la adopción de tecnologías limpias y materiales sostenibles. La madera se inserta como una alternativa estratégica, permitiendo la construcción de edificaciones resilientes, eficientes y replicables en diferentes contextos urbanos y rurales. Además, su empleo impulsa la innovación en la construcción local, contribuyendo al fortalecimiento de la economía regional mediante el desarrollo de cadenas productivas asociadas a la madera de ingeniería.

3.4.1.4. Normas Internacionales De Fabricación De Madera Laminada

Orientados a Normas Internacionales y Referencias Técnicas

- ANSI/AITC A190.1 (Norteamérica) y EN 14080:2013 (Europa): Estas normas regulan la fabricación y especificaciones de la madera laminada encolada (Glulam),

garantizando que las estructuras construidas con este material cumplan estándares de resistencia, seguridad y durabilidad equivalentes o superiores a los sistemas tradicionales de hormigón armado. Su orientación está directamente vinculada a la profesionalización de los procesos de diseño y construcción, y proporciona un marco de referencia para proyectos que buscan sostenibilidad, eficiencia y reducción de la huella ambiental.

3.4.2. Normas Internacionales

Las normas internacionales desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de proyectos constructivos con madera, ofreciendo un marco de referencia común que garantiza calidad, seguridad y eficiencia estructural. Al establecer estándares de diseño, la resistencia, la durabilidad y la sostenibilidad que permiten un cambio de paradigma hacia soluciones de construcción modernizadas donde es posible sustituir o complementar el sistema convencional de hormigón armado. Asimismo, al promover criterios claros para la fabricación, ensamblaje e integración de los elementos de madera laminada, las normas internacionales contribuyen al desarrollo de dichos materiales de manera más profesional, optimizando su uso, reduciendo el desperdicio y también resultando en una construcción más segura, más resiliente y sostenible, diseñada para las condiciones sísmicas y climáticas de Manabí.

3.4.2.1. Normas ISO

En el ámbito internacional, la búsqueda constante de sostenibilidad, eficiencia y seguridad en la construcción ha impulsado la creación de normas de gran relevancia para el presente proyecto de investigación. Entre ellas destacan las normas ISO 37101 (2016), ISO 37106 (2021) e ISO 37122 (2019), que establecen mecanismos claros y precisos alineados con los objetivos propuestos en este trabajo, ofreciendo un marco técnico y sostenible para el desarrollo de proyectos constructivos con madera laminada.

Norma ISO 37101: Sistema de gestión para el desarrollo sostenible. Requisitos con orientación para su uso.

La ISO 37101 (2016) proporciona un marco para gestionar el desarrollo sostenible en las comunidades, con el objetivo principal de mejorar la sostenibilidad, la resiliencia y el bienestar de

los entornos urbanos y rurales. Esta norma se convierte en una referencia fundamental para la presente investigación, ya que ofrece directrices claras y precisas para la implementación de sistemas inteligentes y sostenibles. En el contexto de la construcción con madera, ISO 37101 guía el desarrollo de proyectos eficientes, funcionales y respetuosos con el medio ambiente, asegurando edificaciones que integren criterios de sostenibilidad social, ambiental y económica.

Norma ISO 37106: Estrategias para ciudades y comunidades sostenibles.

La ISO 37106 (2021) proporciona orientación para el desarrollo de estrategias que promuevan ciudades y comunidades sostenibles e inteligentes. Esta norma permite adaptar estrategias de gestión eficiente de recursos, integración de tecnologías inteligentes y optimización de procesos constructivos, lo cual es relevante para el uso de madera en proyectos que buscan eficiencia energética, reducción de residuos y mejora del confort en los espacios edificados.

Norma ISO 37122: Indicadores para medir el desempeño de ciudades inteligentes

La ISO 37122 (2019) establece indicadores para evaluar el desempeño de ciudades inteligentes, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Su aplicación en la presente investigación permite medir la eficiencia energética, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia de los proyectos constructivos con madera, promoviendo la transparencia, la mejora continua y la adopción de mejores prácticas a nivel urbano y comunitario.

3.4.2.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Las viviendas construidas con madera y sistemas innovadores representan una estrategia clave para avanzar en el cumplimiento de varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por Naciones Unidas (2015). Entre los ODS más relevantes para la presente investigación se encuentran:

Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante

- Meta 7.3: Aumentar sustancialmente la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- Meta 7.a: Ampliar el acceso a la energía renovable y tecnologías energéticas eficientes para todos.

- Meta 7.b: Mejorar la eficiencia energética y reducir la intensidad de las emisiones de carbono en todos los sectores.

El uso de madera laminada y sistemas constructivos eficientes permite reducir el consumo energético de los edificios, incorporar fuentes de energía renovable y aplicar tecnologías que optimicen el uso de recursos, contribuyendo al logro de estas metas y fomentando construcciones más sostenibles en Manabí.

Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura

- Meta 9.4: Aumentar sustancialmente la adopción de tecnologías limpias y ecológicas en la industria y los procesos de producción.
- Meta 9.c: Mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos y reducir a la mitad la intensidad del uso del agua.
- Meta 9.b: Apoyar el desarrollo de tecnologías, investigación y capacidades nacionales para las TIC.

La madera permite desarrollar proyectos arquitectónicos modernos y seguros, integrando técnicas de prefabricación, optimización de recursos y tecnologías limpias. Esto transforma los modelos de construcción tradicionales, acercando a Manabí a los estándares internacionales de innovación, eficiencia estructural y sostenibilidad.

Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles

- Meta 11.6: Reducir el impacto ambiental adverso per cápita de las ciudades, prestando atención a la calidad del aire y la gestión de residuos.
- Meta 11.a: Incrementar el número de ciudades y comunidades que implementan planes de acción integrales y participativos para mejorar la resiliencia y adaptación al cambio climático.
- Meta 11.c: Reducir las muertes y lesiones causadas por desastres naturales y aumentar el número de países con estrategias de reducción del riesgo de desastres.

Sustituir parcial o totalmente el hormigón armado por madera reduce la huella ambiental de las edificaciones, mejora la eficiencia en el uso de materiales y promueve ciudades más resilientes y adaptadas a los desafíos ambientales y climáticos.

Objetivo 12: Producción y consumo responsables

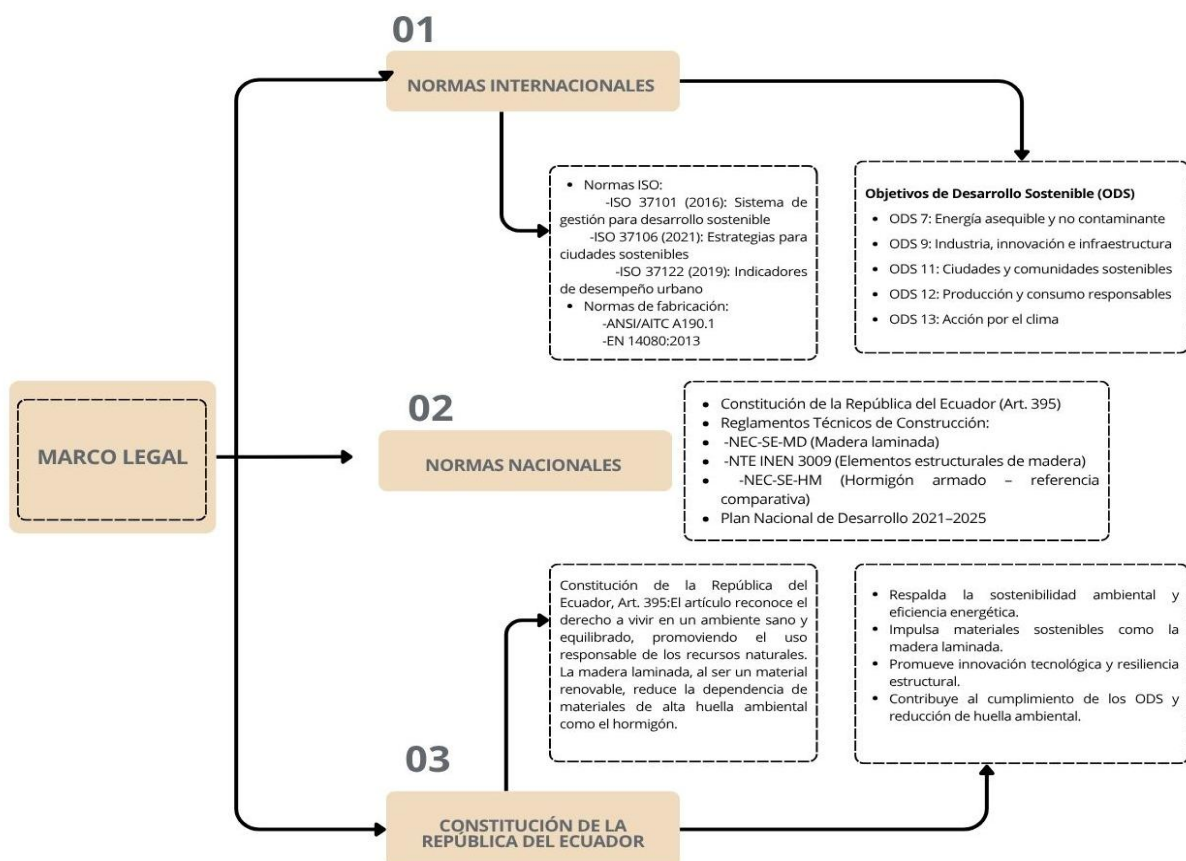
- Meta 12.2: Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
- Meta 12.5: Reducir sustancialmente la generación de desechos mediante prevención, reducción, reciclaje y reutilización.

La madera, proveniente de bosques gestionados sosteniblemente y procesada como producto de ingeniería, contribuye a un ciclo constructivo más ecológico, optimizando recursos y reduciendo desperdicios, reflejando un compromiso con la construcción responsable y la economía circular en Manabí.

Objetivo 13: Acción por el clima

- Meta 13.1: Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación frente a riesgos relacionados con el clima.

El uso de madera en edificaciones promueve estructuras más ligeras y resilientes, disminuyendo la huella de carbono y contribuyendo a la mitigación del cambio climático, alineándose con políticas de adaptación y sostenibilidad.

Figura 5*Marco legal a la utilización de la madera**Nota.* Elaboración propia.

3.5. Marco de repertorio

El presente marco de repertorio identifica y describe los dos casos de estudio seleccionados para el análisis comparativo de esta investigación: la Casa Ceibo (Montecristi, Manabí), referente regional de construcción en madera, y la vivienda tipo de hormigón armado ubicada en el sector Los Gavilanes de Manta, representativa del modelo constructivo predominante en el mercado habitacional de la provincia. Ambos casos fueron seleccionados por su pertinencia tipológica, su accesibilidad para el levantamiento de información técnica y su capacidad de representar, respectivamente, el sistema constructivo alternativo propuesto y el sistema convencional de referencia en el contexto geográfico, climático y sociocultural de Manabí.

3.5.1. Ejemplos

Caso 1 — Casa Ceibo

La Casa Ceibo es una vivienda unifamiliar de dos niveles ubicada en la Ciudadela Golf Club y Villas, en el cantón Montecristi, provincia de Manabí, Ecuador. El proyecto fue diseñado por el Estudio YURA y constituye uno de los referentes más relevantes de arquitectura sostenible en madera laminada en la región costera del país. Su concepción responde a un enfoque bioclimático integral, donde la forma, el material y la técnica constructiva actúan de manera sinérgica para generar condiciones de habitabilidad confortables en el contexto climático tropical-costero de Manabí.

Caso 2 — Vivienda Tipo (Urbanización, Sector Los Gavilanes, Manta)

La vivienda tipo corresponde a una unidad habitacional estandarizada y repetitiva perteneciente a una urbanización del sector Los Gavilanes, en el cantón Manta, provincia de Manabí. Representa el modelo constructivo predominante en el mercado habitacional de la región costera ecuatoriana: un sistema de pórticos de hormigón armado con cerramientos de bloque de hormigón hueco y cubierta liviana metálica. Su configuración tipológica responde a criterios de optimización de área construida, accesibilidad económica y disponibilidad de mano de obra local, consolidándose como la solución habitacional de mayor demanda en el segmento residencial de Manta.

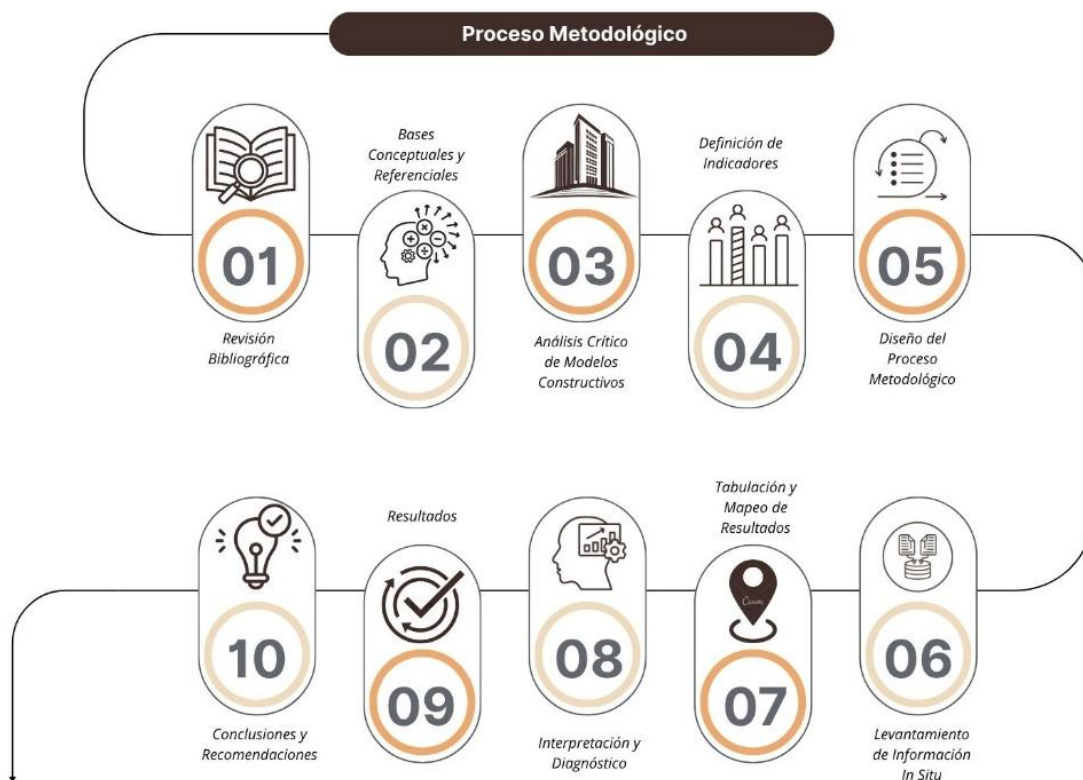
4. CAPITULO II. DISEÑO METODOLÓGICO

La búsqueda del conocimiento y la comprensión profunda de los aspectos relacionados con la aplicación de materiales sostenibles en la construcción exigen la utilización de metodologías rigurosas, sistemáticas y contextualizadas. En el marco de esta investigación exploratoria, el diseño metodológico se estructura con el fin de analizar la viabilidad técnica, ambiental, cultural y social de la madera como alternativa frente a los sistemas constructivos tradicionales de hormigón armado en la provincia de Manabí.

El enfoque metodológico planteado tiene como objetivo combinar el análisis documental con el estudio de casos y los enfoques de observación contextual para comprender de manera integral las dinámicas que intervienen en la adopción de nuevos sistemas constructivos sostenibles. Este proceso se desarrolla de manera secuencial, de acuerdo con el esquema metodológico detallado a continuación.

Figura 6

Esquema Metodológico



Nota. Elaboración propia.

4.1. Métodos

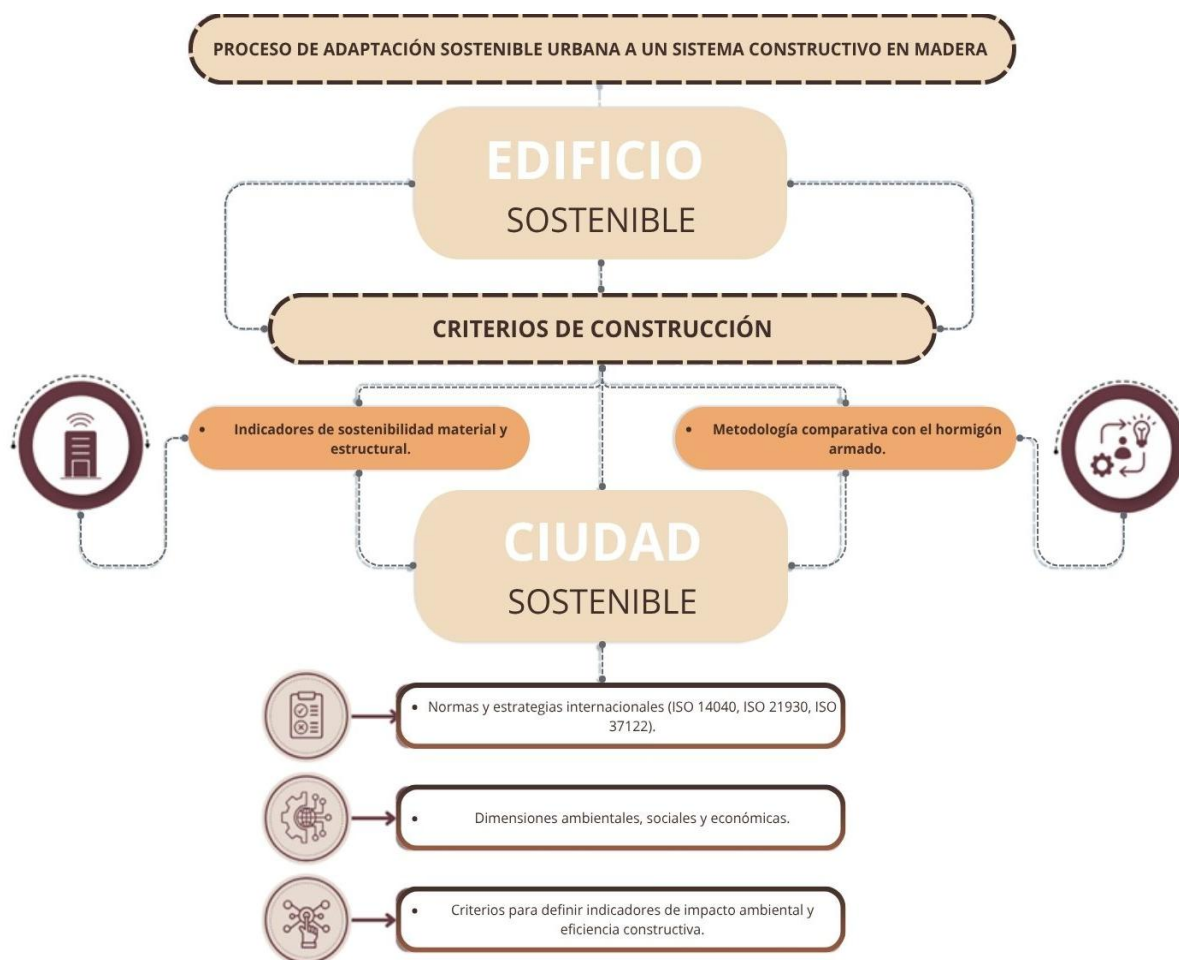
El desarrollo de la presente investigación se fundamenta en la aplicación de métodos científicos que permiten analizar con rigor el fenómeno constructivo desde una perspectiva integral, coherente con los objetivos planteados. En este sentido, se emplean los métodos analítico y sintético, los cuales posibilitan comprender en profundidad el comportamiento, las ventajas y las limitaciones de la madera como alternativa frente a los sistemas tradicionales de hormigón armado en la provincia de Manabí.

El uso de los métodos considerados en este estudio responde a la necesidad de dos aspectos complementarios que debemos considerar en relación con el objeto de estudio; el método analítico permite descomponer el fenómeno constructivo en aspectos estructurales, térmicos, ambientales y económicos en el análisis particularista; el método sintético posibilita integrar los resultados parciales obtenidos desde una perspectiva global y las conclusiones extraídas pueden ayudar a guiar el uso sostenible y viable de la madera en contextos locales.

Este enfoque metodológico mixto está destinado a asegurar que se realice un análisis profundo y sistemático al mismo tiempo que promueve la construcción replicable en la industria de la construcción sostenible. A través de la comparación de los dos sistemas constructivos de madera y hormigón armado, se busca que la evidencia técnica contribuya a un cambio hacia edificaciones que tengan un menor impacto ambiental y mayor eficiencia estructural y que sean más aplicables tanto al clima de Manabí como a su aspecto sísmico.

Figura 7

Proceso de adaptación sostenible urbana a un sistema constructivo de madera



Nota. Elaboración propia.

En este sentido, la búsqueda de conocimiento y la comprensión profunda del fenómeno constructivo requieren la aplicación de metodologías rigurosas y sistemáticas que permitan examinar la realidad en su contexto específico. Dentro de ese marco, el estudio de caso se formula como un enfoque ideal para investigar el análisis de la madera como una alternativa sostenible a los sistemas convencionales de hormigón armado.

Este método se caracteriza por su capacidad de analizar un objeto de estudio dentro de su entorno real, considerando las variables técnicas, ambientales, estructurales y sociales que lo conforman. Basado en el uso del estudio de caso, se pueden observar directamente aplicaciones

realistas del material en edificios reales, así como estudiar su desempeño en el contexto local, basado en su capacidad para cumplir con los requisitos de sostenibilidad y eficiencia estructural.

En este documento, seleccionamos el estudio de un caso de estudio: Casa Ceibo en Montecristi, Manabí, como un ejemplo de la implementación de arquitectura sostenible, con la madera como el principal elemento estructural. Este método permite una medición detallada de las operaciones de construcción, el uso de materiales y la evaluación de los resultados de la construcción, para permitir la comparación con el sistema usual de hormigón armado.

El método de estudio de caso permite una comprensión empírica y basada en el contexto del fenómeno que se estudia, al tiempo que contribuye a la producción de conocimiento transferible y fácilmente replicable para futuros proyectos destinados a disminuir las emisiones de carbono y promover prácticas responsables de materiales sostenibles en la arquitectura ecuatoriana.

4.1.1. Método de Estudio de Caso

El método de estudio de caso se aplica en esta investigación con el propósito de analizar en profundidad la viabilidad técnica, estructural y ambiental de la madera como alternativa frente al hormigón armado en el contexto constructivo de Manabí. Este enfoque permite examinar el fenómeno en su entorno real, considerando las condiciones locales, los materiales empleados y los resultados obtenidos a través de un ejemplo representativo.

Por lo tanto, la Casa Ceibo en Montecristi es elegida como objeto de estudio, por constituir un referente regional que involucra el uso de madera laminada en su sistema estructural. Con base en su análisis, el objetivo es explorar las ventajas, desventajas y el potencial de reproducir este material en contraposición al sistema convencional de hormigón armado, contribuyendo así a la verificación de alternativas de construcción sostenible adecuadas al caso ecuatoriano.

4.1.1.1. Dimensiones de la Construcción Sostenible orientadas al uso de Madera en Manabí

Las dimensiones de la construcción sostenible permiten evaluar el grado de avance hacia prácticas edificatorias más responsables y eficientes, contribuyendo a la toma de decisiones informadas en el ámbito arquitectónico y urbano. En este contexto, el análisis de las dimensiones

asociadas al uso de la madera posibilita medir su impacto ambiental, estructural, tecnológico y sociocultural, proporcionando una visión integral sobre su aplicabilidad en la provincia de Manabí. Estas dimensiones se detallan a continuación.

Tabla 1

Dimensiones en la construcción sostenible orientadas al uso de madera

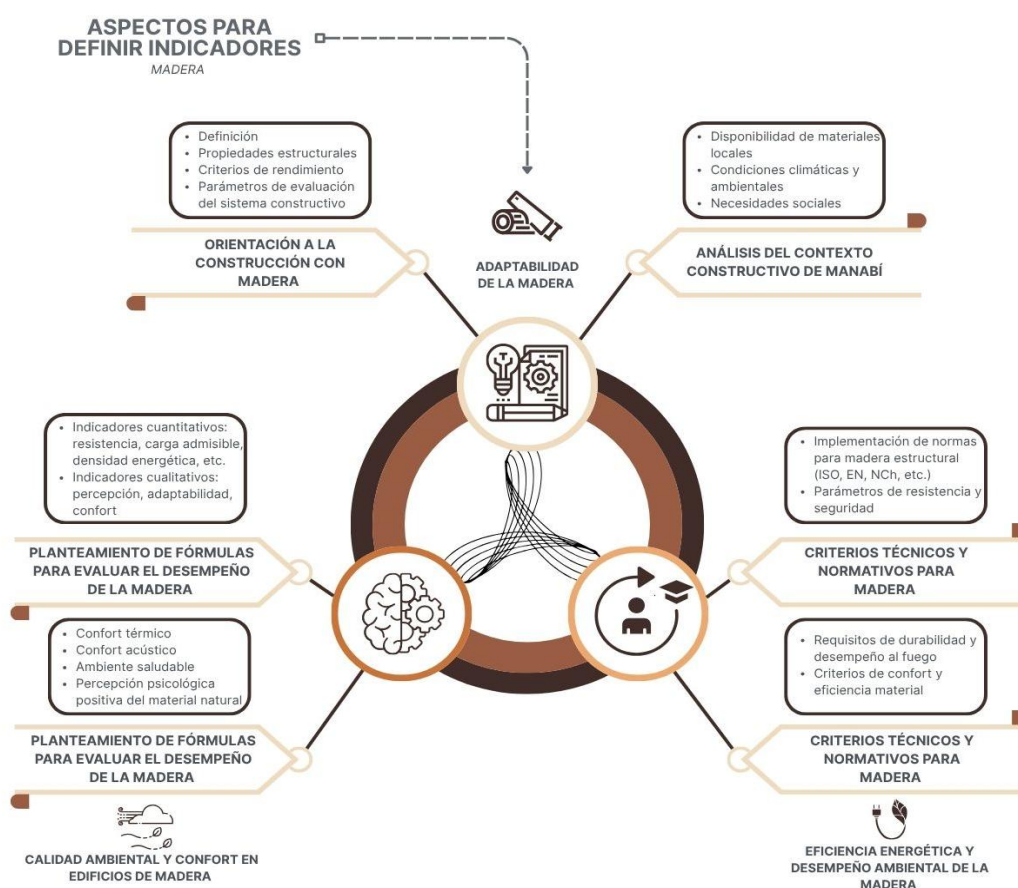
Dimensión	Descripción	Indicadores de evaluación
Dimensión Ambiental	Evalúa el impacto ecológico derivado de la elección del material y su proceso constructivo. La madera, al ser un material renovable y con baja huella de carbono, contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático y al aprovechamiento responsable de los recursos naturales.	- Huella de carbono incorporada - Emisiones de CO₂ por m³ - Eficiencia energética durante su ciclo de vida.
Dimensión Estructural	Analiza peso total de la estructura de la madera en comparación con el hormigón armado, para obtener conclusiones de durabilidad y desempeño estructural.	- Densidad del material por m² - Relación Resistencia/Peso - Luces libres
Dimensión Tecnológica	Examina el grado de innovación e implementación de los materiales para considerar su nivel de confort y eficiencia frente a situaciones naturales.	- Confort acústico en las edificaciones. - Confort térmico y ambiental en las edificaciones. - Resistencia de materiales frente a incendios.
Dimensión Sociocultural	Considera la aceptación, percepción y apropiación social del uso de la madera, así como su contribución al bienestar, confort y sentido de identidad en el entorno construido.	- Percepción social y cultural del material. - Aceptación en el mercado local y profesional. - Generación de empleo local y reactivación económica sostenible.

Nota. Elaboración propia.

Los criterios e indicadores específicos que se han desarrollado, basados en dimensiones y aspectos evaluables como se detalla en la Tabla 1, están destinados a evaluar la madera como una alternativa sostenible frente al hormigón armado para futuros proyectos de construcción en la provincia de Manabí. Estos indicadores permitirán una evaluación detallada del desempeño ambiental, estructural, tecnológico y sociocultural del material, y esto contribuirá con evidencia científica para su posible posición como un sistema de construcción ecoeficiente.

Figura 8

Aspectos para definir indicadores constructivos de madera



Nota. Elaboración propia.

La adaptabilidad de los criterios de sostenibilidad arquitectónica, que permiten integrar la eficiencia estructural con el bienestar ambiental, resulta clave para definir los principales ejes de la construcción con madera. Estos indicadores, detallados en la Tabla 1 y la Figura 8, convergen los criterios de eficiencia energética, reducción de huella de carbono, confort térmico y aprovechamiento responsable de recursos naturales, demostrando cómo este material puede

responder a las demandas contemporáneas de la edificación sostenible. Al incorporar procesos de innovación tecnológica y diseño bioclimático, se abordan las dimensiones del desarrollo arquitectónico sostenible en Manabí de manera integral.

Tabla 2

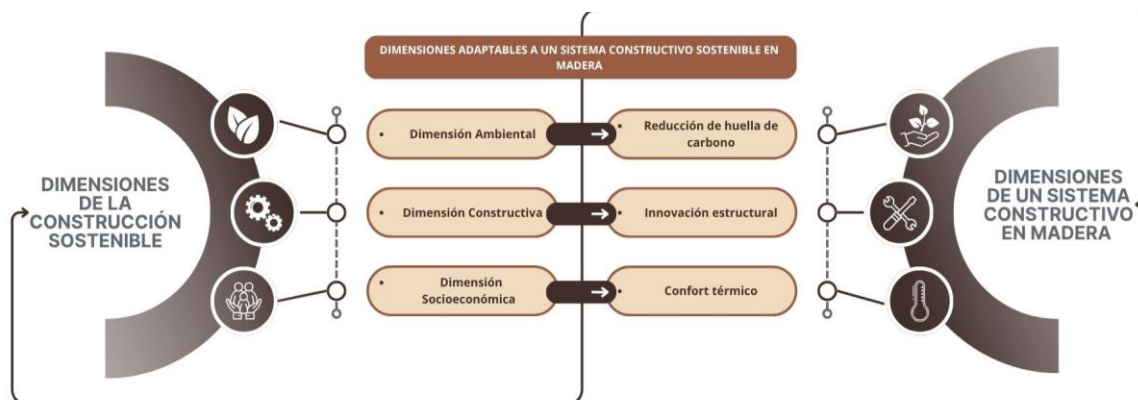
Ejes de evaluación basados en las dimensiones de construcción de madera

Dimensión	Ejes de Evaluación	Indicadores Específicos	Criterios de Evaluación / Verificación
Ambiental	Reducción de huella de carbono	Emisiones de CO ₂ evitadas frente al hormigón	Comparación de huella de carbono por m ³ de material utilizado (base: ISO 14067)
Estructural	Ligereza y flexibilidad constructiva	Peso estructural y velocidad de montaje	Evaluación de masa estructural y tiempo de construcción en obra
Económica	Rentabilidad del sistema constructivo	Costo-beneficio frente a sistemas convencionales	Comparación de costos totales de construcción y operación
Social y Cultural	Integración con la identidad local	Uso de materiales naturales y aceptación social	Encuestas de percepción ciudadana y valoración estética del material
Tecnológica	Eficiencia energética pasiva	Capacidad de aislamiento térmico y acústico	Medición de transmitancia térmica (U) y absorción sonora

Nota. Elaboración propia.

Figura 9

Dimensiones adaptables a un sistema constructivo sostenible en madera



Nota. Elaboración propia.

De esta manera, la implementación de sistemas constructivos basados en madera, detallados en la Tabla 2 y representados en la Figura 9, constituye una oportunidad clave para transformar la práctica arquitectónica hacia un modelo más sostenible y responsable con el medio ambiente. Cuando estos principios se combinan con los elementos de eficiencia estructural, bajo impacto ambiental y el uso de recursos renovables, la construcción en madera no solo reduce significativamente las huellas de carbono, sino que también fomenta la adaptación climática y la sostenibilidad en el contexto urbano y académico. Ya sea a través de la optimización energética y la gestión responsable de materiales, o mejorando el diseño bioclimático, un sistema de construcción así puede estar a la vanguardia del desarrollo de edificios que sean tanto resilientes como respetuosos con el medio ambiente y socialmente responsables para ayudar a que la comunidad de la construcción sea más equitativa y sostenible en el futuro.

Para evaluar de manera integral si el sistema de construcción en madera es más sostenible que el hormigón armado, sobre una base teórica, se indica un modelo analítico basado en cinco dimensiones básicas que incluyen ambiental, estructural, económica, social y tecnológica, desarrollando un marco con diferentes ejes y sus indicadores asociados que se indican en la Tabla 3. Dicho marco permite una comparación del rendimiento de los sistemas de construcción, basándose en diversas variables como la huella de carbono, la eficiencia energética, la durabilidad estructural, los costos operativos y el confort ambiental. Para facilitar la comprensión y su aplicación dentro de esta investigación, los indicadores han sido agrupados y sistematizados en la Tabla 3, la cual servirá como base para la interpretación de los resultados y la elaboración del diagnóstico final.

Tabla 3*Indicadores de evaluación de construcción con madera*

Dimensión	Eje de Evaluación	Indicador	Unidad / Parámetro de Medición	Método de Verificación	Valor Esperado / Meta
Ambiental	Reducción de huella de carbono	Emisiones de CO ₂ evitadas por m ³ de material	kg CO ₂ e/m ³	Comparación mediante análisis de ciclo de vida (ACV)	Reducción ≥ 60 % frente al hormigón
Estructural	Ligereza y flexibilidad constructiva	Peso estructural y velocidad de montaje	kg/m ²	Cálculo de densidades estructurales (NEC-SE-MD)	Densidad mucho menor al hormigón armado
Económica	Rentabilidad del sistema	Relación costo-beneficio	USD/m ²	Análisis de costo total	Hasta un 15 % más respecto al hormigón
Social y Cultural	Aceptación comunitaria	Nivel de percepción positiva	Respuestas favorables	Entrevistas	Gran aceptación
Tecnológica	Eficiencia energética pasiva y confort	Capacidad de aislamiento térmico y acústico	Valor U (W/m ² ·K) Decibeles (dB)	Cálculo de eficiencias	$U \leq 0.35$ W/m ² ·K

Nota. Elaboración propia.

Partiendo de los indicadores sintetizados en la Tabla 2, se detalla en la Tabla 3 los instrumentos de comprobación y los actores involucrados que permiten evaluar y diagnosticar el desempeño del sistema constructivo en madera frente al hormigón armado. Esta evaluación integral busca identificar oportunidades de mejora y valorar la efectividad de las soluciones implementadas, considerando aspectos fundamentales como la reducción de la huella de carbono, la eficiencia energética, la durabilidad estructural y el confort ambiental.

4.2. Técnicas y Herramientas

En el marco de esta investigación exploratoria, las técnicas e instrumentos de recolección de información se seleccionaron con el propósito de obtener una comprensión amplia, contextual y sustentada del fenómeno constructivo asociado al uso de madera como alternativa sostenible frente al hormigón armado en edificaciones del contexto manabita, tomando como referencia el Proyecto CEIBO en Montecristi.

A través de las entrevistas, se recopilarán datos cuantitativos y cualitativos sobre la percepción de profesionales y estudiantes de la provincia de Manabí en relación con el uso de la madera como alternativa estructural frente al hormigón armado. Este instrumento busca identificar el nivel de aceptación, conocimiento y valoración que la comunidad local otorga a este material en aspectos como resistencia, durabilidad, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica.

4.3. Fuentes

En este sentido, las fuentes de información se clasifican en primarias y secundarias, ambas aportarán datos cruciales para analizar y evaluar la información necesaria que sustente el desarrollo de la investigación sobre la madera como alternativa frente a los sistemas constructivos tradicionales de hormigón armado en Manabí. La integración de ambas fuentes permitirá obtener una visión completa, contrastada y contextual del fenómeno constructivo, considerando tanto los aspectos técnicos como los socioculturales y ambientales.

Las fuentes clave son datos de investigación que se recogerán directamente en el campo en persona (observación participante y no participante), entrevistas con personas en el campo de la construcción, como arquitectos e ingenieros.

Estos métodos permitirán evaluar la percepción, aceptación y viabilidad técnica del uso de la madera, así como las principales limitaciones para su implementación en Manabí. Además, se realizará observación cara a cara en sitios de construcción y centros de carpintería estructural para estudiar la producción, disponibilidad de materiales y el conocimiento actual.

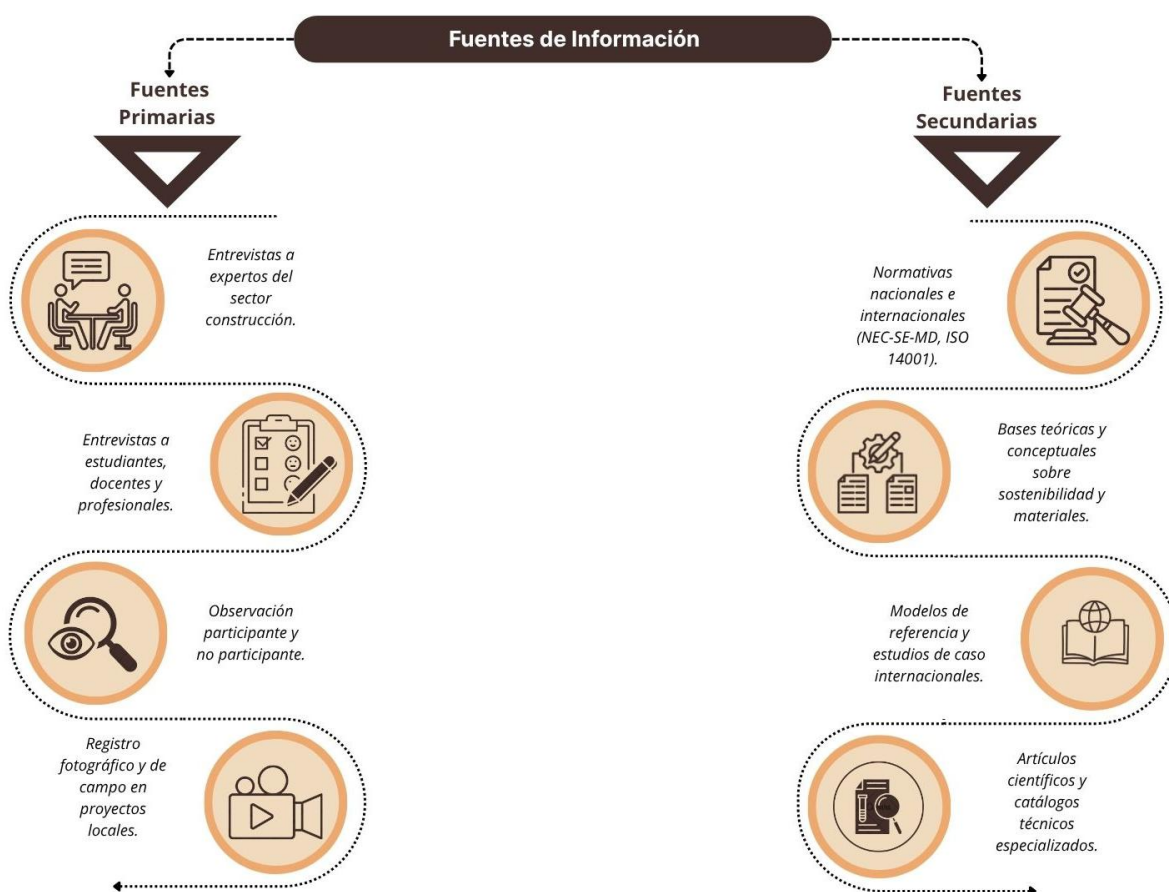
De esta forma, las fuentes primarias proporcionarán conocimientos verificables y contextualmente relevantes necesarios para entender las prácticas de construcción actuales en la región y cuál podría ser su dirección potencial hacia sistemas más sostenibles e innovadores.

Utilizaremos fuentes secundarias, incluidas regulaciones nacionales e internacionales, artículos científicos, tesis universitarias, catálogos técnicos y documentos institucionales sobre construcción sostenible, eficiencia energética y tecnología de la madera.

En conjunto, las fuentes secundarias permitirán establecer el marco teórico y conceptual sobre el cual se apoya el análisis, proporcionando antecedentes, comparaciones y experiencias previas que orientan la propuesta investigativa y garantizan su coherencia metodológica.

Figura 10

Fuentes de información



Nota. Elaboración propia.

5. CAPITULO III. DIAGNÓSTICO Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Diagnóstico del Área de Estudio: Manabí

El diagnóstico del área de estudio es fundamental para contextualizar las variables ambientales, geográficas y sísmicas que inciden directamente en el desempeño de cualquier sistema constructivo propuesto para la región. La provincia de Manabí, por su ubicación y características geológicas, presenta un escenario riguroso que pone a prueba tanto a los sistemas tradicionales como a las innovaciones tecnológicas.

5.1.1. Caracterización climática y geográfica del área de estudio

La provincia de Manabí se encuentra ubicada en la región litoral o costa del Ecuador. Geográficamente, su proximidad al océano Pacífico y su relieve le otorgan un clima tropical seco a tropical húmedo dependiendo de la microzona. Las temperaturas medias anuales oscilan consistentemente entre los 24°C y 27°C, presentando picos máximos que pueden alcanzar los 30°C a 34°C durante las horas de mayor insolación, y mínimas que rara vez descienden de los 20°C a 23°C. Esta constante térmica, sumada a niveles variables de humedad relativa y salinidad en las zonas costeras, exige que los materiales de construcción posean una alta resistencia al deterioro por factores ambientales.

Desde el punto de vista geográfico y forestal, Manabí cuenta con un historial vernáculo ligado a los recursos de su entorno. Tradicionalmente, la caña guadua, el bahareque y maderas locales han sido los protagonistas de la arquitectura de la región. El entorno natural no solo provee una fuente potencial de materia prima renovable, sino que también establece las bases para un diseño bioclimático necesario.

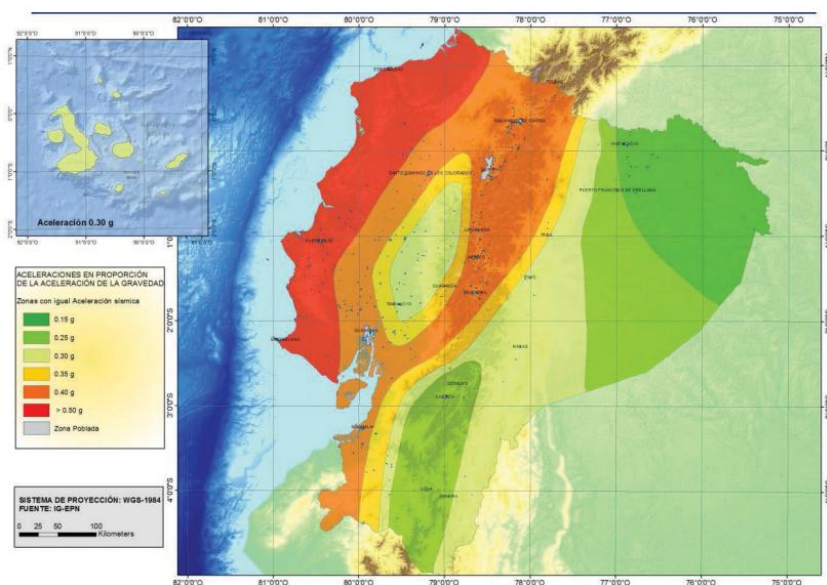
5.1.2. Caracterización sísmica y condiciones de riesgo estructural

Uno de los factores más críticos y determinantes en la construcción dentro de la provincia de Manabí es su alto riesgo sísmico. Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS), el litoral ecuatoriano, y específicamente Manabí, se clasifica dentro de la Zona Sísmica V, lo que representa una amenaza sísmica muy alta. El factor de zona asignado es $Z = 0.50g$.

Esta realidad fue trágicamente evidenciada durante el terremoto de abril de 2016, un fenómeno que redefinió la percepción social y las necesidades técnicas de la construcción en la provincia. Los elementos estructurales requieren la combinación perfecta de resistencia, ductilidad y, fundamentalmente, un control estricto de la masa del edificio. Las fuerzas sísmicas son proporcionales a la masa del edificio ($F = m \cdot a$), por lo tanto, sistemas pesados como el hormigón armado atraen mayores fuerzas inerciales, lo que resulta en cimientos robustos y refuerzos sustanciales. Sin embargo, dado que reduce drásticamente la masa que participa en eventos sísmicos, los sistemas ligeros ofrecen una ventaja mecánica intrínseca.

Figura 11

Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z



Nota. Obtenido de NEC-SE-DS.

5.2. Diagnóstico del Objeto de Estudio

Para llevar a cabo un análisis comparativo riguroso, objetivo y cuantificable, se han seleccionado dos objetos de estudio que representan fielmente los dos modelos constructivos a contrastar. Ambos se emplazan en la misma región climática y sísmica, lo que permite aislar las variables del entorno y evaluar puramente el desempeño de los materiales y sus tipologías asociadas.

5.2.1. Vivienda de Referencia en Hormigón Armado (Urbanización Tipo, Manta – sector los Gavilanes)

Esta edificación responde a la tipología de vivienda tipo estandarizada y repetitiva, característica del modelo constructivo predominante en la región, consolidado como referente de solidez estructural y accesibilidad económica en el mercado habitacional de Manta.

- **Área de construcción:** 44.27 m² en planta baja y 66.78 m² en planta alta (Total: 111 m²).
- **Sistema estructural:** Hormigón armado simple (resistencia $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$).
- **Elementos verticales:** Columnas de secciones de 30 x 30 cm y 20 x 30 cm.
- **Elementos horizontales:** Vigas de 30 x 20 cm, soportando losas aligeradas de entrepiso (20 cm de espesor).

5.2.2. Casa Ceibo en Madera (Ciudadela Golf Club y Villas, Montecristi)

Esta edificación responde a una tipología personalizada por cliente único, diseñada bajo parámetros de alta gama, sostenibilidad e innovación tecnológica.

- **Área de construcción:** 244.1 m² en planta baja y 85.9 m² en planta alta (Total: ~330 m²).
- **Sistema estructural:** Madera Maciza de Colorado y Madera Laminada Encolada (Glulam), calidad GL24h.
- **Elementos verticales:** Columnas compuestas formadas por dos tablones de madera de colorado de 14 x 7 cm separadas por una junta de 7 cm, creando una columna final hueca/aligerada de 14 x 21 cm.
- **Elementos horizontales:** Vigas laminadas de 14 x 21 cm (vigas de cubierta) y vigas de colorado de 7 x 21 cm (viguetas de PB) y 7 x 14 cm (viguetas de entrepiso), capaces de cubrir luces importantes.
- **Cubierta:** Diseño de cubierta inclinada curva, utilizando la flexibilidad del Glulam para integrar forma arquitectónica y respuesta bioclimática pasiva.

5.3. Análisis Estructural Comparativo

El análisis estructural busca desmitificar la percepción de debilidad de la madera frente al hormigón, evaluando parámetros críticos como la relación resistencia-peso y resistencia.

5.3.1. Resistencia y capacidad portante de la estructura de madera

La madera empleada en la Casa Ceibo combina dos especies/tipologías:

- **Columnas de Colorado:** Madera maciza de Colorado (dos tablones unidos), densidad $\approx 500 \text{ kg/m}^3$ (Cevallos Saavedra & Morejón Armijo, s.f.).
- **Vigas laminadas (cubierta):** GL24h, densidad $\approx 410 \text{ kg/m}^3$ (Adeo, s.f.)
- **Viguetas de Colorado (PB y entrepiso):** Madera maciza de Colorado, densidad $\approx 500 \text{ kg/m}^3$ (Cevallos Saavedra & Morejón Armijo, s.f.)

Tabla 4

Cálculo de peso estructural de la vivienda de madera

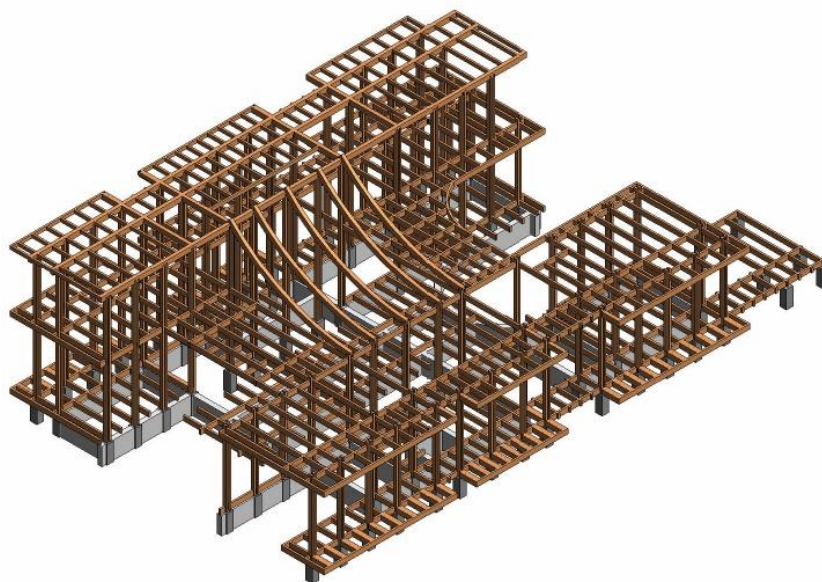
Elemento	Sección (cm)	Área sólida (m ²)	Densidad (kg/m ³)	Peso (kg/m lineal)	Metros lineales (m)	Peso total (kg)
Columna compuesta (2×tablón 14×7)	14 × 21 (hueca 14×7)	0.0196	500	9.80	667.7 m	6543.46
Viga laminada de cubierta (Glulam)	14 × 21	0.0294	410	12.05	109.9 m	1324.29
Vigueta Colorado	7 × 21	0.0147	500	7.35	1098.7 m	8075.44
Vigueta Colorado	7 × 14	0.0098	500	4.9	122.8 m	601.72
Entablado PB	-	207.9	7.50 kg/m ²	-	-	1,559.25
Entrepiso	-	85.9	19.0 kg/m ²	-	-	1,632.10
TOTAL						19,736.26 kg

Nota. Elaboración propia. Datos de longitud obtenidos del 3D estructural.

Figura 12

3D estructural vivienda de madera

A	B
Tipo	Longitud
Madera 70 x 140 m	122.83
Madera 70 x 210 m	1098.77
Madera 140 x 210	109.90
Total general: 395	1331.50



Nota. Modelo estructural 3D de la Casa Ceibo — Sistema de madera maciza Colorado y Glulam GL24h. Elaboración propia.

5.3.2. Resistencia y capacidad portante de la estructura de hormigón armado

La estructura de la vivienda emplea hormigón armado con resistencia $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, combinando los siguientes elementos estructurales:

- **Columnas de hormigón armado:** Elementos verticales de secciones $30 \times 30 \text{ cm}$ (8 unidades) y $20 \times 30 \text{ cm}$ (10 unidades), densidad del hormigón armado $\approx 2400 \text{ kg/m}^3$
- **Vigas de hormigón armado:** Elementos horizontales de sección $30 \times 20 \text{ cm}$, diferenciadas en vigas de entrepiso (soportan losa aligerada) y vigas de cubierta (soportan sistema Steel Panel), densidad $\approx 2400 \text{ kg/m}^3$
- **Losa aligerada de entrepiso:** Losa de 20 cm de espesor con bloques de alivianamiento, peso estándar $\approx 300 \text{ kg/m}^2$ · Área total: 44.27 m^2 · Peso total: $12,395.60 \text{ kg}$.
- **Cubierta liviana Steel Panel:** Sistema metálico liviano con planchas Steel Panel AR-2000 de 0.60 mm de espesor sobre perfiles galvanizados tipo G de $100 \times 80 \times 16 \times 3 \text{ mm}$, con

un peso total del sistema de 5.33 kg/m^2 para la plancha y $\approx 12 \text{ kg/m}^2$ considerando el sistema completo incluyendo perfiles, conectores y accesorios. · Área total: 61.04 m^2 ·
Peso total: 732.48 kg

Tabla 5

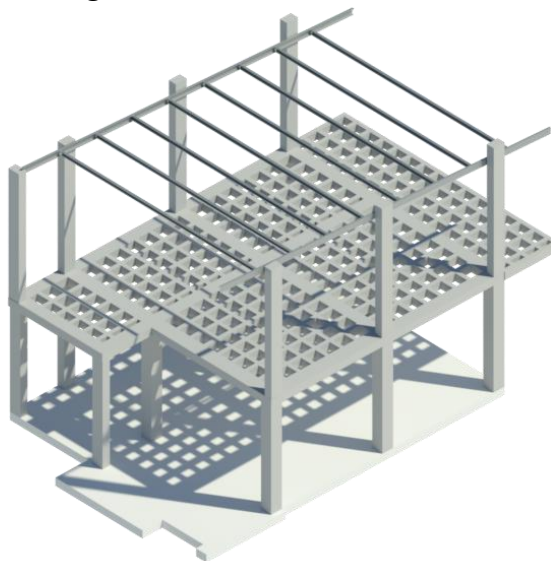
Cálculo de peso estructural de la vivienda de hormigón

Elemento	Sección (cm)	Área sólida (m^2)	Densidad (kg/m^3)	Peso (kg/m lineal)	Metros lineales (m)	Peso total (kg)
Columna 30×30	30×30	0.09	2400	216	41.20 m	8,899.20
Columna 20×30	20×30	0.06	2400	144	51.50 m	7,416.00
Viga entrepiso 20×30	20×30	0.06	2400	144	50.03 m	7,204.32
Losa aligerada e=20cm	—	44.27 m^2	300 kg/m^2	—	—	13,281.00
Cubierta Steel Panel AR-2000	—	61.04 m^2	12 kg/m^2	—	—	732.48
TOTAL						37,532.00 kg

Nota. Elaboración propia.

Figura 13

3D estructural vivienda de hormigón



Nota. Modelo estructural 3D de la vivienda. Elaboración propia.

5.3.3. Análisis comparativo de desempeño estructural entre ambos sistemas

Tabla 6

Análisis comparativo estructural

Parámetro / Indicador	Madera colorado y laminada (GL24h)	Hormigón Armado ($f'_c=210$ kg/cm ²)
Densidad del material por m ²	19,736.26 kg/330 m ² = 59.81 kg/m²	37,532.00 kg/111 m ² = 338.12 kg/m²
Peso columna por metro lineal	9.80 kg/m x2 = 19.6 kg/m	30×30 → 216 kg/m 20×30 → 144 kg/m
Peso viga por metro lineal	7.35 kg/m 12.05 kg/m	144 kg/m
Relación Resistencia Peso	Alta eficiencia 203.38-204.3 MPa·m/kN	Baja eficiencia 14.89 MPa·m/kN
Luces Libres Predominantes	2.24 a 5.6 metros	3.10 a 4.97 metros

Nota. Elaboración propia. Datos estructurales obtenidos del 3D computarizado en Revit.

Cálculo de relación resistencia/peso en anexos (Adeo, s.f) (NEC-SE-HM).

El hormigón armado acumula una densidad estructural de 338.12 kg/m², casi 6 veces superior a la de la madera (59.81 kg/m²), generando mayores cargas sobre la cimentación y mayor demanda estructural global, con pesos por metro lineal de entre 144 y 216 kg/m frente a los 7.35-12.05 y 19.6 kg/m de los elementos leñosos. Sin embargo, esta mayor masa no se traduce proporcionalmente en mayor resistencia: la relación resistencia-peso de la viga de hormigón de 30×20 cm es solo de 14.89 MPa·m/kN (en comparación con 203.38 MPa·m/kN de GL24h), lo que significa que la madera proporciona 17 veces la resistencia por unidad de peso. Esta condición, y los vanos libres dominantes (3.10 a 4.97 m frente al sistema de madera de 2.24 a 5.6 m), confirman que el hormigón armado necesita una masa estructural más pesada para ofrecer el mismo rendimiento espacial y mecánico.

5.4. Análisis ambiental comparativo: huella de carbono y ciclo de vida

La industria de la construcción representa casi el 34% de las emisiones globales de CO₂ (UNEP & GlobalABC, 2024). La selección del sistema estructural no es solo una elección técnica; es una decisión ambiental donde el rendimiento ambiental del edificio se ve influenciado en varias etapas de la vida del edificio.

5.4.1. Huella de carbono incorporada y emisiones de CO₂ por m³ en la vivienda de madera

El carbono almacenado en la madera no es un beneficio teórico ni una promesa futura: es una realidad física mensurable que ocurre durante décadas de crecimiento forestal y que permanece retenida en la estructura del edificio durante toda su vida útil.

El mecanismo es directo: mediante la fotosíntesis, los árboles absorben CO₂ atmosférico y fijan el carbono en su estructura celular. Cuando la madera es procesada y utilizada en construcción, ese carbono queda almacenado indefinidamente mientras el material permanezca en uso. Aplicando la metodología del IPCC (2006), que establece que la biomasa seca de la madera contiene aproximadamente el 50% de carbono en peso, y aplicando el factor de conversión carbono-CO₂ ($44/12 = 3.667$), es posible calcular con precisión el CO₂ retenido por metro cúbico de cada material:

Para las vigas de cubierta en Glulam GL24h (densidad 480 kg/m³), el carbono almacenado es de 880 kg CO₂/m³, valor que supera entre 2.5 y 6.5 veces su huella de producción de 134 kg CO₂/m³, resultando en un balance neto claramente negativo. Para las columnas y viguetas en madera maciza de Colorado (densidad 550 kg/m³), el carbono almacenado asciende a 1,008 kg CO₂/m³, frente a una huella de producción de apenas 80–150 kg CO₂/m³, lo que arroja el balance más favorable del sistema: netamente negativo y sin ambigüedad.

En ambos casos el balance es el mismo: la cantidad de CO₂ retenido en la estructura supera ampliamente las emisiones generadas para producirla, convirtiendo a la Casa Ceibo, en su conjunto, en una edificación que actúa como sumidero de carbono activo durante toda su vida útil estimada de más de 50 años (IPCC, 2006; WoodWorks, 2023).

Tabla 7*Huella de carbono y emisiones en vivienda de madera*

Elemento	Tipología	Huella de Producción	CO ₂ Almacenado/m ³	Balance Neto
Vigas de cubierta	Glulam GL24h	134 kg CO ₂ /m ³ (0.28 kgCO ₂ /kg × 480 kg/m ³)	~880 kg CO ₂ /m ³	Negativo (sumidero)
Columnas y viguetas	Madera maciza Colorado	80–150 kg CO ₂ /m ³	~1,008 kg CO ₂ /m ³	Netamente negativo

Nota. Elaboración propia.

5.4.2. Huella de carbono incorporada y emisiones de CO₂ por m³ en la vivienda de hormigón armado

El hormigón armado con resistencia $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ presenta una huella de producción significativamente mayor que otros sistemas constructivos, debido a la complejidad de sus procesos industriales: extracción de materias primas, fabricación de cemento Portland (proceso Boudouard, responsable de aproximadamente el 60% de las emisiones), producción de acero de refuerzo y puesta en obra. Su huella de producción se estima entre 280 y 450 kg CO₂/m³ (Hammond & Jones, 2019). A diferencia de materiales de origen orgánico, el hormigón armado no almacena carbono en su estructura; su contenido de CO₂ almacenado es nulo (0 kg CO₂/m³), por lo que no actúa como sumidero de carbono. Cada metro cúbico representa una emisión neta al ambiente.

Tabla 8*Huella de carbono y emisiones en vivienda de hormigón*

Elemento	Sección (cm)	Volumen (m ³)	CO ₂ incorporado (kg CO ₂ /m ³)	Emisiones CO ₂ (kg)	Balance ambiental
Columnas 30×30 / 8 unidades · 41.20 m lineales	30×30	3.71	310	1,150.10	Positivo (emisor)
Columnas 20×30 / 10 unidades · 51.50 m lineales	20×30	3.09	310	957.90	Positivo (emisor)
Vigas de entrepiso / Sección 30×20 · 50.03 m lineales	30×20	3.00	310	930.00	Positivo (emisor)

Losa aligerada entrepiso e=20cm · 44.27 m²	e=20cm	8.85	310	2,743.50	Positivo (emisor)
Cubierta Steel Panel AR-2000 · 61.04 m²	e=0.60mm	61.04 m ²	12 kg/m ²	732.48	Positivo (emisor)
TOTAL — vivienda hormigón armado (105.31 m²)				6,513.98 kg CO ₂	Positivo (emisor)

Nota. Elaboración propia.

5.4.3. Análisis comparativo de impacto ambiental y ciclo de vida de ambos materiales

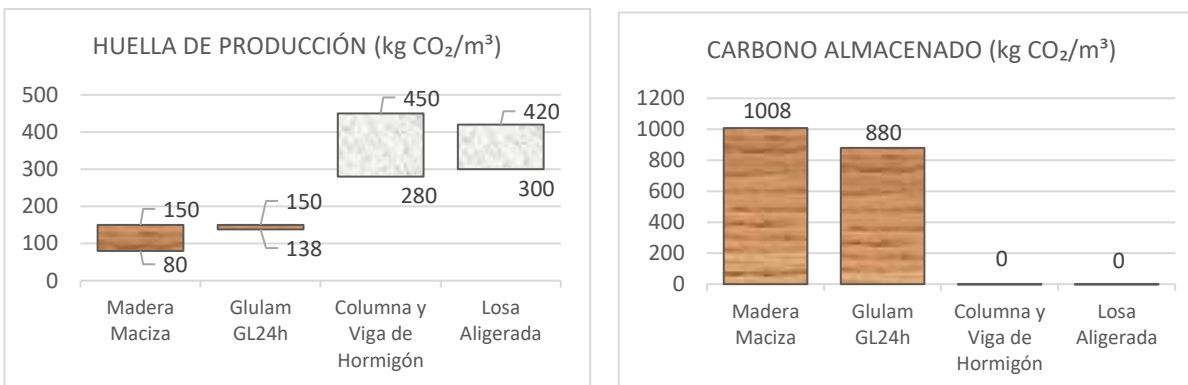
El contraste entre ambos sistemas, evaluado a lo largo del ciclo de vida completo de las edificaciones, revela una brecha ambiental profunda e irreversible a favor de la madera:

Tabla 9

Análisis comparativo ambiental

Indicador Ambiental	Casa Ceibo (Madera Maciza + Glulam)	Vivienda Tipo (Hormigón Armado)
Origen del recurso	Renovable — biomasa forestal gestionada	No renovable — extracción de materias primas (piedra, arena, clinker)
Huella de producción	80–150 kg CO ₂ /m ³ (maciza) / 134 kg CO ₂ /m ³ (Glulam — factor 0.28 kgCO ₂ /kg × 480 kg/m ³)	280–450 kg CO ₂ /m ³ (columnas y vigas) / 300–420 kg CO ₂ /m ³ (losa aligerada) / 12 kg/m ² (cubierta Steel Panel AR-2000)
Carbono almacenado	~1,008 kg CO ₂ /m ³ (maciza — ρ=550 kg/m ³) / ~880 kg CO ₂ /m ³ (Glulam — ρ=480 kg/m ³)	0 kg CO ₂ /m ³ — no almacena carbono
Desperdicio en obra	< 2% (corte CNC de precisión)	10–15% (encofrados, recortes y mezcla sobrante)
Fin de ciclo de vida	Reutilizable, reciclable o fuente de bioenergía	Difícil reciclaje — genera escombros de alto volumen y bajo valor de recuperación

Nota. Elaboración propia.

Figura 14*Análisis comparativo ambiental*

Nota. Elaboración propia

En síntesis, la madera tiene la capacidad única de retener en su estructura el carbono que los árboles absorbieron durante décadas de crecimiento, de modo que su huella de producción queda ampliamente compensada por el carbono que almacena — convirtiéndola en un material que, lejos de endeudarse con la atmósfera, le devuelve más de lo que le cuesta. El hormigón armado, en el extremo opuesto, emite sin retener. Su impacto ambiental inicial es permanente e irrecuperable.

5.5. Análisis económico comparativo

La evaluación económica de ambos sistemas constructivos no puede limitarse al costo de inversión inicial. Una valoración rigurosa exige proyectar el Costo de Ciclo de Vida (LCC) a 30 años, incorporando los costos de materiales, mano de obra especializada, transporte, operación y mantenimiento. Esta visión integral revela una realidad económica que el precio por metro cuadrado inicial frecuentemente oculta.

5.5.1. Costos de construcción, operación y mantenimiento de la vivienda de madera

A. Costo de materiales estructurales

El precio de referencia establecido para la madera maciza de Colorado es de \$6.50 por metro lineal para un tablón de 14 cm × 7 cm. A partir de este valor unitario, se puede escalar el

costo de todos los elementos estructurales del sistema, considerando que las secciones mayores son proporcionales en volumen de madera:

Base de cálculo:

Tablón de referencia: Medidas de $0,14 \times 0,07 \times 1$ m cuesta $\rightarrow$ \$6.50/m (Madebú)

Tabla 10

Cálculo económico de la estructura de la vivienda de madera

Elemento	Sección (cm)	Costo estimado con IVA (\$/m lineal)	Metro lineal (m)	Costo total
Columna compuesta (2 tablones 14×7 + junta)	14×21 (hueca)	\$13.00	667.7 m	\$8680.1
Vigueta Colorado	7×21	\$9.75	1098.7 m	\$10712.1
Vigueta Colorado	7×14	\$6.50	122.8 m	\$798.2
Viga laminada Glulam cubierta	14×21	\$26.46	109.9 m	\$2907.95
Cimentación	-	\$120,39	22.53 m³	\$2712,59
Herrajes	4 Pernos y 8 tuercas por conexión	\$6.5	≈ 566 conexiones	\$3,679
OSB Estructural (x3)	$1.5 \times 100 \times 100$	\$29.20	257.7 m²	\$7504.4
Plancha fibra de coco	$1 \times 100 \times 100$	\$15	85.9 m²	\$1288.5
Tablas de madera piso	$1.5 \times 100 \times 100$	\$70	207.9 m²	\$14553
TOTAL				\$52856.28

Nota. Cotización obtenida de referencia a un tablón del catálogo de Madebú, empresa de ingeniería en madera. El precio de \$120.39/m³ corresponde a hormigón $f_c=210$ kg/cm² preparado en obra con vaciado manual (CYPE Ecuador, 2024). Elaboración propia.

B. Mano de obra — Sistema de madera

El sistema constructivo en madera opera bajo un modelo industrializado y en seco, lo que transforma radicalmente el perfil de mano de obra respecto al hormigón:

Tabla 11*Costos estimados de la mano de obra en la vivienda de madera*

Categoría	Perfil requerido	Costo estimado (USD/día)	Observación
Montajista estructural especializado	Técnico certificado en ensamble Glulam	\$45 – \$65	Escaso en mercado local de Manabí
Carpintero de obra (madera maciza)	Oficial con experiencia en madera estructural	\$25 – \$35	Disponible localmente con capacitación
Ayudante de montaje	No calificado supervisado	\$15 – \$20	Abundante en mercado local
Supervisor de obra / Residente	Ingeniero o arquitecto con experiencia en madera	\$80 – \$120	Indispensable durante toda la obra gruesa

Nota. Cotización aproximada de mano de obra obtenida mediante entrevista a contratistas locales, Manabí, Ecuador, diciembre de 2025. Elaboración propia.

El proceso de corte CNC en fábrica reduce drásticamente el número de horas-hombre en obra, ya que los elementos llegan numerados y listos para ensamble. Se estima que la obra gruesa de la Casa Ceibo (330 m²) demanda entre 90 y 100 días de trabajo efectivo con una cuadrilla de 6 a 8 personas.

Costo estimado de mano de obra total (sistema madera, 330 m²):

Tabla 12*Cálculo económico de la mano de obra de la vivienda de madera*

Rubro	Cantidad	Días	Costo/día	Total estimado
Montajistas especializados	2	95	\$55	\$10,450
Carpinteros de madera	3	95	\$30	\$8,550
Ayudantes	3	95	\$18	\$5,130
Supervisor residente	1	95	\$100	\$9,500
Total mano de obra				\$33,630
Costo mano de obra/m²				≈ \$102/m²

Nota. Elaboración propia.

C. Transporte y logística

El transporte de madera laminada y maciza representa un capítulo diferenciado según el origen del material:

Tabla 13

Costos estimados del transporte en la vivienda de madera

Material	Origen estimado	Tipo de transporte	Costo estimado
Glulam GL24h (vigas cubierta)	Planta laminadora (Quito)	Camión plataforma con sujeción especial	\$2,500 – \$4,000 por despacho
Madera maciza Colorado	Aserradero regional (Manabí)	Camión estaca	\$800 – \$1,500 por carga
Herrajes, tornillería y anclajes	Proveedor nacional (Guayaquil/Quito)	Transporte estándar	\$300 – \$600 por despacho

Nota. Costos estimados en base a cotizaciones de mercado obtenidas por los autores, Manabí, Ecuador. Elaboración propia.

Costo total estimado de transporte (obra completa): \$5,000 – \$8,000, equivalente a \$15 – \$24/m² sobre los 330 m² de la Casa Ceibo.

D. Operación y mantenimiento a 30 años — Madera

La madera, en clima tropical-costero como Manabí, requiere un programa de mantenimiento preventivo periódico para garantizar su durabilidad frente a la humedad, los rayos UV, los agentes biológicos (hongos, insectos xilófagos) y la salinidad ambiental de la zona costera:

Tabla 14

Cálculo económico del mantenimiento en la vivienda de madera

Intervención	Periodicidad	Costo estimado por intervención	Costo acumulado 30 años
Aplicación de barniz/sellador UV (exteriores)	Cada 5 años	\$1,800 – \$2,500	\$10,800 – \$15,000

Tratamiento preventivo fungicida/insecticida	Cada 7 años	\$900 – \$1,400	\$3,600 – \$5,600
Revisión y retorque de herrajes estructurales	Cada 10 años	\$500 – \$800	\$1,500 – \$2,400
Reposición puntual de tablonos dañados	Eventual (c/15 años)	\$600 – \$1,200	\$1,200 – \$2,400
Total mantenimiento 30 años			\$17,100 – \$25,400
Costo mantenimiento/m²/30 años			≈ \$51 – \$76/m²

Nota. Costos estimados en base a cotizaciones de mercado obtenidas por los autores, Manabí, Ecuador. Elaboración propia.

E. Desglose estimado del costo total por m² — Casa Ceibo (madera)

Tabla 15

Cálculo económico total de la vivienda de madera

Rubro	Costo estimado/m²
Materiales estructurales (madera + herrajes)	~\$160
Mano de obra especializada	~\$102
Transporte y logística	~\$24
Instalaciones y acabados	~\$450
Diseño + corte CNC + ingeniería	~\$80
Imprevistos y gastos administrativos	~\$40
Costo total estimado	≈ \$856/m²

Nota. Elaboración propia.

5.5.2. Costos de construcción, operación y mantenimiento de la vivienda de hormigón armado

A. Costo de materiales estructurales

El precio de referencia para el hormigón armado $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ se establece considerando el costo por metro cúbico de hormigón preparado en obra, incluyendo cemento Portland, árido fino, árido grueso y agua. A partir de este valor unitario se puede calcular el costo de todos los elementos estructurales del sistema, considerando que las secciones mayores son proporcionales en volumen de hormigón:

Hormigón de referencia: Hormigón $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ preparado en obra $\rightarrow \$112.46/\text{m}^3$
(CYPE Ecuador 2024) · Acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \$1.73/\text{kg}$ (CYPE Ecuador 2024)

Tabla 16

Cálculo económico estructural de la vivienda de hormigón

Elemento	Cemento Portland (sacos 50kg)	Arena (m^3)	Ripio (m^3)	Agua (lt)	Acero $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ (kg)	Encofrado (m^2)	Alambre #18 (kg)	Costo total
Columna 30×30 (8 und · 3.71 m^3)	25.97	2.08	2.41	686.72	166.96	50.88	2.40	\$751.86
Columna 20×30 (10 und · 3.09 m^3)	21.63	1.70	2.01	571.65	139.10	52.30	2.00	\$660.66
Vigas 30×20 entrepiso (50.03 m · 3.00 m^3)	21.00	1.65	1.95	555.50	135.00	30.02	1.95	\$568.68
Losa cimentación (44.27 m^2 · e=25cm · 11.07 m^3)	77.49	6.09	7.20	2,047.95	276.75	44.27	8.30	\$1,485.13
Precio unitario	\$8.50/saco	\$12.00/ m^3	\$14.00/ m^3	\$0.001/lt	\$1.73/kg	\$3.50/ m^2	\$2.00/kg	—
TOTAL	146.09 sacos	11.52 m^3	13.57 m^3	3,861.82 lt	717.81 kg	177.47 m^2	14.65 kg	\$3,466.33

Nota. Elaboración propia. Cálculo económico de elementos individuales adjuntado en anexos.

B. Mano de obra — Sistema de hormigón armado

El sistema constructivo en hormigón armado opera bajo un modelo tradicional húmedo, lo que implica un mayor número de horas-hombre en obra respecto a sistemas industrializados. Los procesos de encofrado, armado de acero, colado, vibrado y desencofrado demandan cuadrillas especializadas durante toda la obra gruesa.

Tabla 17*Costos estimados de la mano de obra en la vivienda de hormigón*

Categoría	Perfil requerido	Costo oficial (USD/día)	Observación
Maestro mayor	Estructura C1 — CAMICON 2026	\$39.96/día	Disponible en mercado local
Fierrero	Estructura D2 — CAMICON 2026	\$35.17/día	Abundante en mercado local
Carpintero encofrado	Estructura D2 — CAMICON 2026	\$35.17/día	Disponible localmente
Ayudante de obra	Estructura E2 — CAMICON 2026	\$34.72/día	Abundante en mercado local
Supervisor residente	Ingeniero/Arquitecto	\$100.00/día	Indispensable durante obra gruesa

Nota. Elaboración propia.

Se estima que la obra gruesa de la vivienda de hormigón armado (105.31 m²) demanda entre 45 y 55 días de trabajo efectivo con una cuadrilla de 5 a 6 personas:

Tabla 18*Cálculo económico de la mano de obra de la vivienda de hormigón*

Rubro	Cantidad	Días	Costo/día	Total estimado
Maestro mayor	1	50	\$42.00	\$2,100.00
Fierreros	2	50	\$34.28	\$3,428.00
Carpinteros encofrado	2	50	\$34.28	\$3,428.00
Ayudantes	2	50	\$33.84	\$3,384.00
Supervisor residente	1	50	\$100.00	\$5,000.00
Total mano de obra				\$17,340.00
Costo mano de obra/m²				≈ \$164.65/m ²

Nota. Elaboración propia.

C. Transporte y logística

El transporte de materiales para la construcción en hormigón armado representa un capítulo diferenciado según el origen de cada material. A diferencia de sistemas industrializados, el hormigón armado requiere el abastecimiento continuo de materiales pétreos, cemento y acero durante toda la obra gruesa:

Tabla 19

Costos estimados del transporte en la vivienda de hormigón

Material	Origen estimado	Tipo de transporte	Costo estimado
Hormigón premezclado $f'c=210$	Planta hormigonera local	Mixer/volqueta	\$15–\$20/m ³ adicional
Acero de refuerzo $f_y=4200$	Guayaquil	Camión estaca	\$150–\$300 por carga
Encofrados y materiales auxiliares	Proveedor local	Transporte estándar	\$200–\$400 por despacho
Bloques de alivianamiento	Proveedor local Manabí	Camión estaca	\$100–\$200 por carga

Nota. Elaboración propia.

Costo total estimado de transporte (obra completa): \$800 – \$1,500, equivalente a \$8 – \$14/m² sobre los 105.31 m² de la vivienda.

D. Operación y mantenimiento a 30 años — Hormigón armado

El hormigón armado en clima tropical-costero como Manabí requiere un programa de mantenimiento preventivo periódico para garantizar su durabilidad frente a la humedad, salinidad ambiental, carbonatación del concreto y corrosión del acero de refuerzo, factores especialmente agresivos en la zona costera de la provincia:

Tabla 20

Cálculo económico del mantenimiento de la vivienda de hormigón

Intervención	Periodicidad	Costo estimado por intervención	Costo acumulado 30 años
Pintura exterior e impermeabilización	Cada 5 años	\$851.00	\$5,106.00

Revisión y sellado de fisuras	Cada 7 años	\$450.00	\$1,800.00
Tratamiento anticorrosión acero expuesto	Cada 10 años	\$600.00	\$1,800.00
Reparación puntual de elementos dañados	Eventual (c/15 años)	\$900.00	\$1,800.00
Total mantenimiento 30 años			\$10,506.00
Costo mantenimiento/m²/30 años			≈ \$99.76/m ²

Nota. Elaboración propia.

E. Desglose estimado del costo total por m² — Casa Tipo (Hormigón armado)

Tabla 21

Cálculo económico total de la vivienda de hormigón

Rubro	Costo estimado/m²
Materiales estructurales (hormigón + acero)	~\$112/m ²
Mano de obra	~\$165/m ²
Transporte y logística	~\$14/m ²
Instalaciones, acabados y cerramientos	~\$280/m ²
Diseño e ingeniería estructural	~\$45/m ²
Imprevistos y gastos administrativos	~\$50/m ²
Costo total estimado	≈ \$666/m ²

Nota. Elaboración propia.

5.5.3. Relación costo-beneficio y viabilidad económica comparada

Para una comparación objetiva entre dos inmuebles de distinta escala, segmento y sistema constructivo, se normaliza el análisis mediante el Costo de Ciclo de Vida (LCC) por m² proyectado a 30 años:

$$LCC = C_o + C_m + C_r - V_r$$

Donde: C_0 = Costo inicial · C_m = Mantenimiento acumulado · C_r = Reemplazos · V_r = Valor residual (Fórmula creada para este análisis, adaptada de ISO 15686-5, 2017)

Tabla 22

Análisis comparativo económico

Componente del LCC	Casa Ceibo — Madera	Vivienda Tipo — Hormigón
Costo inicial (C_0/m^2)	\$856/ m^2	\$568/ m^2
Mantenimiento 30 años (C_m/m^2)	\$64/ m^2	\$100/ m^2
Reemplazos menores (C_r/m^2)	\$20/ m^2	\$30/ m^2
Valor residual estimado (V_r/m^2)	\$180/ m^2 (alta reusabilidad)	\$130/ m^2 (baja reusabilidad)
LCC estimado/ m^2 a 30 años	≈ \$752/ m^2	≈ \$568/ m^2
Ahorro energético (A/C) 30 años	—	−\$45/ m^2
LCC ajustado por consumo energético	≈ \$760/ m^2	≈ \$613/ m^2

Nota. Fórmula LCC adaptada de ISO 15686-5, 2017. Valores estimados por los autores en base a cotizaciones de mercado local, Manabí, Ecuador, 2026. Elaboración propia.

El análisis del costo del ciclo de vida a 30 años revela que la brecha económica entre ambos sistemas es mucho más pequeña de lo que sugiere el precio inicial. Aunque la madera comienza con un costo inicial más alto de \$280/ m^2 , su menor demanda de mantenimiento correctivo y su alto valor residual debido a su reutilización reducen esa diferencia a solo \$139/ m^2 en el LCC base. Al incorporar los ahorros de energía acumulados por la casi total eliminación del aire acondicionado, el hormigón termina el ciclo de vida \$139/ m^2 más caro que la madera.

La conclusión es directa: el hormigón es más barato al principio, pero más costoso con el tiempo. La verdadera barrera para la madera no es económica a largo plazo, sino financiera a corto plazo: el sobre costo inicial requiere instrumentos de acceso —crédito verde, incentivos fiscales— que aún no existen sistemáticamente en Ecuador, pero cuya implementación haría de la madera laminada la opción económicamente dominante en ambos horizontes temporales.

5.6. Análisis térmico-energético comparativo

El comportamiento térmico de la envolvente edilicia determina directamente el nivel de confort interior de los ocupantes y el consumo energético de la vivienda a lo largo de su vida útil. En el contexto climático de Manabí, con temperaturas que alcanzan los 30°C en horas pico, alta radiación solar directa y humedad relativa costera, este análisis adquiere una relevancia crítica.

5.6.1. Confort térmico interior y consumo energético en la vivienda de madera

Propiedades térmicas de los materiales. - La madera, en ambas versiones analizadas, es por naturaleza un material de baja conductividad térmica. A diferencia de los materiales densos y minerales, su estructura celular porosa atrapa aire en su interior, actuando como barrera natural contra la transferencia de calor:

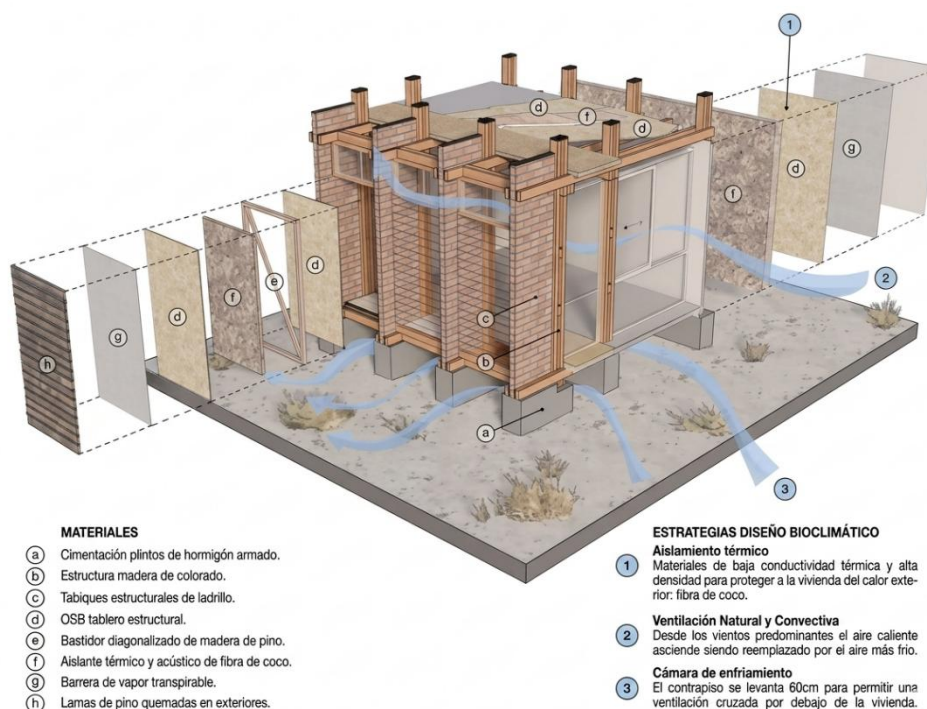
Tabla 23

Propiedades térmicas de los materiales de la vivienda de madera

Material	Conductividad térmica (λ)	Densidad (kg/m ³)
Madera maciza Colorado	0.14 W/mK	500
Glulam GL24h	0.12 W/mK	410

Nota. Valores obtenidos Forest Products Laboratory. (2021). Wood Handbook, pág 13. Elaboración propia.

Transmitancia térmica (Valor U) de la envolvente de madera. - La transmitancia térmica (U) expresa la cantidad de calor que atraviesa un metro cuadrado de cerramiento por cada grado de diferencia de temperatura entre interior y exterior: a menor valor U, mayor aislamiento. Aplicando la metodología de cálculo por resistencias térmicas en serie establecida por EN ISO 6946:2017, el muro de la Casa Ceibo —compuesto de exterior a interior por lama de pino quemada, barrera de vapor transpirable, tablero OSB estructural, aislante de fibra de coco, bastidor de madera de pino y tablero OSB interior, con un espesor total de 21 cm— arroja un valor de $U = 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$. Este resultado se sitúa prácticamente en el límite de $U \leq 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ exigido por la normativa europea de eficiencia energética en edificaciones, confirmando un desempeño térmico de primer nivel en el contexto del clima tropical de Manabí, sin recurrir a materiales sintéticos de alto impacto ambiental (EN ISO 6946, 2017).

Figura 15*Componentes constructivos de la vivienda de madera*

Nota. Imagen proporcionada por el Estudio YURA.

Desfase térmico e inercia de la madera. - El desfase térmico indica cuántas horas tarda el calor exterior en atravesar el cerramiento y manifestarse en el interior. Calculado conforme a EN ISO 13786:2017, el muro multicapa de 21 cm de la Casa Ceibo —donde el aislante de fibra de coco actúa como capa dominante de retardo térmico— presenta un desfase de aproximadamente 10 a 11 horas, superando ampliamente el desempeño de un cerramiento convencional de madera maciza. Esto significa que el pico de calor del mediodía ($\approx 34^{\circ}\text{C}$ exterior) no impacta el interior sino avanzada la noche, cuando las temperaturas exteriores ya han descendido considerablemente. Este mecanismo pasivo reduce de forma natural el efecto de sobrecalentamiento interior sin requerir ningún sistema activo de climatización, constituyendo una de las mayores ventajas bioclimáticas del sistema constructivo adoptado en el contexto climático de Manabí (EN ISO 13786, 2017).

Temperatura interior y demanda energética. - Gracias a la combinación de baja transmitancia térmica ($U = 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$), alta inercia térmica de 10 a 11 horas, y el diseño

bioclimático del techo curvo inclinado que favorece la ventilación y proyecta grandes aleros que protegen la envolvente de la radiación solar directa, las temperaturas interiores de Casa Ceibo se estabilizan en un rango de 26°C a 28°C durante las horas más calurosas, con una amplitud térmica interior de solo 3 a 4 K. Este rango se encuentra dentro de la banda de confort adaptativo para espacios ventilados naturalmente en climas cálidos según lo definido por la Norma ASHRAE 55:2020, sin necesidad de aire acondicionado artificial (ASHRAE, 2020).

Como resultado, la demanda energética de Casa Ceibo se reduce a un consumo mínimo asociado con el uso ocasional de ventiladores durante períodos de mayor humedad relativa, representando una fracción significativamente menor que el consumo promedio de una vivienda convencional.

5.6.2. Confort térmico interior y consumo energético en la vivienda de hormigón armado

Propiedades térmicas de los materiales. - El cerramiento de la de la vivienda tipo está conformado por muros de bloque de hormigón hueco de 15 cm con enlucido interior y exterior, sobre una estructura de hormigón armado $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. A diferencia de la madera, cuya estructura celular porosa actúa como barrera natural contra el calor, el bloque de hormigón presenta una conductividad térmica significativamente mayor:

Tabla 24

Propiedades térmicas de los materiales de la vivienda de hormigón

Material	Conductividad térmica (λ)	Densidad (kg/m^3)
Bloque de hormigón hueco 15cm	0.90 W/mK	1,800
Hormigón armado $f_c=210 \text{ kg/cm}^2$	1.50 W/mK	2,400
Enlucido mortero cemento (1.5cm c/lado)	0.80 W/mK	1,900

Nota. Elaboración propia.

Transmitancia térmica (Valor U) de la envolvente. - La transmitancia térmica (U) expresa la cantidad de calor que atraviesa un metro cuadrado de cerramiento por cada grado de diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. A menor valor U, mayor es el aislamiento.

La resistencia térmica del muro de bloque de concreto hueco de 15 cm presenta un valor de $0.361 \text{ m}^2\text{K/W}$ considerando la influencia del mortero de junta. Incluyendo enlucido interior y exterior de 1.5 cm cada lado, la transmitancia térmica resultante del muro completo es de aproximadamente $1.80 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Este valor es considerablemente alto, situándose por encima de las exigencias de las normativas de construcción sostenible europeas (que fijan $U \leq 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ para climas cálidos), representando una barrera térmica 3 veces inferior a la de la envolvente de madera de la Casa Ceibo ($U = 0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$). Para efectos comparativos conservadores, se adopta el valor de $U = 1.80 \text{ W/m}^2\text{K}$, considerando los puentes térmicos generados por las columnas y vigas de hormigón armado en los nodos de unión con el muro de bloque, encuentros entre elementos estructurales y variaciones de espesor en distintas zonas de la envolvente, factores que agravan aún más la transmitancia real del cerramiento.

Desfase térmico e inercia del bloque de hormigón. - El desfase térmico del muro de bloque de hormigón hueco de 15 cm es de 2 a 3 horas, lo que significa que el calor exterior del mediodía impacta el interior en horas de la tarde, cuando las temperaturas aún se mantienen elevadas. A diferencia de los materiales ligeros, el hormigón almacena calor durante el día y lo libera en el interior por la noche, elevando la sensación térmica durante el tiempo de descanso. En el clima tropical-costero de Manabí, donde las temperaturas nocturnas raramente caen por debajo de los 24°C , este comportamiento afecta el confort interior, haciendo que los sistemas de aire acondicionado activos sean esenciales.

Temperatura interior y demanda energética. - Los interiores de una vivienda tipo no se estabilizan con respecto a las temperaturas habitables durante la mayoría de las horas más calurosas del día, con $U = 1.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ para alta transmitancia térmica, 2 a 3 horas de desfase térmico y la falta de estrategias bioclimáticas pasivas en la envolvente, resultando en valores interiores entre 30°C y 32°C con una amplitud térmica interior de 8 a 10 K. El rango excede ampliamente la banda de confort adaptativo definida por la norma ISO 7730 para climas tropicales (26°C – 28°C), lo que indica que se debe usar aire acondicionado artificial de manera permanente para lograr condiciones habitables.

Se estima que el consumo anual de energía de la vivienda tipo es de 35–45 kWh/m²·año, debido al uso frecuente de unidades de aire acondicionado tipo split, que consumen entre 0.5 y 1.5 kWh por hora durante las horas de mayor radiación solar en dormitorios y salas de estar. A nivel residencial, esto es entre 5 y 7 veces más alto que una vivienda construida con un sistema de construcción de baja transmitancia térmica, lo que enfatiza el efecto directo del cerramiento de bloques de concreto en el consumo energético real de la vivienda.

5.6.3. Análisis comparativo de transmitancia térmica (valor U) y demanda energética

Tabla 25

Análisis comparativo energético

Variable Analizada	Envolvente Madera (Maciza + Glulam)	Envolvente Hormigón / Mampostería
Conductividad térmica base (λ) — facilidad del material para transmitir calor	0.12 – 0.14 W/mK	0.90 – 1.50 W/mK
Transmitancia muro (U) — calor que atraviesa el cerramiento por m ²	0.28 W/m ² K (excelente aislación)	1.80 W/m ² K (aislación deficiente)
Desfase térmico — horas que tarda el calor exterior en sentirse al interior	10 – 11 horas	2 – 3 horas
Temperatura interior sin A/C — temperatura real habitable sin climatización	26°C – 28°C (zona de confort)	30°C – 32°C (fuera de confort)
Consumo de climatización/m² — energía anual requerida para climatizar	6.3 kWh/m ² ·año (ventiladores ocasionales)	40 kWh/m ² ·año (A/C permanente)
Costo energético anual estimado	≈ \$207.9/ m ² -año (330 m ²)	≈ \$421.24/ m ² -año (105.31 m ²)
Costo energético acumulado 30 años	≈ \$6,237	≈ \$12,600
Diferencia relativa de consumo	La edificación en madera consume un 84% menos energía que su equivalente en hormigón	

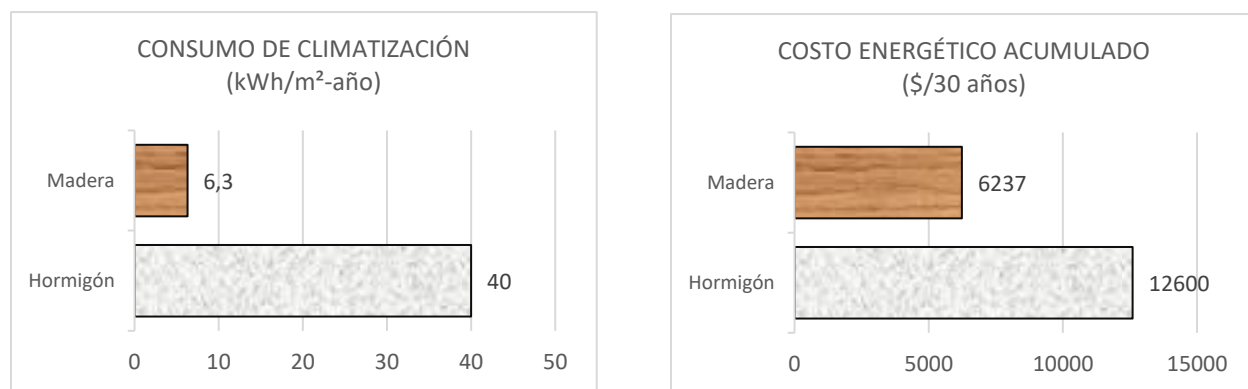
Nota. Forest Products Laboratory (2021); EN ISO 6946:2017; EN ISO 13786:2017; ASHRAE 55:2020; CNEL EP (2024). Elaboración propia.

Todos los parámetros térmicos investigados han demostrado que la envolvente de madera es superior al hormigón. Su baja conductividad y alta capacidad de retraso térmico mantienen las temperaturas internas dentro de la zona de confort sin necesidad de aire acondicionado artificial, lo cual el concreto no puede mantener por sí solo en el clima tropical de Manabí. La consecuencia es directa: la Casa Ceibo consume una fracción mínima de la energía que demanda

su equivalente en hormigón, generando un ahorro económico acumulado significativo a lo largo de su vida útil. En definitiva, la madera no solo aísla mejor: libera al habitante de una dependencia energética permanente que el hormigón impone por diseño.

Figura 16

Análisis comparativo energético



Nota. Elaboración propia.

5.7. Análisis acústico comparativo

El confort acústico, frecuentemente subestimado, es determinante para la habitabilidad real de una vivienda. En Manabí, donde las edificaciones conviven con el ruido urbano, comercial y climático propio de una provincia costera densa, el comportamiento acústico de la envolvente define directamente la calidad de vida de sus ocupantes. El análisis se rige por la Ley de Masas — a mayor densidad superficial, mayor atenuación del ruido aéreo —, aunque esta ley no es absoluta: un cerramiento ligero bien diseñado puede superar acústicamente a uno masivo.

5.7.1. Comportamiento acústico y nivel de aislamiento sonoro en la vivienda de madera

Propiedades acústicas de la madera maciza y laminada. - La madera maciza de Colorado y el Glulam comparten un perfil acústico característico de los materiales ligeros: alta capacidad de absorción acústica superficial —es decir, reducción de la reverberación interna— pero menor capacidad de aislamiento de ruido aéreo en una sola capa, dado que su baja masa superficial limita la atenuación por inercia.

Tabla 26*Comportamiento acústico de componentes constructivos de la vivienda de madera*

	Densidad superficial (kg/m ²)	Absorción acústica (α)	Aislamiento capa simple (Rw)
Lama de pino quemada (2 cm)	11 kg/m ²	0.10 – 0.15	~18 dB
OSB exterior (1.5 cm)	10.5 kg/m ²	0.05 – 0.10	~22 dB
Aislante fibra de coco (10 cm)	10 kg/m ²	0.50 – 0.70	— (absorbente, no aislante)
OSB interior (1.5 cm)	10.5 kg/m ²	0.05 – 0.10	~22 dB
Muro multicapa completo (21 cm)	~42 kg/m ²	0.40 – 0.60	~45 – 48 dB

Nota. ISO 717-1:2013. Elaboración propia.

La fibra de coco es el ingrediente clave técnicamente; su coeficiente de absorción sonora es $\alpha = 0.50 - 0.70$ y considerablemente más alto que la lana mineral ($\alpha = 0.35 - 0.55$). Cuando se combina con el desacoplamiento mecánico del marco diagonalizado, que interrumpe la propagación de las ondas sonoras a través de la vibración sólida, el sistema alcanza un índice de reducción sonora de $R_w \approx 45-48$ dB, lo que cumple con el requisito mínimo residencial de ≥ 45 dB establecido por la ISO 717-1:2013 sin masa adicional.

Comportamiento acústico de los entrepisos de madera. - Las viguetas de Colorado (7×21 cm) comprenden un sistema de suelo ligero que, sin tratamiento adicional, constituye una limitación inherente para el ruido de impacto (pisadas, golpes, caída de objetos). En un suelo de vigas de madera no modificado, el nivel de presión de ruido de impacto (L_n) puede ser tan alto como 75 – 80 dB, un valor que excede el límite recomendado de 60 dB para uso residencial. Para superar esta limitación, el sistema de suelo de la Casa Ceibo ha presentado:

Tabla 27*Comportamiento acústico en entrepiso de la vivienda de madera*

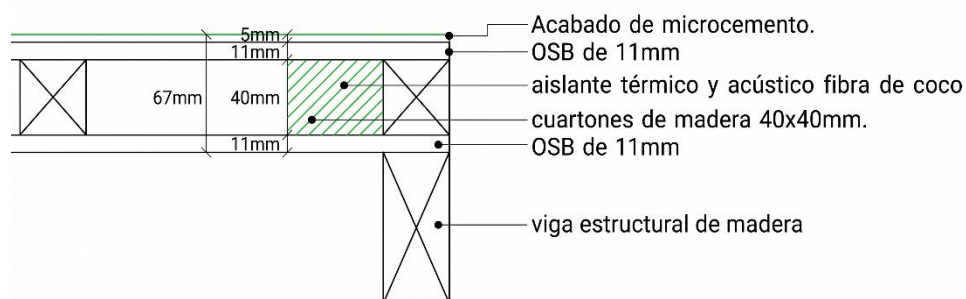
Capa del sistema de entrepiso	Función acústica
Microcemento (0.5 cm)	Acabado superficial
OSB estructural superior (1.1 cm)	Primera barrera acústica
Fibra de coco (4 cm)	Absorción acústica y reducción de ruido de impacto
OSB estructural inferior (1.1 cm)	Segunda barrera acústica y cara vista interior
Vigueta de Colorado (7×21 cm o 7×14 cm)	Estructura portante

Nota. Elaboración propia.

La fibra de coco tiene un coeficiente de absorción acústica $\alpha = 0.50-0.70$, por lo que se utiliza como la capa principal de atenuación acústica. Sin embargo, con un grosor de montaje reducido, el sistema obtiene un $R_w \approx 38 - 42$ dB para ruido aéreo y un $L_n \approx 65 - 72$ dB para ruido de impacto, valores que se acercan, pero no cumplen completamente, con los requisitos mínimos residenciales de $R_w \geq 45$ dB y $L_n \leq 60$ dB establecidos por la norma ISO 717-1:2020.

Figura 17

Componentes constructivos del entrepiso de la vivienda de madera



Nota. Información proporcionada por Estudio YURA. Elaboración propia.

5.7.2. Comportamiento acústico y nivel de aislamiento sonoro en la vivienda de hormigón armado

Propiedades acústicas del bloque de hormigón y hormigón armado. - El bloque de hormigón hueco de 15 cm y el hormigón armado comparten un perfil acústico característico de los materiales densos y masivos:

Tabla 28

Comportamiento acústico de elementos constructivos de la vivienda de hormigón

Material	Densidad superficial (kg/m ²)	Absorción acústica (α)	Aislamiento capa simple (R_w)
Bloque hormigón hueco 15cm + enlucido 1.5cm c/lado	~270 kg/m ²	0.20–0.35	~45 dB
Columna H°A° f'c=210 kg/cm ² — sección 30×30 cm	~360 kg/m ²	0.02–0.05	~50 dB
Columna H°A° f'c=210 kg/cm ² — sección 20×30 cm	~240 kg/m ²	0.02–0.05	~48 dB

Nota. Elaboración propia.

Comportamiento acústico de la losa de entrepiso. - La losa aligerada de entrepiso ($e=20\text{cm}$) con bloques de alivianamiento conforma un sistema de forjado masivo que, sin tratamiento adicional, presenta las siguientes características:

Tabla 29

Comportamiento acústico en entrepiso de la vivienda de hormigón

Capa del sistema de entrepiso	Función acústica
Acabado superficial (cerámica/porcelanato)	Transmite directamente el impacto a la losa
Losa aligerada $e=20\text{cm}$ H°A°	Estructura portante — aislamiento por masa
Enlucido inferior 1.5cm	Acabado interior — mínima absorción

Nota. Elaboración propia.

La losa de hormigón armado presenta un índice de reducción acústica de 50 dB(A) para ruido aéreo, pero un nivel de presión acústica de impacto normalizado de 75 dB, valor que supera el límite recomendado de 60 dB para uso residencial. Esto significa que si bien la losa ofrece un adecuado aislamiento frente al ruido aéreo, presenta una limitación significativa frente al ruido de impacto entre planta baja y planta alta, requiriendo tratamientos adicionales como suelos flotantes o revestimientos absorbentes para alcanzar niveles de confort acústico aceptables.

Comportamiento acústico de los muros de bloque de hormigón. - Los muros fabricados con bloques de hormigón presentan buenas condiciones de aislamiento acústico por su masa, impidiendo el paso del sonido de manera efectiva. El coeficiente de absorción sonora del bloque de hormigón está comprendido entre 0.20 y 0.70. El muro de bloque de hormigón hueco de 15 cm con enlucido interior y exterior de la vivienda tipo alcanza un índice de reducción acústica de $R_w \approx 45$ dB, valor que supera el umbral normativo mínimo para uso residencial (≥ 45 dB). Sin embargo, este aislamiento se logra exclusivamente por la masa del material, sin mecanismos de disociación acústica por discontinuidad de medio, lo que lo hace menos eficiente que sistemas multicapa de menor peso.

5.7.3. Análisis comparativo del desempeño acústico de ambos sistemas

Tabla 30

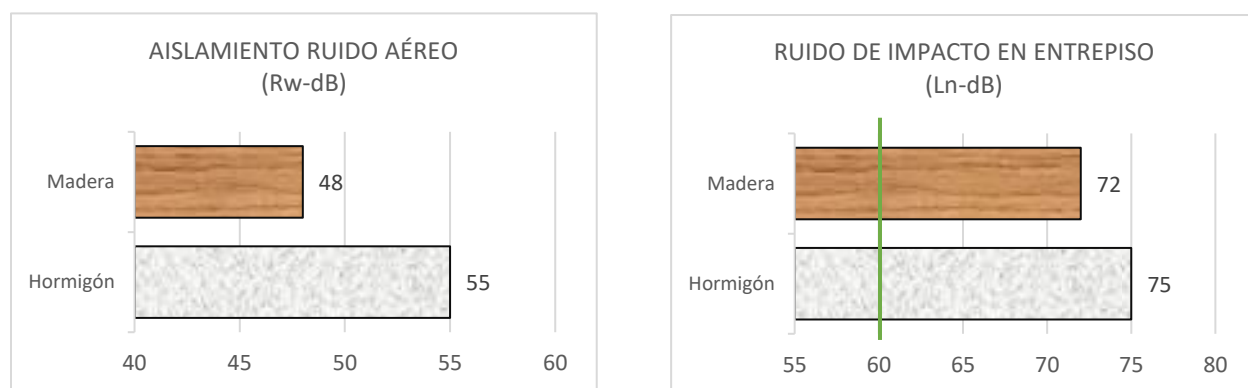
Análisis comparativo acústico

Parámetro Acústico	Casa Ceibo (Madera Maciza + Glulam)	Vivienda tipo (Hormigón Armado)
Densidad superficial del muro — masa por m ² de cerramiento; a mayor masa, mayor bloqueo de sonido	~42 kg/m ² (ligero)	270 kg/m ² (pesado — alta inercia de masa)
Aislamiento ruido aéreo — sistema multicapa (Rw) — cuántos decibeles de ruido exterior bloquea el muro	45 – 48 dB (cumple normativa mínima con diseño multicapa)	50 – 55 dB (cumple por masa sin tratamiento adicional)
Ruido de impacto en entrepiso (Ln) — nivel de ruido de pisadas y golpes que se transmite al piso inferior	65 – 72 dB (requiere mejoras para alcanzar el límite de 60 dB)	75 dB (supera límite — losa sin tratamiento)
Absorción acústica superficial (α) — cuánto sonido absorbe la superficie en lugar de reflejarlo	0.40 – 0.60 (buena — reduce reverberación)	0.02 – 0.05 (deficiente — genera alta reverberación interior)

Nota. Elaboración propia.

Figura 18

Análisis comparativo acústico



Nota. Elaboración propia.

El análisis comparativo revela que la diferencia acústica entre ambos sistemas no es de superioridad absoluta de uno sobre el otro, sino de naturaleza del problema. El hormigón resuelve el ruido aéreo con facilidad, pero fracasa en el control del impacto y la reverberación interna. La madera, en cambio, requiere un diseño multicapa cuidadoso para casi igualar el aislamiento aéreo del hormigón.

5.8. Análisis contra incendios comparativo

La resistencia al fuego es uno de los criterios de seguridad estructural más importantes en cualquier sistema de construcción, y a veces, es la más malinterpretada en relación con la madera. Se asume intuitivamente que la madera es susceptible al fuego y que el hormigón es impenetrable. La comprensión técnica es mucho más matizada: la madera de gran sección tiende a comportarse de manera predecible, gradual y técnicamente controlable en presencia de fuego, mientras que el concreto reforzado, aunque no es combustible, sufre de mecanismos de falla térmica súbita e impredecible en incendios de alta intensidad.

5.8.1. Resistencia al fuego y comportamiento de la madera bajo normativa vigente

Mecanismo de carbonización de la madera maciza y laminada. - Cuando la madera maciza de Colorado o el Glulam GL24h entran en contacto con una llama sostenida, su superficie exterior inicia un proceso de carbonización progresiva a una velocidad constante y predecible, denominada tasa de carbonización (β_0). Esta costra de carbón que se forma en la cara expuesta actúa simultáneamente como aislante térmico y como barrera contra el oxígeno, protegiendo el núcleo estructural interior del perfil (EN 1995-1-2, 2004):

Tabla 31

Tasa de carbonización de la madera

Material	Tasa de carbonización (β_0)	Comportamiento
Madera maciza Colorado	0.65 mm/min	Carbonización superficial uniforme
Glulam GL24h	0.70 mm/min	Carbonización regular entre láminas

Nota. EN 1995-1-2 (2004). Elaboración propia.

La diferencia entre ambas tipologías radica en que el Glulam, al estar compuesto por láminas encoladas, puede presentar una ligera aceleración puntual de la carbonización en las líneas de adhesivo. Sin embargo, investigaciones experimentales confirman que este efecto es negligible a nivel estructural, dado que el adhesivo se degrada a aproximadamente 300°C, temperatura a la cual las propiedades mecánicas de la madera también se aproximan a cero, anulando cualquier diferencia significativa en el comportamiento resistente del perfil ante el fuego (Frangi et al., 2018).

Cálculo del sobreespesor de sacrificio para REI-60. - Para alcanzar una resistencia al fuego de 60 minutos (REI-60) —exigencia mínima para vivienda de dos plantas— el diseño estructural incorpora un sobreespesor de sacrificio calculado conforme al Método de Sección Transversal Reducida establecido en EN 1995-1-2:2004:

$$def = \beta_0 \times t = 0.70mm/min \times 60min = \mathbf{42mm}$$

Añadiendo una capa de carbón residual de 7 mm como se indica en EN 1995-1-2:2004:

$$dsacrificio = 42 + 7 = 49mm \approx \mathbf{5cm}$$

Esto significa que una columna compuesta de madera maciza de Colorado de sección 14×21 cm necesita mantener una sección residual útil después de deducir los 49 mm de sacrificio en todas las caras expuestas. En la práctica, este requerimiento se satisface con el sobredimensionamiento inherente del sistema o añadiendo un revestimiento de placa de cartón-yeso tipo F de 15 mm en las caras más expuestas, solución que extiende la protección hasta REI-90 sin modificar la geometría estructural (EN 1995-1-2, 2004)..

Comportamiento durante la evacuación. - La principal ventaja de la madera frente al fuego no es su resistencia absoluta, sino la predictibilidad de su falla: la carbonización progresiva emite señales audibles y deformaciones visibles que advierten a ocupantes y equipos de emergencia, otorgando márgenes de evacuación más amplios que los que ofrece el hormigón, cuyo colapso puede ser repentino y sin aviso previo (EN 1995-1-2, 2004).

5.8.2. Resistencia al fuego y comportamiento del hormigón armado bajo normativa vigente

Mecanismo de comportamiento del hormigón armado ante el fuego. - Cuando los elementos estructurales de hormigón armado de la vivienda tipo entran en contacto con una llama sostenida, su comportamiento es radicalmente diferente al de los materiales orgánicos. Al ser un material incombustible, el hormigón no genera una costra protectora sino que experimenta una **pérdida progresiva de resistencia mecánica por deshidratación** a medida que la temperatura penetra hacia el núcleo del elemento, siendo el recubrimiento de hormigón sobre las armaduras la barrera técnicamente decisiva:

Tabla 32*Comportamiento del hormigón armado ante el fuego*

Material	Temperatura crítica	Comportamiento
Hormigón $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	300°C – 600°C	Pérdida progresiva de resistencia por deshidratación del cemento
Acero de refuerzo $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$	400°C – 500°C	Pérdida acelerada de resistencia mecánica

Nota. Elaboración propia.

Cuando las pérdidas de resistencia del hormigón alcanzan el 35%, el acero de refuerzo pierde el doble, es decir el 70% de su capacidad resistente. La diferencia entre ambos elementos radica en que mientras el hormigón degrada su resistencia gradualmente por deshidratación, el acero de refuerzo experimenta una caída acelerada e irreversible de su capacidad portante al superar su temperatura crítica, comprometiendo súbitamente la estabilidad estructural del elemento.

Cálculo del recubrimiento mínimo para REI-60.- Para alcanzar una resistencia al fuego de 60 minutos (REI-60) —exigencia mínima para vivienda de dos plantas según la **NEC-SE-HM**— el diseño estructural del hormigón armado establece un recubrimiento mínimo de armadura que actúa como barrera térmica protegiendo el acero de refuerzo durante el período de resistencia requerido sin comprometer la sección resistente útil del elemento:

Velocidad de penetración térmica en hormigón $\rightarrow \sim 0.5 \text{ mm/min}$

$$e_{rec} = v \times t = 0.50 \text{ mm/min} \times 60 \text{ min} = \mathbf{30 \text{ mm}}$$

Añadiendo un margen de seguridad normativo de 5 mm:

$$e_{adaptado} = 30 + 5 = 35 \text{ mm} = \mathbf{3.5 \text{ cm}}$$

Esto significa que las columnas de hormigón armado de sección 30×30 cm y 20×30 cm, y las vigas de entrepiso de sección 20×30 cm de la vivienda tipo, necesitan mantener el acero de refuerzo protegido por un recubrimiento mínimo de 3 cm en todas las caras expuestas. En la práctica, este requerimiento se satisface con el recubrimiento mínimo exigido por la NEC-SE-HM de 3 cm, que permite alcanzar REI 120 sin protección adicional, superando ampliamente la

exigencia mínima de REI-60 para viviendas de dos plantas sin necesidad de tratamientos ignífugos adicionales.

Comportamiento durante la evacuación. - La limitación operativa más relevante radica en la impredecibilidad de su falla final. Cuando la temperatura crítica del acero de refuerzo es de 400°C a 500°C, la pérdida de capacidad de carga puede ocurrir de repente y sin ninguna señal audible o visible, a diferencia que la madera con el tiempo advierte del desarrollo de daños estructurales a través de crujidos y deformaciones visibles. Cuando la pérdida de resistencia del hormigón alcanza el 35%, el acero pierde el 70% de su capacidad de carga y la estabilidad estructural cambia en un instante, sin que los ocupantes o los equipos de emergencia y rescate puedan percibirlo externamente. Este comportamiento está reconocido en la normativa **NEC-SE-HM** como una condición de riesgo que justifica el recubrimiento mínimo obligatorio de las armaduras como medida de protección pasiva indispensable.

5.8.3. Cuadro comparativo de resistencia al fuego entre ambos sistemas

Tabla 33

Análisis comparativo resistencia al fuego

Parámetro	Casa Ceibo (Madera Maciza + Glulam)	Vivienda Tipo (Hormigón Armado)
Combustibilidad	Combustible controlado	Incombustible — no alimenta ni propaga el fuego
Tasa de carbonización	0.65 – 0.70 mm/min (predecible)	No aplica — material incombustible
Resistencia al fuego base	REI-60 (con sobreespesor de 49 mm)	REI-90 columnas 20×30 cm y vigas · REI-120 columnas 30×30 cm y muros
Resistencia con protección adicional	REI-90 (con placa cartón-yeso tipo F)	REI-120 a REI-240 (con mortero proyectado o pintura intumescente)
Tipo de falla estructural	Gradual, audible y predecible	Repentina — sin señales previas visibles ni audibles
Costo de protección adicional	\$8 – \$15/m ² (placa cartón-yeso tipo F)	Sin costo adicional — recubrimiento mínimo 3cm integrado en obra

Nota. Elaboración propia.

El hormigón armado supera a la madera en resistencia pasiva al fuego, alcanzando REI-90 y REI-120 sin costo adicional gracias al recubrimiento mínimo de 3 cm integrado en obra. La madera, en cambio, requiere protección adicional de \$8–\$15/m² para superar el REI-60 mínimo normativo. Sin embargo, la madera presenta una ventaja operativa determinante durante la evacuación: su falla es gradual, audible y predecible, mientras que el hormigón armado puede colapsar repentinamente al alcanzar el acero su temperatura crítica de 400°C–500°C sin señales previas visibles. Ambos sistemas cumplen la exigencia mínima de **REI-60** para viviendas de dos plantas según la **NEC-SE-HM**.

5.9. Análisis arquitectónico-funcional comparativo

La arquitectura no es únicamente la envoltura estética de una estructura: es la expresión espacial de las posibilidades y limitaciones del sistema constructivo que la sustenta. En este sentido, la elección entre madera laminada y hormigón armado no define únicamente cómo se construye una vivienda, sino fundamentalmente cómo se vive en ella: la amplitud de sus espacios, la relación entre sus recintos, la calidad de la luz natural, la flexibilidad para adaptarse a los cambios de uso a lo largo del tiempo y la identidad formal que proyecta hacia su entorno urbano y paisajístico.

5.9.1. Forma, espacialidad y organización funcional de la vivienda de madera

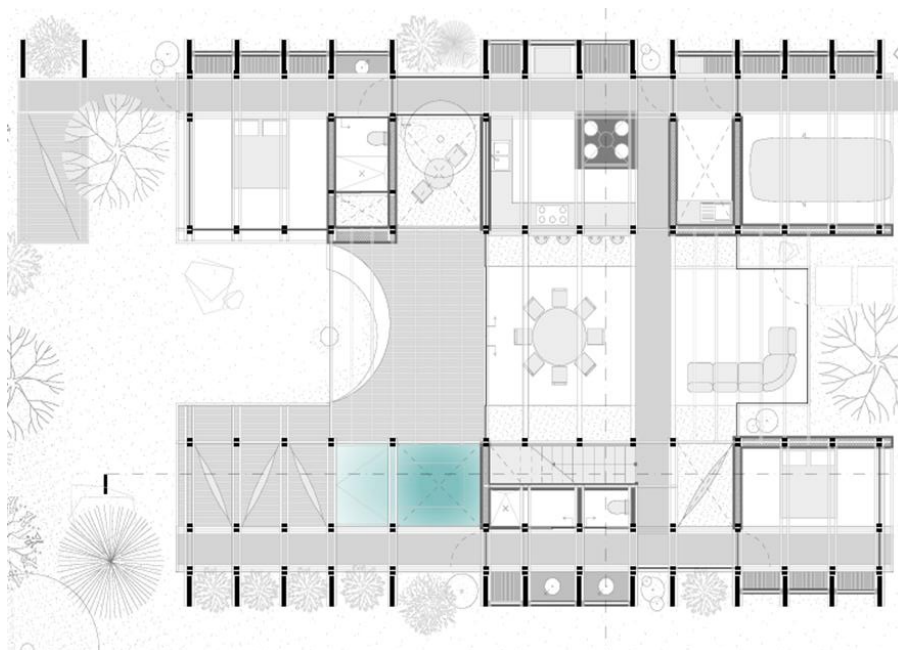
Libertad estructural y planta libre. - El sistema Glulam de la Casa Ceibo opera bajo el principio de la estructura porticada de grandes luces, donde la capacidad mecánica de las vigas laminadas de 14×21 cm permite cubrir vanos de 6 metros sin apoyos intermedios. Esto libera el plano del arquitecto de la tiranía de columnas y muros de carga y conduce a un espacio fluido y continuo que el hormigón regular no puede proporcionar sin la necesidad de secciones sobredimensionadas y costosas.

En comparación con columnas de hormigón de 30×30 cm, las columnas compuestas de la Casa Ceibo disminuyen su ocupación de espacio en el suelo en más del 50% (14×21 cm con un núcleo hueco de 14×7 cm en su sección compuesta) y resultan en un mayor espacio habitable

utilizable, al tiempo que reducen significativamente las esquinas muertas que los elementos masivos inevitablemente traen en sus uniones estructurales.

Figura 19

Planta Baja Arquitectónica de la vivienda de madera



Nota. Proporcionado por el Estudio YURA.

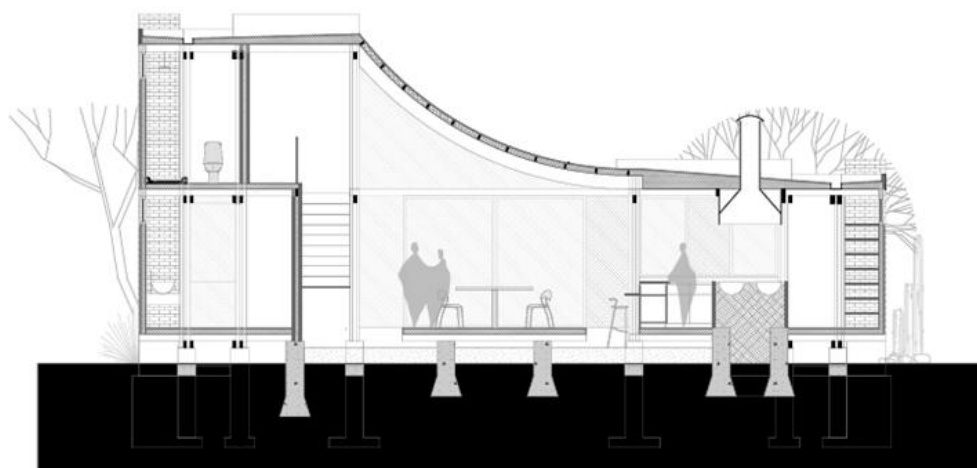
La cubierta curva como recurso bioclimático y arquitectónico. - La característica flexibilidad del Glulam promueve la producción de piezas curvas mediante la acción de laminación en moldes; la línea continua de cubierta curva característica de Casa Ceibo es posible gracias a esta propiedad. Esta característica arquitectónica no es solo una concesión estética; cumple tres propósitos técnicos fundamentales al mismo tiempo:

En primer lugar, la geometría curva inclinada facilita el drenaje del agua de lluvia sin acumulación, previniendo filtraciones, que naturalmente ocurren en techos planos de concreto en climas tropicales. En segundo lugar, el perfil aerodinámico curvo reduce la presión del viento sobre la envolvente, lo cual es una consideración clave en la zona costera de Manabí donde los vientos alisios pueden alcanzar grandes velocidades. En tercer lugar, los grandes aleros causados por la proyección del techo curvo protegen la envolvente de madera de la radiación solar directa

y la lluvia horizontal, lo que reduce la tasa de deterioro superficial y también prolonga la vida útil de los acabados exteriores.

Figura 20

Corte transversal de la vivienda de madera



Nota. Proporcionado por el Estudio YURA

5.9.2. Forma, espacialidad y organización funcional de la vivienda de hormigón armado

Condicionamiento estructural y planta definida. - El sistema de hormigón armado de la vivienda tipo opera bajo el principio del pórtico rígido, donde las vigas de 20×30 cm soportadas sobre columnas de 30×30 cm y 20×30 cm definen una retícula estructural fija que condiciona directamente la organización espacial de la vivienda. Las vigas de hormigón armado de 20×30 cm limitan los vanos libres a distancias de 3.10 a 4.97 metros verificados en planta, distancias significativamente menores a las alcanzables con sistemas de mayor capacidad mecánica, lo que impone una disposición interior de espacios condicionada por la posición inamovible de los elementos estructurales.

Las 18 columnas de hormigón armado — Las 8 columnas de hormigón armado — 8 con una sección de 30×30 cm y 10 con una sección de 20×30 cm — ocupan un área total de suelo de 1,32 m², creando núcleos masivos en las uniones estructurales que reducen el área habitable tanto en la planta baja (44,27 m²) como en la planta alta (61,04 m²). A diferencia de las secciones aligeradas, las columnas macizas de hormigón armado crean esquinas rígidas e inamovibles que

afectan la disposición del mobiliario, la circulación interior y la percepción espacial de las habitaciones.

Rigidez espacial y limitaciones de adaptabilidad futura. - Dado que la estructura de la vivienda tipo está íntegramente resuelta por un sistema de pórticos rígidos de hormigón armado con retícula fija de columnas y vigas, cualquier redistribución interior queda condicionada por la posición permanente de los 18 elementos verticales que no pueden relocalizarse sin comprometer la integridad estructural del sistema. Si bien los muros de bloque de hormigón de 15 cm no son portantes y podrían eliminarse puntualmente, la retícula estructural impone una geometría fija que limita significativamente la adaptabilidad funcional de la vivienda frente a cambios de uso, composición familiar o necesidades futuras, representando una restricción patrimonial concreta frente a sistemas constructivos de mayor flexibilidad espacial.

5.9.3. Cuadro comparativo arquitectónico-funcional

Tabla 34

Análisis comparativo arquitectónico

Parámetro	Casa Ceibo (Madera)	Vivienda tipo (Hormigón)
Luces libres máximas	6.0 m	4.97 m
Sección de columna	14×21 cm (hueca — aligerada)	30×30 cm (8 unidades) y 20×30 cm (10 unidades)
Ocupación de planta por estructura	< 0.40 m ²	1.32 m ² total — 0.09 m ² c/columna 30×30 y 0.06 m ² c/columna 20×30
Flexibilidad de remodelación	Alta — sin afectación estructural	Baja — retícula de columnas y vigas 20×30 inamovible
Identidad arquitectónica	Singular, bioclimática, referencia vernácula	Convencional — tipología estándar de la vivienda tipo

Nota. Elaboración propia.

La calidad espacial se relaciona directamente con la diferencia entre los dos sistemas. Las columnas de hormigón ocupan 1.32 m² del espacio útil del piso, dividen el piso y el espacio en tramos cortos que condicionan permanentemente el uso y limitan futuras intervenciones. Las columnas compuestas de madera reducen esta ocupación menos de 0.40 m² y recuperan más de 1 metro cuadrado de espacio habitable, facilitando pisos continuos y adaptables.

La diferencia entre los dos es notable en su cubierta y expresión arquitectónica: en contraste con la simple pendiente del Panel de Acero de concreto, la cubierta inclinada curva de la Casa Ceibo actúa en respuesta directa al clima tropical de Manabí y reinterpreta con precisión el lenguaje vernáculo de la región. La madera no solo construye mejor estructuralmente: construye espacios más habitables, más flexibles y más arraigados a su territorio.

5.10. Análisis constructivo comparativo

El proceso constructivo no es un aspecto secundario o meramente operativo de la obra: define los plazos de entrega, los niveles de desperdicio, la seguridad laboral, la precisión geométrica del producto terminado y, en última instancia, la rentabilidad del proyecto para el promotor y el costo final para el usuario. La diferencia entre un sistema industrializado en seco y un sistema artesanal húmedo no se limita a una cuestión de modernidad tecnológica: implica una filosofía constructiva radicalmente distinta con consecuencias económicas y operativas concretas y cuantificables.

5.10.1. Proceso constructivo, tiempos de ejecución y nivel de industrialización de la madera

Flujo de trabajo industrializado. - El proceso constructivo de la Casa Ceibo se inscribe en el paradigma de la construcción industrializada offsite, siguiendo un flujo de trabajo secuencial y controlado que elimina la mayor parte de las incertidumbres propias de la obra tradicional:

Fase 1 — Diseño digital: El modelo tridimensional completo de la estructura incluyendo cada columna compuesta, cada viga laminada de cubierta y cada vigueta de Colorado se desarrolla en plataforma BIM (Building Information Modeling), donde se resuelven todas las interferencias entre elementos estructurales, instalaciones y cerramientos antes de cortar un solo tablón. Esta fase elimina errores de compatibilización que en obra húmeda generan costosas demoliciones y rehacimientos.

Fase 2 — Fabricación CNC en taller: Los archivos digitales del modelo BIM se transfieren directamente a las máquinas de corte CNC (Control Numérico Computarizado), que cortan, perforan, ranuran y rotulan cada elemento de madera con tolerancias dimensionales de ± 2

mm, inviábiles en la construcción artesanal de hormigón. Cada pieza sale del taller numerada, etiquetada y lista para su posición específica en el sitio, como las piezas de un sistema de ensamblaje de precisión industrial.

Fase 3 — Transporte y ensamble en obra: El trabajo en sitio se reduce casi exclusivamente al ensamble mediante herrajes metálicos galvanizados, tornillería estructural y anclajes de acero inoxidable. No se requiere agua, no se generan mezclas, no hay tiempos de espera por fraguado y la maquinaria pesada se limita a una grúa pluma liviana para la colocación de vigas de cubierta de mayor longitud.

Tabla 35

Tiempos de ejecución de la vivienda de madera

Fase constructiva	Duración estimada (Casa Ceibo — 330 m ²)
Diseño BIM + ingeniería + fabricación CNC	55 – 65 días (paralelo a trabajos de cimentación)
Cimentación (zapatas y vigas de amarre)	45 – 55 días
Montaje estructura de madera — obra gruesa	50 – 60 días
Cerramientos, cubiertas e instalaciones	20 – 25 días
Acabados interiores y exteriores	10 – 15 días
Total cronograma obra	180 – 210 días hábiles

Nota. Elaboración propia.

La fabricación en taller ocurre en paralelo con los trabajos de cimentación en obra, lo que compacta significativamente el cronograma total sin generar tiempos muertos entre fases.

Seguridad laboral y condiciones de trabajo. - Las operaciones en seco también minimizan en gran medida los riesgos laborales relacionados con los trabajos de construcción tradicionales, es decir, el vertido y vibrado de hormigón en altura, el trabajo pesado de encofrado, la exposición prolongada al polvo de cemento e incluso la sobrecarga de material húmedo acumulado puede eliminarse a niveles altos.

Desperdicio y gestión de residuos en obra. - El corte CNC en taller genera recortes mínimos y controlados de madera, cuya totalidad puede reutilizarse como material de encofrado temporal, calzos de montaje o combustible de biomasa. El desperdicio en obra se limita a embalajes y retales de tornillería, estimándose en menos del **2% del material total** empleado.

5.10.2. Proceso constructivo, tiempos de ejecución y nivel de industrialización en hormigón armado

Flujo de trabajo tradicional húmedo: del diseño al colado en obra. - El proceso constructivo de la vivienda tipo se inscribe en el paradigma de la construcción tradicional in situ, siguiendo un flujo de trabajo secuencial que depende directamente de los tiempos de fraguado del hormigón y de la disponibilidad continua de mano de obra especializada en obra:

Fase 1 — Diseño estructural: El modelo estructural de la vivienda se desarrolla bajo los lineamientos de la **NEC-SE-HM**, definiendo las secciones de columnas (30×30 cm y 20×30 cm), vigas de entrepiso (20×30 cm), losa aligerada de 20 cm y cubierta Steel Panel. A diferencia del modelado BIM, no necesariamente elimina las interferencias entre elementos en la fase de diseño, lo que puede llevar a ajustes y correcciones durante la ejecución en el sitio que impactan directamente en el tiempo y los costos del proyecto.

Fase 2 — Preparación y armado de acero en obra: El acero de refuerzo $f_y=4200$ kg/cm² se corta, dobla y ensambla directamente en el sitio con tolerancias dimensionales artesanales, un proceso que requiere más tiempo y genera más desperdicio de material en comparación con los sistemas de corte industrial. Cada columna, viga y nervio de losa requiere la elaboración y colocación manual de su armadura antes de proceder al encofrado.

Fase 3 — Encofrado, colado y desencofrado: El hormigón $f_c=210$ kg/cm² se vierte en los encofrados de madera previamente armados, requiriendo un período de **fraguado mínimo de 28 días** para alcanzar su resistencia de diseño antes de retirar los encofrados y continuar con la siguiente fase constructiva. Este tiempo de espera obligatorio, inherente al proceso químico del hormigón, no tiene equivalente en los sistemas constructivos en seco y representa el principal condicionante del cronograma total de obra.

Tabla 36*Tiempos de ejecución de la vivienda de hormigón*

Fase constructiva	Duración estimada (Vivienda tipo — 111 m²)
Diseño estructural + ingeniería	10 – 12 días
Cimentación (plintos y vigas de amarre)	15 – 18 días
Estructura H°A° planta baja (columnas + vigas + losa)	25 – 32 días
Estructura H°A° planta alta (columnas + vigas + cubierta)	20 – 28 días
Cerramientos bloque hormigón + enlucidos	10 – 14 días
Instalaciones eléctricas y sanitarias	5 – 8 días
Acabados interiores y exteriores	5 – 8 días
Total cronograma obra	90 – 120 días hábiles

Nota. Elaboración propia.

En el hormigón armado cada fase debe completarse y fraguar antes de iniciar la siguiente, generando tiempos de espera obligatorios que extienden significativamente el cronograma total.

Seguridad laboral y condiciones de trabajo. - El proceso constructivo en hormigón armado implica riesgos laborales inherentes a la obra húmeda tradicional: vertido y vibrado de hormigón en altura, manejo de encofrados pesados, exposición prolongada al polvo de cemento y sobrecargas por acumulación de materiales húmedos en niveles elevados.

Desperdicio y gestión de residuos en obra. - El proceso constructivo del hormigón armado genera residuos en varias categorías: recortes de encofrado de madera, sobrantes de mezcla de hormigón, retales de acero de refuerzo y materiales de embalaje. El desperdicio en obra se estima entre **10% y 15%** del material total empleado, significativamente mayor al de sistemas industrializados, debido a la naturaleza artesanal del proceso de corte y armado en sitio y a las pérdidas inevitables en el proceso de colado del hormigón.

5.10.3. Cuadro comparativo del proceso constructivo

Tabla 37

Análisis comparativo constructivo

Parámetro Constructivo	Casa Ceibo (Madera)	Vivienda Tipo (Hormigón)
Modelo de producción	Industrializado offsite — en seco	Tradicional in situ — proceso húmedo
Tolerancias geométricas	±2 mm (CNC)	±10 – 15 mm (artesanal en obra)
Cronograma obra gruesa	180 – 210 días	90 – 120 días hábiles
Tiempos de espera por curado	Ninguno	28 días mínimo por elemento colado
Uso de agua en obra	Mínimo — proceso en seco	Alto — mezcla, curado y limpieza de encofrados
Maquinaria pesada requerida	Grúa pluma liviana	Mixer hormigonera + vibrador + encofrados metálicos
Desperdicio de material en obra	< 2%	10 – 15% (recortes encofrado + sobrantes mezcla + retales acero)
Riesgo de accidentes laborales	Bajo — sin tareas húmedas en altura	Alto — vertido en altura + manejo encofrados pesados + polvo cemento
Paralelización de fases	Alta — fabricación y cimentación simultáneas	Baja — cada fase espera fraguado de la anterior

Nota. Análisis realizado en base a entrevistas en ambas viviendas. Elaboración propia.

El contraste entre ambos sistemas es el de dos filosofías de producción opuestas. La madera opera bajo un modelo industrializado y en seco: tolerancias milimétricas, fases paralelas, cero tiempos de espera y menos del 2% de desperdicio en obra. El hormigón perpetúa un modelo artesanal y húmedo donde cada fase espera a la anterior, los errores geométricos son tolerados y entre el 10% y 15% del material termina como escombros. El resultado práctico es determinante: la Casa Ceibo reduce a la mitad el cronograma de construcción en bruto en comparación con el hormigón, con menor riesgo laboral, menor consumo de agua y un nivel de precisión en la construcción que el proceso artesanal no puede replicar. En un mercado donde el tiempo es dinero y la sostenibilidad una demanda creciente, la madera no solo crea productos de mejor calidad; construye de manera más rápida, con acabados más limpios y mayor control.

5.11. Análisis social comparativo

La dimensión social de un sistema de construcción va más allá de los aspectos técnicos y económicos, tocando la identificación cultural, la percepción compartida del riesgo, la generación de empleo y el estado psicológico de los residentes. En la provincia de Manabí, profundamente marcada por el terremoto de 2016, estos factores no son periféricos: son decisivos en la aceptación o rechazo de cualquier propuesta de construcción alternativa al modelo dominante. Ignorarlos equivale a diseñar soluciones técnicamente perfectas que la sociedad rechaza, y que por tanto nunca se implementan.

5.11.1. Percepción social, aceptación cultural e identidad local de la madera como material constructivo

La biofilia como fundamento del bienestar en madera. - El uso de la madera como material de construcción genera un impacto psicosocial positivo que la neurociencia y la psicología ambiental han documentado extensamente bajo el concepto de biofilia: la atracción innata del ser humano hacia los materiales, formas y texturas de origen natural. Los estudios experimentales realizados en universidades de Austria, Japón y Canadá en edificios contruidos con madera expuesta indican uniformemente que los ocupantes reportan significativamente menos estrés, mejor calidad de sueño, más concentración y un mayor sentido general de bienestar que en edificios de hormigón o acero con características similares.

En el contexto particular de Manabí, la madera no es un material ajeno o culturalmente prestado: la arquitectura vernácula de la región ha dependido comúnmente de pilotes de madera, grandes aleros de tablonos, pisos de guayacán y bahareque. La madera laminada de la Casa Ceibo no introduce un lenguaje arquitectónico extraño a la sensibilidad local: reinterpreta con tecnología de precisión industrial el legado constructivo ancestral de la provincia, estableciendo una continuidad cultural que el hormigón armado, de origen industrial europeo del siglo XX, nunca ha podido reclamar para sí en este territorio.

Desafíos de aceptación técnica y social. - La madera, a pesar de sus raíces culturales vernáculas, enfrenta una barrera específica de desconfianza técnica en Manabí que necesita ser abordada con honestidad. Los siguientes tres prejuicios son los más comunes entre los locales y profesionales: la supuesta fragilidad sísmica, la vulnerabilidad al fuego y la susceptibilidad al

deterioro por humedad e insectos xilófagos. Los dos primeros han sido técnicamente refutados en análisis previos de esta investigación. El tercero es real, pero puede ser completamente controlado mediante un programa de mantenimiento preventivo sistemático y eligiendo maderas con alta durabilidad natural, como la madera de Colorado, o utilizando tratamiento preservante en autoclave cuando la exposición es alta.

Superar estas barreras requiere una estrategia activa de alfabetización técnica: obras de demostración de acceso público, talleres de capacitación para carpinteros y constructores regionales, visitas técnicas a proyectos exitosos como la propia Casa Ceibo e integrar la construcción en madera en los planes de estudio de los programas técnicos, de arquitectura e ingeniería civil en las universidades de Manabí.

5.11.2. Percepción social y valoración cultural del hormigón armado en Manabí

El hormigón armado como símbolo de solidez y progreso. - A diferencia de la madera, cuya aceptación social está vinculada a la memoria vernácula y al arraigo cultural ancestral, el hormigón armado ocupa en el imaginario colectivo de la región una posición diferente: es percibido como símbolo de solidez, permanencia y progreso económico.

Aceptación social y demanda habitacional. - Estudios de factibilidad realizados en la provincia de Manabí identifican que la población presenta un alto grado de aceptación para viviendas de construcción convencional (Vivero-García et al., 2022), sustentada en tres factores socioculturales concretos: la familiaridad visual y funcional con el sistema de pórticos de hormigón armado como estándar reconocido; la percepción —no siempre corroborada técnicamente— de que el material no requiere mantenimiento frecuente ni tratamientos periódicos, pese a que en clima costero húmedo la corrosión de armaduras representa un riesgo real (Lara et al., 2018); y la disponibilidad de mano de obra local en cualquier municipio, sin necesidad de técnicos certificados ni maquinaria especializada (Bello-Zambrano y Villacreses-Viteri, 2021).

Desafíos de percepción técnica e identidad arquitectónica. - El terremoto de 2016 demostró que no toda construcción de hormigón armado es equivalente en seguridad: las viviendas construidas sin supervisión técnica o sin cumplimiento de la **NEC-SE-HM** colapsaron

con igual facilidad que las construcciones en materiales ligeros. A través de estudios comparativos de vivienda social en Manabí, observamos que, aunque el hormigón armado tiene una aceptación social significativa, presenta desventajas únicas en términos de costo, duración de la construcción, así como impacto ambiental en comparación con los sistemas de construcción emergentes. Además, su predominio también ha producido una forma urbana caracterizada por un alto grado de homogeneidad tipológica que dificulta la expresión de una identidad arquitectónica local diferenciado y atenúa el valor simbólico individual de cada vivienda dentro del conjunto urbano.

5.11.3. Cuadro comparativo del impacto social de ambos sistemas

Tabla 38

Análisis comparativo social

Dimensión Social	Casa Ceibo (Madera)	Vivienda Tipo (Hormigón)
Bienestar psicológico de ocupantes	Alto — efecto biofílico documentado	Medio — sin efecto biofílico · espacios reverberantes y térmicamente demandantes
Identidad cultural local	Alta — reinterpreta la arquitectura vernácula	Media — percibido como símbolo de progreso pero genera homogeneidad tipológica urbana
Percepción de seguridad post-sísmica	Baja inicialmente — requiere campaña técnica	Alta — arraigada culturalmente post terremoto 2016
Volumen de empleo generado	Moderado y calificado	Alto — mano de obra local abundante y disponible en cualquier municipio
Impacto en economía informal	Moderado	Alto — cuadrillas locales no calificadas · genera empleo informal de albañilería
Potencial de economía circular	Alto — forestal, prefabricación, valor agregado	Bajo — genera escombros de difícil reciclaje y alto volumen al fin de vida útil
Barrera de adopción masiva	Alta — desconfianza técnica y falta de oferta	Baja — sistema dominante con alta aceptación social y oferta amplia de materiales y mano de obra
Estrategia de transición requerida	Obras demostrativas + capacitación + incentivos fiscales	Mejora de calidad técnica + supervisión NEC-SE-HM + reducción de informalidad constructiva

Nota. Elaboración propia.

El hormigón armado presenta ventajas concretas en términos de volumen de empleo generado y aceptación social, consolidada históricamente como sistema dominante con alta disponibilidad de mano de obra local y bajas barreras de adopción masiva. Sin embargo, su impacto en la economía informal, la homogeneidad tipológica urbana que genera y su bajo

potencial de economía circular al producir escombros difíciles de reciclar al fin de vida útil, representan limitaciones sociales y ambientales significativas en comparación con el sistema de madera.

La madera, pese a su mayor arraigo cultural vernáculo y su documentado efecto positivo sobre el bienestar psicológico de los ocupantes, enfrenta una barrera de adopción masiva sustentada en la desconfianza técnica post-sísmica y la escasa oferta local de mano de obra especializada, requiriendo una estrategia activa de alfabetización técnica, obras demostrativas e incentivos fiscales para consolidarse como alternativa viable en el mercado constructivo local. Ambos sistemas demandan estrategias de transición diferenciadas: la madera hacia la generación de oferta técnica calificada, y el hormigón hacia la reducción de la informalidad constructiva y el cumplimiento efectivo de la NEC-SE-HM.

5.12. Síntesis comparativa integral: madera y hormigón armado

La evaluación aislada de variables técnicas, económicas, ambientales y sociales proporciona una radiografía detallada del comportamiento individual de cada material. Sin embargo, la verdadera viabilidad de un sistema constructivo en un entorno complejo como la provincia de Manabí solo puede comprenderse mediante una síntesis integral.

5.12.1. Dinámica Sismo-Resistente y Disonancia Sociocultural

Manabí está en Zona Sísmica V con $Z = 0.50g$. La física es directa: a mayor masa, mayores fuerzas sísmicas. El hormigón acumula 338.12 kg/m^2 frente a 59.81 kg/m^2 de la madera —casi seis veces más pesado— y su relación resistencia-peso es de $14.89 \text{ MPa} \cdot \text{m/kN}$ frente a $203\text{--}204 \text{ MPa} \cdot \text{m/kN}$ de la madera. En términos sísmicos, la madera es el sistema más eficiente con diferencia.

Sin embargo, la población manabita post-terremoto de 2016 asocia la pesadez con la seguridad. El hormigón colapsó, pero la respuesta cultural fue pedir más hormigón. Esta paradoja es el obstáculo real que enfrenta la madera en Manabí: no es un problema técnico, es un problema de confianza que solo se resuelve con obras demostrativas, divulgación y tiempo.

5.12.2. Ecuación Económica: Industrialización y Rentabilidad del Ciclo de Vida (LCC)

El costo inicial de la madera es más alto: \$856/m² frente a \$666/m² del hormigón. Eso es un hecho, y sería deshonesto minimizarlo. Pero quedarse ahí es un análisis incompleto.

Al proyectar el Costo de Ciclo de Vida (LCC) a 30 años, la brecha se reduce. El menor mantenimiento correctivo de la madera, su mayor valor residual por reusabilidad y sobre todo el ahorro energético por no depender del aire acondicionado transforman la comparación. La vivienda de hormigón consume 40 kWh/m²·año para climatización, frente a 6.3 kWh/m²·año de la madera. Esa diferencia del 84% se traduce en miles de dólares acumulados en la factura eléctrica a lo largo de tres décadas.

El LCC ajustado por energía coloca a la madera en \$760/m² frente a \$613/m² del hormigón. La madera sigue siendo más cara en el ciclo de vida, pero la distancia es \$147/m², no \$190/m². Y si se consideran los costos de reparaciones post-sísmicas, que históricamente el hormigón sin supervisión técnica acumula en Manabí, la diferencia se estrecha aún más.

Hay una segunda dimensión económica que el análisis de costo por m² no captura: la velocidad de construcción por metro cuadrado. La Casa Ceibo (330 m²) demora 180–210 días en total, pero su rendimiento es de 0.63 días/m². La vivienda de hormigón (111 m²) se construye en 90–120 días, pero a razón de 1.08 días/m². A igual superficie, la madera industrializada es un 41% más rápida. Para un promotor inmobiliario que financia una obra con crédito, eso tiene un valor concreto: menos días de obra equivalen a menos intereses pagados y más rápida rotación del capital.

5.12.3. Metabolismo Ambiental: Simbiosis entre Confort Bioclimático y Huella de Carbono

La industria de la construcción genera el 34% de las emisiones globales de CO₂ (UNEP & GlobalABC, 2024). Cada decisión de material cuenta. Y aquí la diferencia entre ambos sistemas no es de grado: es de dirección opuesta.

El hormigón emite entre 280 y 450 kg CO₂/m³ durante su producción y no almacena nada a cambio. Su balance neto es positivo de por vida: emisor constante. La madera maciza de

Colorado almacena 1,008 kg CO₂/m³ con una huella de producción de 80–150 kg CO₂/m³. El Glulam GL24h almacena 880 kg CO₂/m³ con una huella de 134 kg CO₂/m³. En ambos casos, el carbono retenido en la estructura supera ampliamente lo que costó producirla. La Casa Ceibo, en su conjunto, actúa como un sumidero de carbono activo durante más de 50 años.

El segundo capítulo ambiental es el térmico. La envolvente de madera multicapa de 21 cm logra una transmitancia $U = 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un desfase térmico de 10 a 11 horas. El muro de bloque de hormigón presenta $U = 1.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ y un desfase de 2 a 3 horas. En el clima tropical de Manabí, donde las temperaturas pueden alcanzar 34°C al mediodía, esa diferencia en desfase térmico significa que la Casa Ceibo mantiene sus interiores a 26°C–28°C sin equipos de climatización, mientras que la vivienda de hormigón llega a 30°C–32°C y depende del aire acondicionado para ser habitable. El resultado energético, 84% menos consumo en la madera, ya fue señalado, pero aquí vale agregar que esa reducción no es solo un ahorro económico: es también una reducción directa de emisiones de CO₂ operacionales durante toda la vida útil del edificio.

5.12.4. Flexibilidad Arquitectónica y Comportamiento Resiliente (Fuego y Acústica)

En términos espaciales, la madera libera la planta. Las columnas compuestas de 14×21 cm ocupan menos de 0.40 m² en planta; las columnas de hormigón suman 1.32 m². La diferencia parece pequeña en números, pero en una vivienda de 111 m² es significativa. Además, la retícula fija del hormigón condiciona la distribución de ambientes de por vida: cualquier cambio implica riesgo estructural. En la Casa Ceibo, los tabiques no son portantes; la planta es libre y adaptable.

Frente al fuego, el hormigón tiene ventaja en resistencia pasiva: alcanza REI-90 y REI-120 sin costo adicional. La madera necesita un sobreespesor de sacrificio de 49 mm para REI-60, o una placa de cartón-yeso tipo F para llegar a REI-90. Sin embargo, el hormigón puede fallar de manera repentina cuando el acero de refuerzo supera su temperatura crítica de 400°C–500°C, sin señal previa alguna. La madera, en cambio, carboniza a 0.65–0.70 mm/min de forma progresiva y audible, dando tiempo real de evacuación. Ambos cumplen la exigencia normativa mínima de REI-60; la diferencia está en cómo fallan, no en si fallan.

En acústica, el hormigón resuelve el ruido aéreo con facilidad por su masa ($R_w = 50\text{--}55$ dB), pero genera espacios altamente reverberantes ($\alpha = 0.02\text{--}0.05$) y transmite el ruido de impacto sin tratamiento ($L_n = 75$ dB). La madera multicapa alcanza $R_w = 45\text{--}48$ dB con diseño adecuado, absorbe el sonido superficialmente ($\alpha = 0.40\text{--}0.60$) y reduce la reverberación interior, pero su entrepiso en la configuración actual no alcanza el límite normativo de $L_n \leq 60$ dB. Este es el único punto donde la madera requiere mejoras técnicas para igualar al hormigón, y la solución existe: lámina desolidarizante bajo el OSB superior.

5.12.5. Matriz de Evaluación Multicriterio

A continuación, se presenta la tabulación integral que sintetiza el comportamiento de ambos sistemas constructivos:

Tabla 39

Resultados de evaluación comparativa

Dimensión de Análisis	Criterio Específico	Madera Laminada y Maciza (Casa Ceibo)	Hormigón Armado (Vivienda Tipo)	Ventaja / Brecha Comparativa
Estructural & Sísmica	Densidad Estructural	59.81 kg/m ² (Alta ligereza)	338.12 kg/m ² (Alta masividad)	Madera: 82% reducción de fuerzas inerciales en sismos.
	Relación Resistencia/Peso	~204 MPa·m/kN (Glulam/Maciza)	~14.89 MPa·m/kN (HA)	Madera: Eficiencia mecánica 14x superior por unidad de masa.
Ambiental	Metabolismo de CO ₂	Sumidero Activo (Neto -866 kg CO ₂ /m ³)	Emisor Pasivo (Neto +310 kg CO ₂ /m ³)	Madera: Impacto regenerativo contra el cambio climático.
	Desperdicio en Obra	< 2% (Fabricación CNC)	10% - 15% (Mezclas, encofrado in-situ)	Madera: Precisión industrial, alta reciclabilidad.
Térmico & Energético	Aislamiento (Valor U)	0.28 W/m ² K (Excelente barrera térmica)	1.80 W/m ² K (Alta transmitancia térmica)	Madera: Aísla 6 veces más eficientemente.

Dimensión de Análisis	Criterio Específico	Madera Laminada y Maciza (Casa Ceibo)	Hormigón Armado (Vivienda Tipo)	Ventaja / Brecha Comparativa
Térmico & Energético	Demanda de Climatización	6.3 kWh/m ² -año	40 kWh/m ² -año	Madera: 84% de ahorro energético anual.
Constructivo & Económico	Velocidad de Ejecución	0.63 días/m ² (Ensamblaje en seco)	1.08 días/m ² (Fraguados y obra húmeda)	Madera: 41% mayor rapidez por metro cuadrado.
	Costo de Ciclo de Vida (30 años)	Alta inversión inicial, bajo costo operativo y mantenimientos predecibles.	Baja inversión inicial, alto costo operativo energético a largo plazo.	Empate Condicionado: La madera es más rentable a largo plazo; el hormigón es más accesible a corto plazo.
Seguridad & Confort	Resistencia al Fuego	Carbonización controlada y audible. Evacuación segura. (REI-60)	Incombustible, pero falla estructural súbita a 500°C. (REI-60/120)	Madera: Falla predecible. Hormigón: Mayor resistencia pasiva.
	Acústica (Ruido de Impacto)	Vulnerable sin diseño multicapa (65-72 dB)	Aislante por masividad natural (50 dB)	Hormigón: Mayor facilidad de aislamiento nativo.
Social & Cultural	Aceptación y Prejuicios	Disonancia: Duda sísmica pese a su superioridad. Raíz vernácula (Biofilia).	Alta confianza local post-2016. Símbolo de estatus y solidez.	Hormigón: Menor barrera de adopción en el mercado local.
	Mano de Obra Local	Requiere montajistas calificados (escasa oferta)	Genera alto volumen de empleo informal local	Hormigón: Inyección económica directa e inmediata en la comunidad

Nota. Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Esta investigación comparó dos sistemas constructivos reales en Manabí: la Casa Ceibo en madera laminada y maciza, y una vivienda tipo de hormigón armado en Manta. Los resultados permiten establecer conclusiones claras en cada dimensión analizada:

- **Superioridad estructural en zona sísmica:** La madera es significativamente más ligera que el hormigón, lo que se traduce en menores fuerzas inerciales durante un sismo y una eficiencia mecánica muy superior por unidad de peso. En Zona Sísmica V, esta ligereza no es una debilidad: es su principal ventaja estructural.
- **La madera actúa como sumidero de carbono:** A diferencia del hormigón, cuyo impacto ambiental inicial es permanente e irrecuperable, la madera almacena más carbono del que emite durante su producción, convirtiéndose en un material climáticamente positivo a lo largo de toda su vida útil.
- **Confort térmico sin climatización artificial:** La envolvente de madera multicapa mantiene temperaturas interiores dentro del rango de confort sin necesidad de aire acondicionado, reduciendo la demanda energética en un 84% respecto al hormigón. En el clima tropical de Manabí, esto representa una ventaja habitacional y económica sostenida.
- **El costo inicial sigue siendo una barrera real:** La madera es más cara al inicio y esa diferencia no desaparece en el ciclo de vida, aunque sí se reduce. Para el mercado de vivienda media en Manabí, este sobre costo requiere instrumentos financieros concretos para ser absorbido.
- **El hormigón supera a la madera en resistencia pasiva al fuego:** Alcanza mayores niveles de resistencia sin tratamiento adicional. La madera cumple la exigencia mínima normativa, pero requiere protección complementaria para igualar al hormigón en este ámbito.
- **La disponibilidad local del material es una limitación concreta:** El hormigón se abastece en cualquier municipio de la provincia. La madera estructural, especialmente el

Glulam, depende de proveedores externos. Sin una cadena productiva local consolidada, su adopción masiva seguirá siendo restringida.

- **La mayor barrera no es técnica:** La percepción sociocultural post-terremoto de 2016 asocia la pesadez del hormigón con la seguridad. Superar ese paradigma requiere obras demostrativas, respaldo institucional y tiempo, más que evidencia técnica adicional.

7. RECOMENDACIONES

A partir de las conclusiones anteriores, se presentan las siguientes recomendaciones ordenadas por urgencia e impacto en el contexto constructivo de Manabí:

- **Difusión y aplicación efectiva de la NEC-SE-MD:** Aunque Ecuador ya cuenta con normativa de madera estructural. El problema es que la mayoría de profesionales y contratistas de Manabí no la conocen ni la aplican. La primera acción concreta debe ser llevarla a los colegios profesionales, municipios y gremios de la construcción de la provincia. Sin este paso, todo lo demás es prematuro.
- **Desarrollo de la cadena productiva local:** Mientras el Glulam llegue desde Quito y los aserraderos locales operen sin tecnificación, la madera seguirá siendo cara y logísticamente dependiente. Se requiere inversión en secado en cámara, corte dimensional y preservación de madera en Manabí, así como plantaciones comerciales reguladas. Sin oferta local, el material no puede competir realmente con el hormigón.
- **Manual técnico de diseño y mantenimiento para el perfil costero:** La madera en clima tropical-costero requiere tratamiento preventivo periódico y un diseño multicapa correcto para resolver sus limitantes acústicas de impacto. Hace falta un documento técnico accesible, adaptado al contexto de Manabí, que establezca especificaciones mínimas de cerramiento, cronogramas de mantenimiento y fichas de materiales con proveedores locales verificados.
- **Transformación curricular y certificación técnica:** Incorporar diseño estructural en madera en las facultades de Arquitectura e Ingeniería de la región, y crear programas de certificación para carpinteros y montajistas en sistemas de ensamblaje en seco, es la inversión de mayor horizonte temporal pero la que define si la transición constructiva es sostenible a largo plazo. Sin mano de obra local calificada, ninguna de las recomendaciones anteriores se consolida.

Como cierre a las recomendaciones anteriores, se propone un plan de transferencia tecnológica dirigido a los tres actores clave para la adopción de la madera laminada como sistema constructivo en Manabí:

- **Academia:** Incorporar el diseño estructural en madera y el análisis comparativo de sistemas constructivos (madera vs. hormigón) como contenido curricular obligatorio en las facultades de Arquitectura e Ingeniería Civil de la provincia. Promover líneas de investigación y proyectos de titulación sobre comportamiento sísmico, térmico y de ciclo de vida de la madera laminada en clima tropical-costero, replicando y ampliando la metodología comparativa usada en este estudio.
- **Gobiernos Locales/Nacionales:** Impulsar ante el MIDUVI y el Comité Ejecutivo de la NEC la actualización de la NEC-SE-MD, incorporando criterios específicos de diseño para Glulam en sistemas de media altura, actualmente ausentes en la norma vigente. Establecer, a nivel de municipios de Manabí, incentivos normativos y tributarios (agilidad en permisos de construcción, reducción de tasas) para edificaciones que certifiquen el uso de sistemas de madera estructural, como mecanismo de difusión efectiva de la NEC-SE-MD.
- **Sector Industrial/Forestal:** Fomentar la instalación de plantas de tecnificación (secado en cámara, corte dimensional, preservación) en Manabí, reduciendo la dependencia logística del Glulam producido en Quito. Articular alianzas entre aserraderos locales, plantaciones forestales reguladas y gremios de la construcción para desarrollar una cadena de suministro certificada de madera laminada con trazabilidad y control de calidad.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeo. (s.f.). Ficha técnica viga laminada GL24h, calidad vista.
<https://media.adeo.com/media/4528626/media.pdf>
- ASHRAE. (2020). ANSI/ASHRAE Standard 55:2020 — Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
<https://www.scribd.com/document/695087734/ASHRAE-55-2020>
- Ayala, J. (2022). Construcción, identidad y territorio en la costa ecuatoriana: perspectivas antropológicas del material constructivo. *Revista Territorios Culturales*, 8(2), 23–39. <https://revistas.uees.edu.ec/index.php/territorios/article/view/472>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2024). Transformando la construcción en América Latina y el Caribe: digitalización e innovación como claves para la sostenibilidad (Nota Técnica No. IDB-TN-3025).
<https://doi.org/10.48204/reicit.v5n1.7680>
- Bijker, W. E. (2005). ¿CÓMO Y POR QUÉ ES IMPORTANTE LA TECNOLOGÍA?
- Buchanan, A., Palermo, A., Carradine, D., & Pampanin, S. (2011). Post-tensioned timber frame buildings. *The Structural Engineer*, 89(17), 24–30.
- Bustillo-García, L., & Martínez-Dávila, J. P. (2008). Los enfoques del desarrollo sustentable. *Interciencia*, 33(5), 389-395.
- Cámara de la Industria de la Construcción. (2025). Salarios mínimos por ley 2025 — Estructura ocupacional construcción y servicios técnicos y arquitectónicos. CAMICON. Elaborado en base al Acuerdo Ministerial No. MDT-2024-300.

Cámara de la Industria de la Construcción. (2026). Salarios mínimos 2026 — Estructura ocupacional construcción y servicios técnicos y arquitectónicos. CAMICON. Elaborado en base al Acuerdo Ministerial No. MDT-2025-195.

Carrión Mena, F., & Cepeda, P. (2021). La ciudad pospandemia: Del urbanismo al “civitismo”. *Desacatos: Revista de Ciencias Sociales*, 65, 66-85.

CEN. (2004). EN 1995-1-2: Eurocode 5 — Design of timber structures. Part 1-2: General — Structural fire design. European Committee for Standardization.
<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.2.2004.pdf>

Cevallos Saavedra, A., & Morejón Armijo, E. (s.f.). Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de Guarea kunthiana para su aplicación en la construcción. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
<https://es.scribd.com/document/401906211/Propiedades-fisicas-y-mecanicas-Colorado-docx>

CYPE Ingenieros S.A. (2024). Generador de precios de la construcción — Ecuador: Hormigón $f_c=210$ kg/cm² para armar.
https://ecuador.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Estructuras/Hormigones_aceros_y_encofrados/Hormigones/Hormigon_para_armar.html

CYPE Ingenieros S.A. (2024). Generador de precios de la construcción — Ecuador: Acero Grado 60 ($f_y=4200$ kg/cm²) para hormigón armado.
https://ecuador.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cimentaciones/Hormigones_aceros_y_encofrados/Aceros/Acero_para_hormigon.html

Ecuador. Ministerio del Trabajo. (2024). Acuerdo Ministerial No. MDT-2024-300: Fijación de salarios mínimos sectoriales para el año 2025. Registro Oficial.
<https://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2024/01/3.-Salarios-minimos-sectoriales-2024.pdf>

Ecuador. Ministerio del Trabajo. (2025). Acuerdo Ministerial No. MDT-2025-195: Fijación de salarios mínimos sectoriales para el año 2026. Registro Oficial.

Espinoza, P., Proaño, D., Barrera, L., & Arpi, E. (2024). Catálogo de madera estructural del Ecuador. Universidad del Azuay.

<https://publicaciones.uazuay.edu.ec/index.php/ceuazuay/catalog/book/325>

Espinoza, P., Proaño, D., Barrera, L., & Arpi, E. (2024). Catálogo de madera estructural del Ecuador. Universidad del Azuay.

<https://publicaciones.uazuay.edu.ec/index.php/ceuazuay/catalog/book/325>

Estudio YURA. (2025). Casa CEIBO. Revista Trama.

<https://trama.ec/web/proyectos/estudionyura-casa-ceibo>

Forest Products Laboratory. (2021). Wood handbook — Wood as an engineering material (General Technical Report FPL-GTR-282). U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wood_Handbook%E2%80%94Wood_as_an_Engineering_Material,_2021.pdf

Frangi, A., et al. (2018). Fire tests on glued-laminated timber beams with specific local material properties. Fire Safety Journal.

<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.009>

García, M., & Pacheco, L. (2019). Transformaciones culturales en la arquitectura latinoamericana moderna: del material vernáculo al hormigón armado. Revista de Arquitectura y Sociedad, 12(3), 45–58.

Gonçalves, C. (2016). Regiões, cidades e comunidades resilientes: Novos princípios de desenvolvimento. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, 9(2), 371-385.

Hemmati, A., Bergman, R., & Ganguly, I. (2024). Comparison of Embodied Carbon Footprint of a Mass Timber and a Conventional Office Building. U.S. Forest Products Laboratory.

https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf2024/fpl_2024_hemmati002.pdf

Ingold, T. (2000). The Perception of the Environment: Essays on Livelihood, Dwelling and Skill. Routledge.

Ingold, T. (2000). *The Perception of the Environment: Essays on Livelihood, Dwelling and Skill*. Routledge. <https://leiaarqueologia.files.wordpress.com/2017/08/the-perception-of-the-environment-tim-ingold.pdf> -REFERENCIAS DEL MARCO CONCEPTUAL

ISO. (2017). ISO 13786:2017 — Thermal performance of building components — Dynamic thermal characteristics — Calculation methods. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/65711.html>
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/65711/e9fa7fa84e074b3d980016b553b0ce9b/ISO-13786-2017.pdf>

ISO. (2017). ISO 6946:2017 — Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/65708.html>
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/65708/12916cda1911488fa6f05e404c995433/ISO-6946-2017.pdf>

ISO. (2020). ISO 717-1:2020 — Acoustics: Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/51968.html>
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/77435/1609f1821aa54f128753faa0423d239a/ISO-717-1-2020.pdf>

Méndez, R. (2012). Ciudades y metáforas: Sobre el concepto de resiliencia urbana. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 215-231.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (s. f.). En madera, otra forma de construir: El material constructivo sostenible del siglo XXI (folleto).
<https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/politica-forestal/En%20madera%2C%20otra%20forma%20de%20construir.%20El%20material%20constructivo%20sostenible%20del%20siglo%20XXI.pdf>

NEC-SE-HM: Norma Ecuatoriana de la Construcción — Estructuras de Hormigón Armado, MIDUVI Ecuador

Páez, F. A. A. (2007). La sustentabilidad urbana en las ciudades. *Boletim Goiano de Geografia*, 27(2), 11-33.

Páez—2007—La sustentabilidad urbana en las ciudades..pdf. (s. f.).

Rodríguez, D., Toaquiza, B., Viera, L., Jácome-Monar, P., & Quizanga, D. (2026). Comportamiento histerético de conexiones de paneles de madera laminada encolada y pies derechos de laurel. *Revista Politécnica*, 57(2), 21–32.
<https://doi.org/10.33333/rp.vol57n2.02>

Serpell, A. (1987). Innovación tecnológica en la construcción. *Revista Ingeniería de Construcción*, (3), 1-15.
<https://revistadelaconstruccion.uc.cl/index.php/ric/article/view/17897>

Suárez, J. (2002). Acerca de la esencia de la Arquitectura. *Utopía y Praxis Latinoamericana*, 7(16), 93-100.

UNEP & GlobalABC. (2024). Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. Nairobi: UNEP. Disponible en:
<https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>

United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Hacia una ecologización de las ciudades: El rol de la construcción [Informe].
https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/unep119_spn.pdf

Universidad de Valladolid & Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM). (2013). La arquitectura vernácula en el medio rural y urbano de Manabí. Grupo Tierra. <https://www5.uva.es/grupotierra/aecid/publicaciones/2013/4b.pdf>

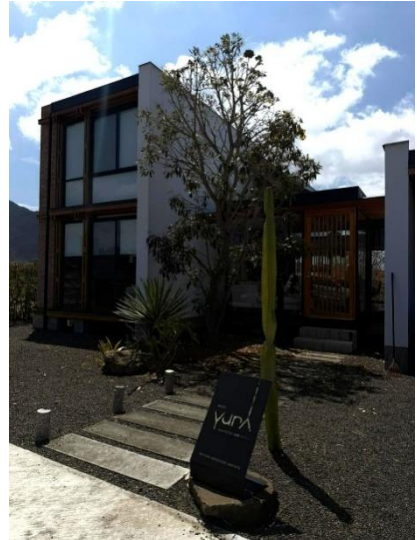
Villa, F. C., Sampson, A. O., & Navarro, M. G. C. (2011). La sustentabilidad ambiental como sustentabilidad del régimen capitalista. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 18(1), 95-101.

Zhao, J., Wei, X., & Li, L. (2022). The potential for storing carbon by harvested wood products. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 1055410.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.1055410>

9. ANEXOS

Figura 21

Evidencias fotográficas de la visita a la vivienda de madera



Nota. Fotografías en sitio.

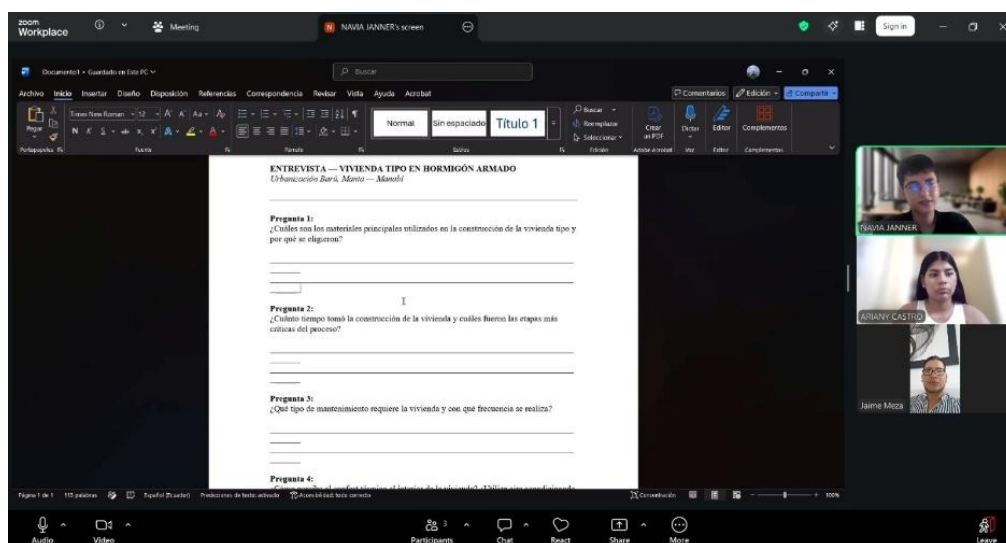
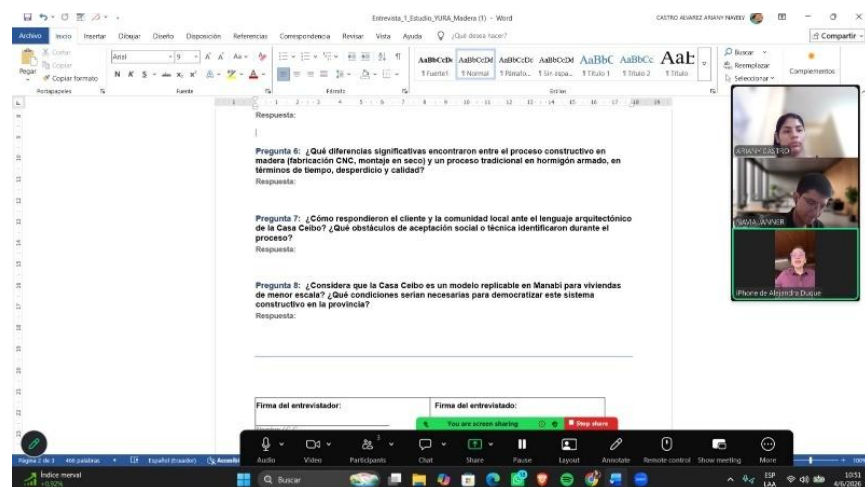
Figura 22

Evidencias fotográficas de la visita a la vivienda de hormigón armado



Nota. Fotografías en sitio.

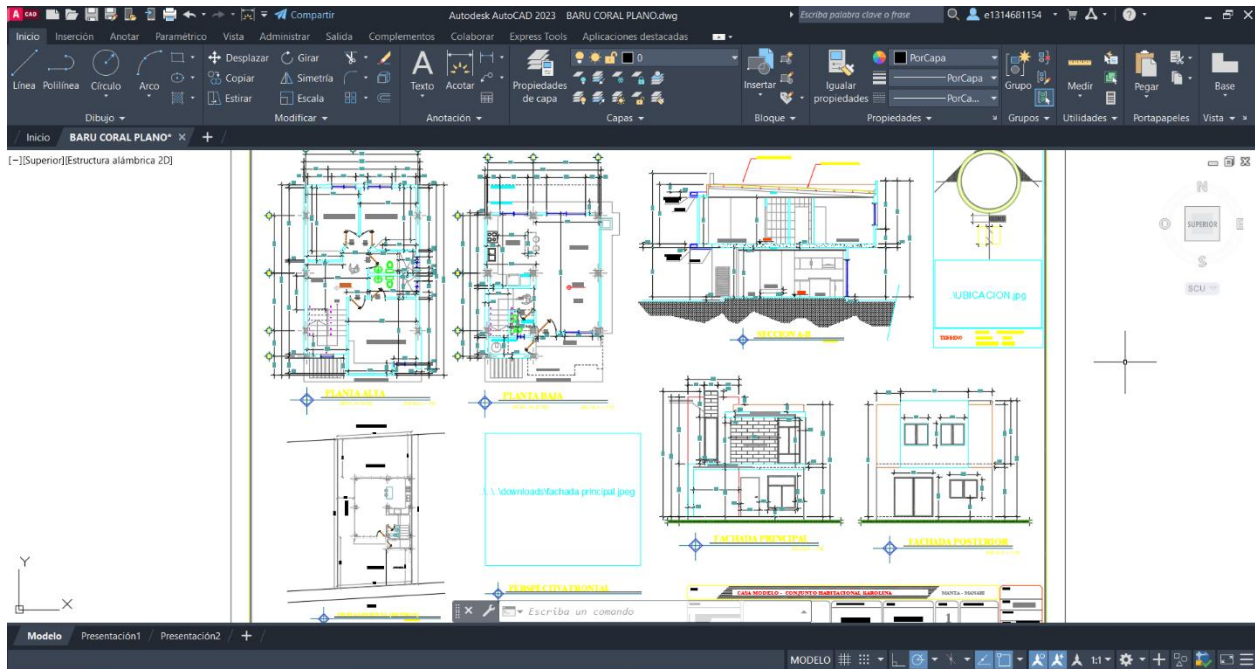
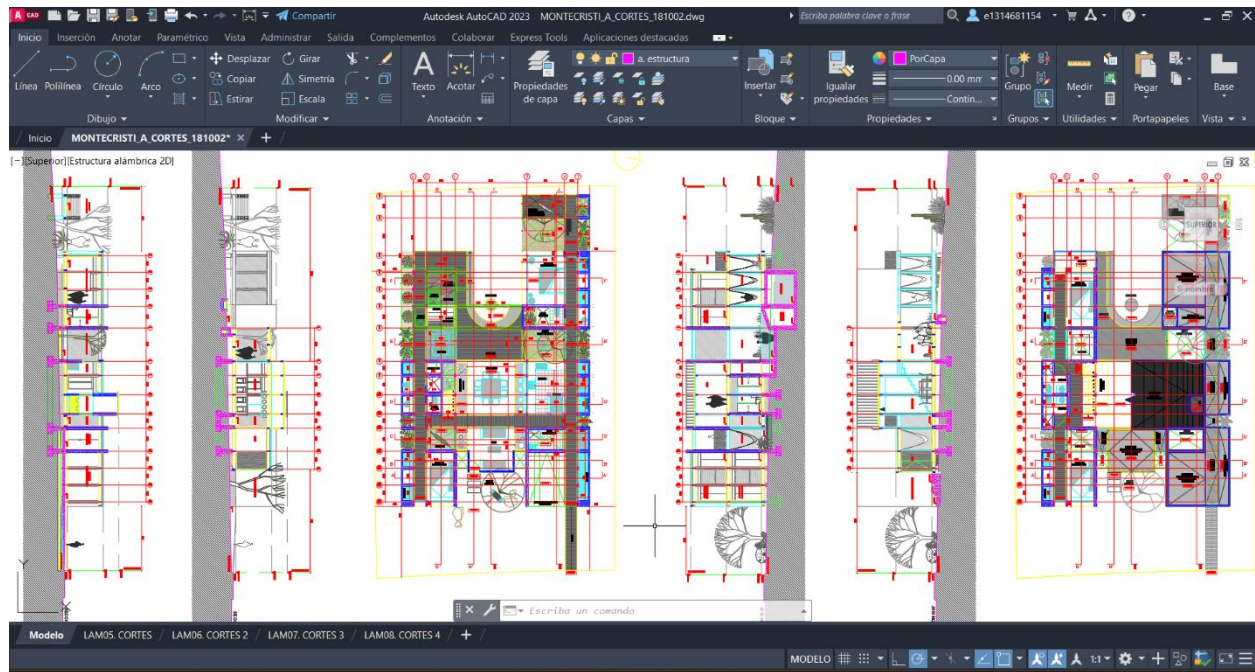
Figura 23
Evidencias fotográficas de entrevistas



Nota. Realizadas de forma virtual.

Figura 24

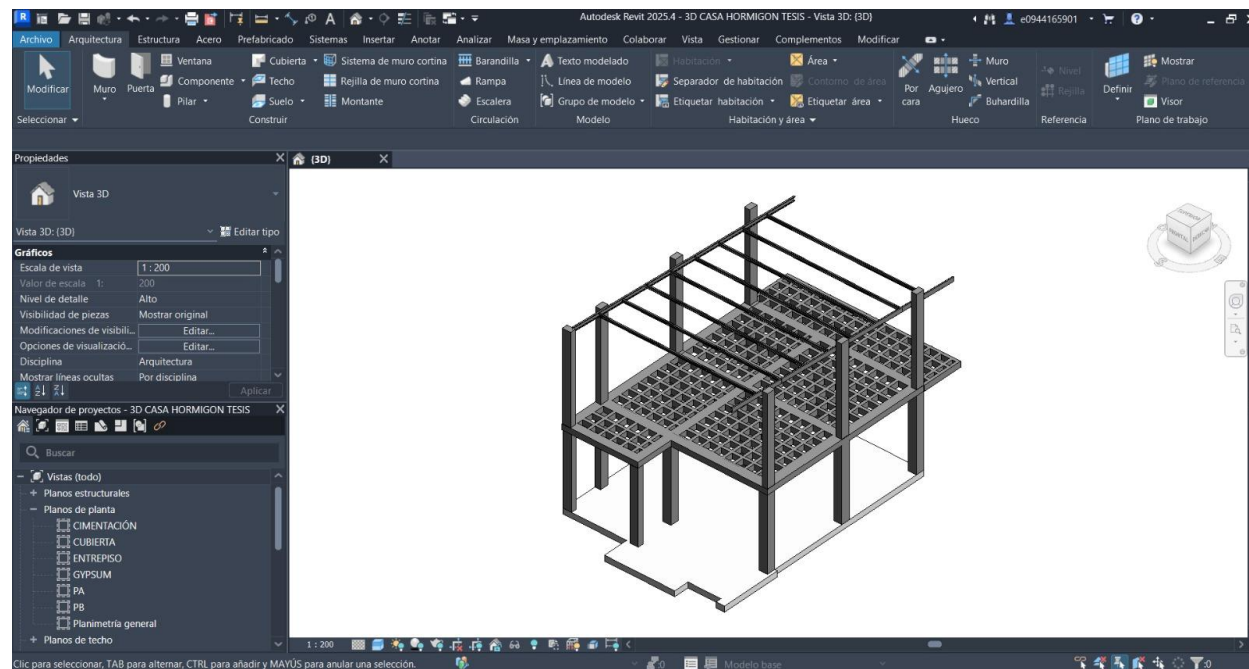
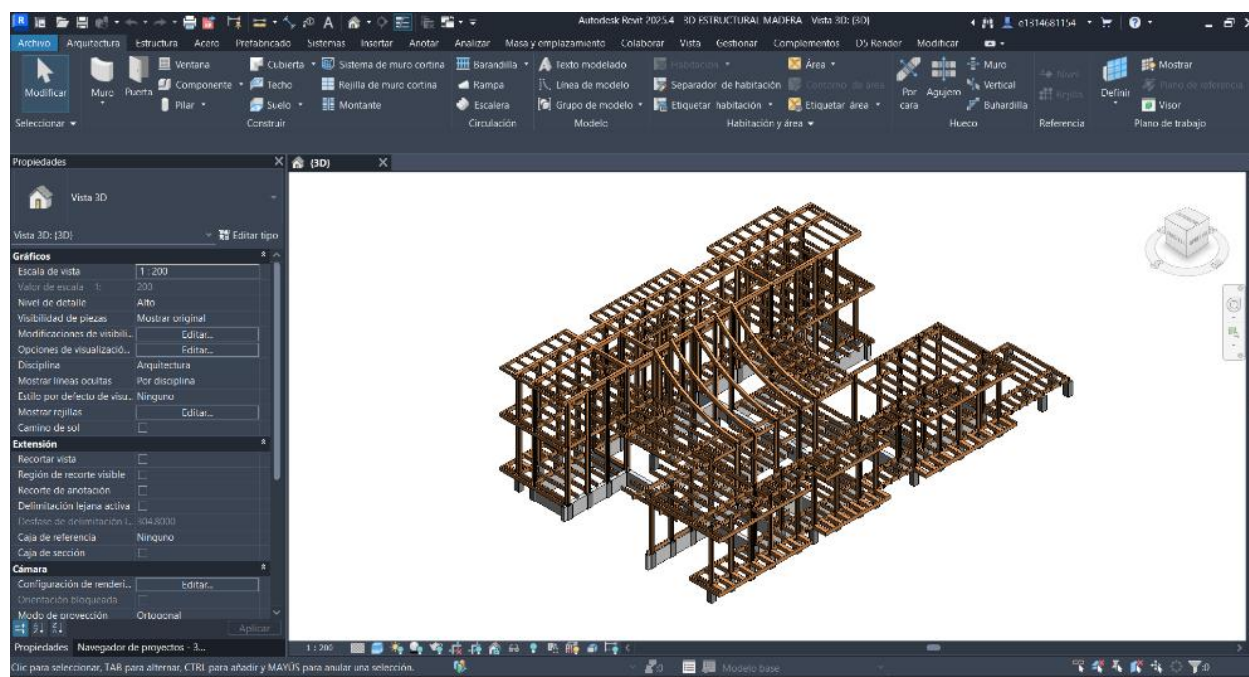
Evidencia fotográfica de planos 2D de ambas viviendas



Nota. Planos proporcionados por arquitectos a cargo de ambas viviendas.

Figura 25

Evidencia fotográfica del 3D estructural



Nota. Elaboración propia a partir de la información de planos 2D.

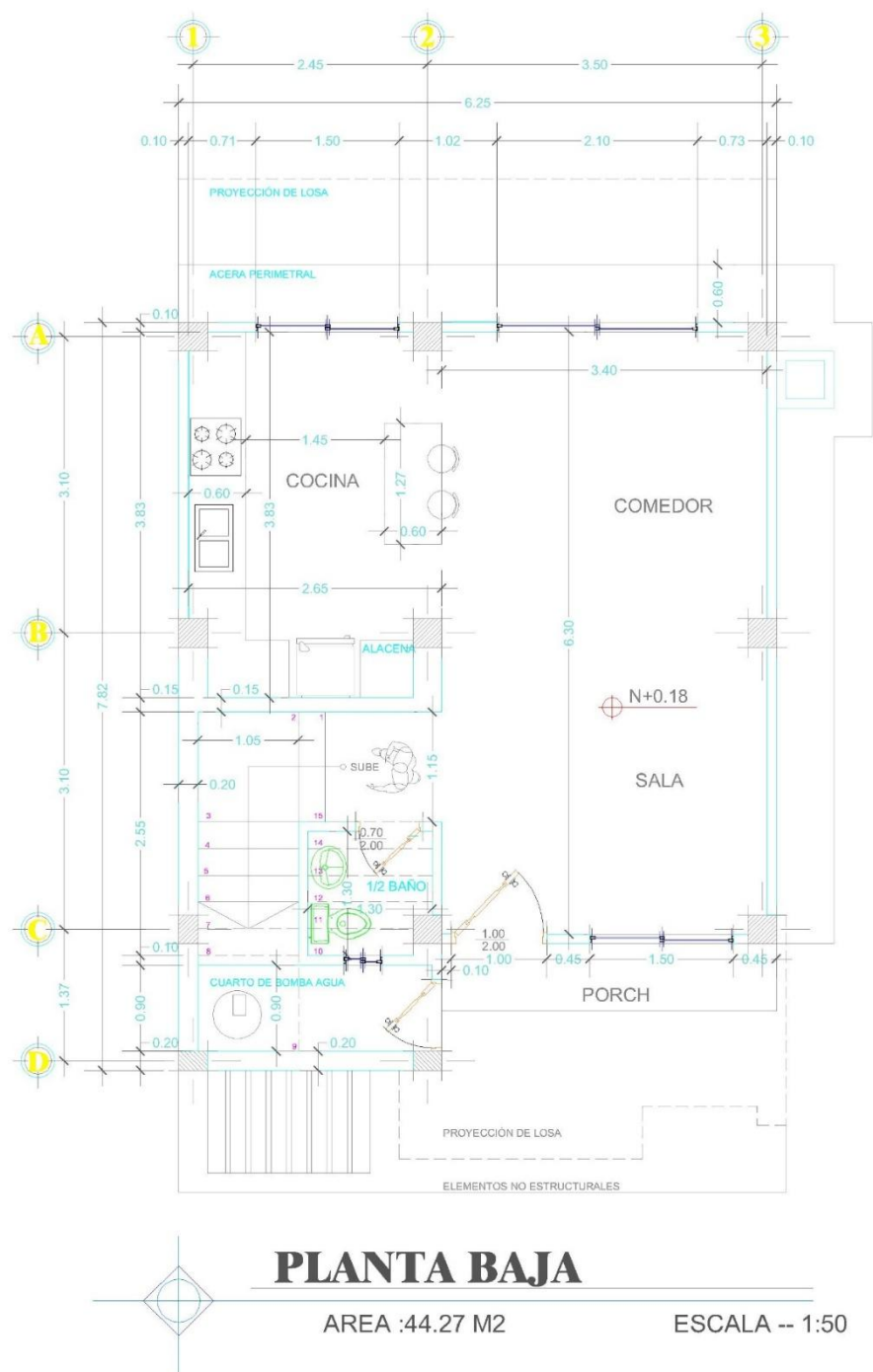
Figura 26*Planos arquitectónicos vivienda de hormigón armado**Nota.* Proporcionado por arquitecto de la vivienda.

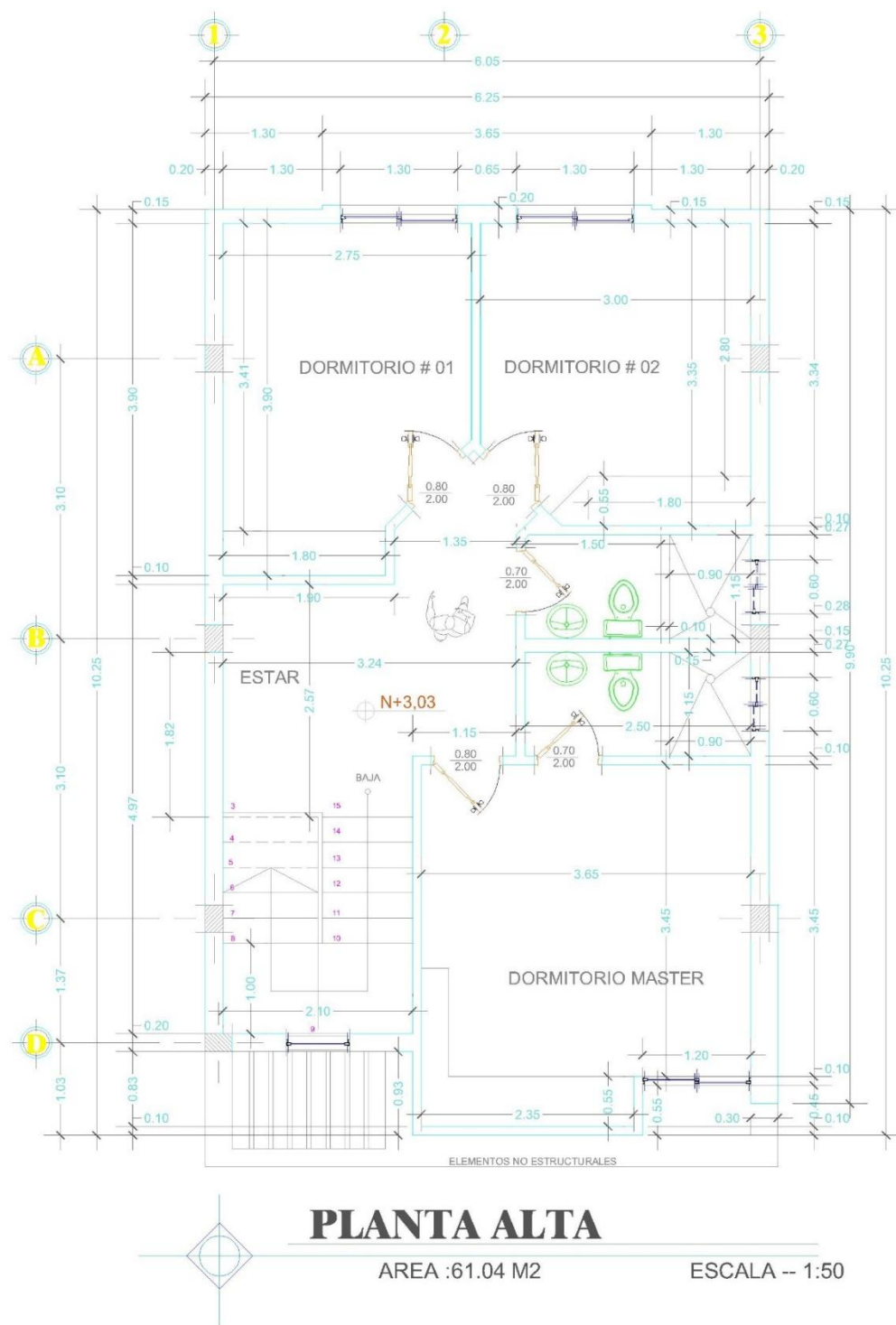
Figura 27*Planos arquitectónicos vivienda de hormigón armado**Nota. Proporcionado por arquitecto de la vivienda.*

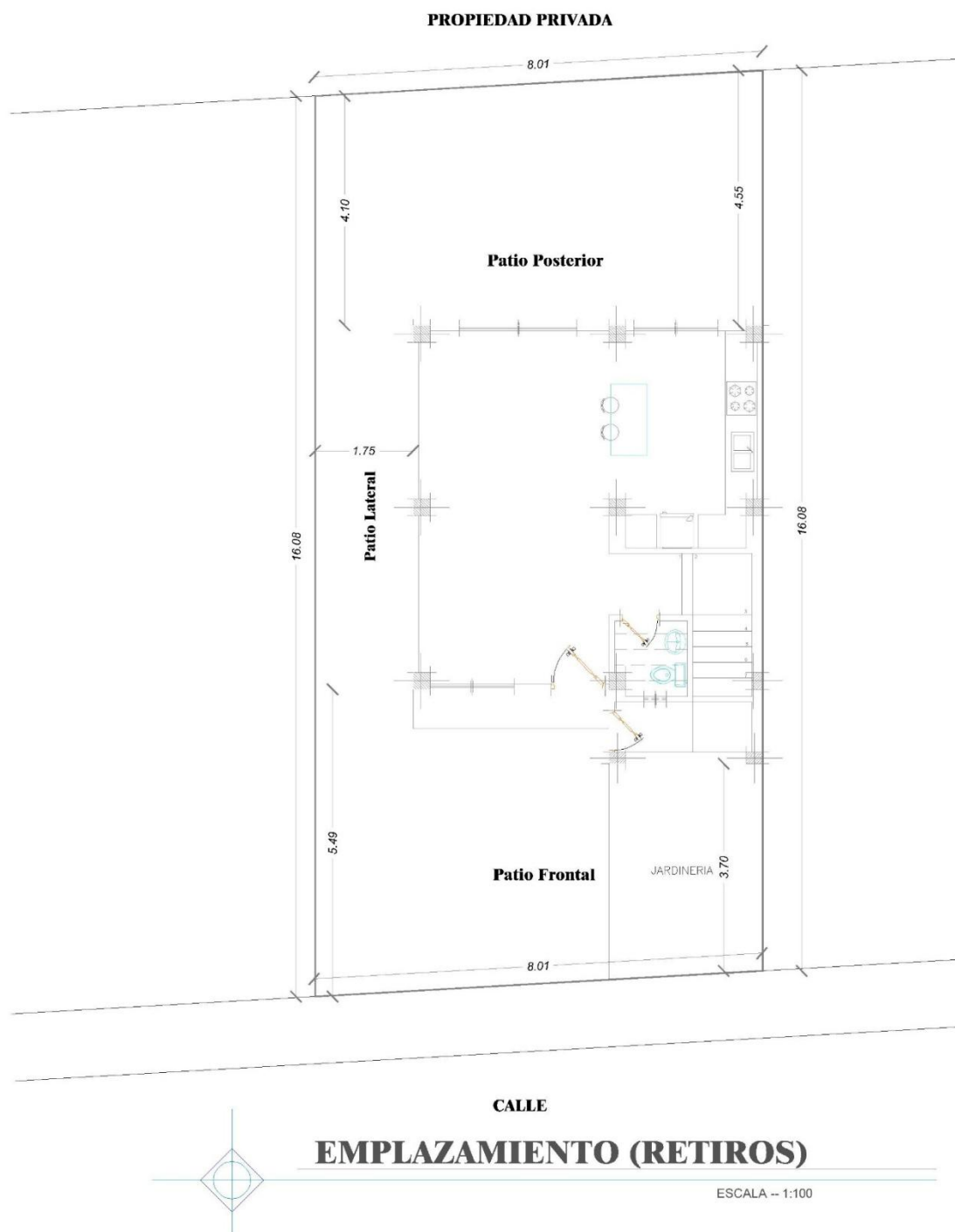
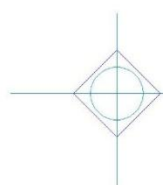
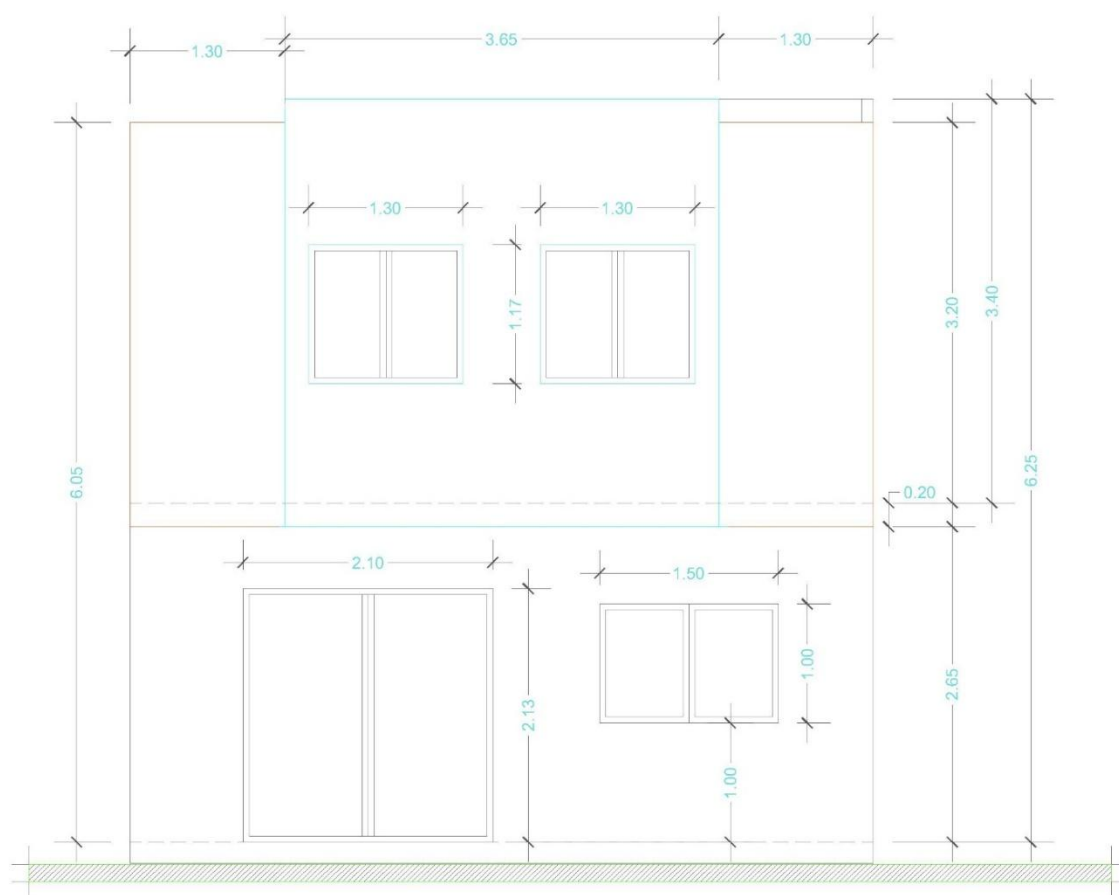
Figura 28*Planos arquitectónicos vivienda de hormigón armado**Nota.* Proporcionado por arquitecto de la vivienda.

Figura 29*Planos arquitectónicos vivienda de hormigón armado*

FACHADA POSTERIOR

ESCALA -- 1:50

Nota. Proporcionado por arquitecto de la vivienda.

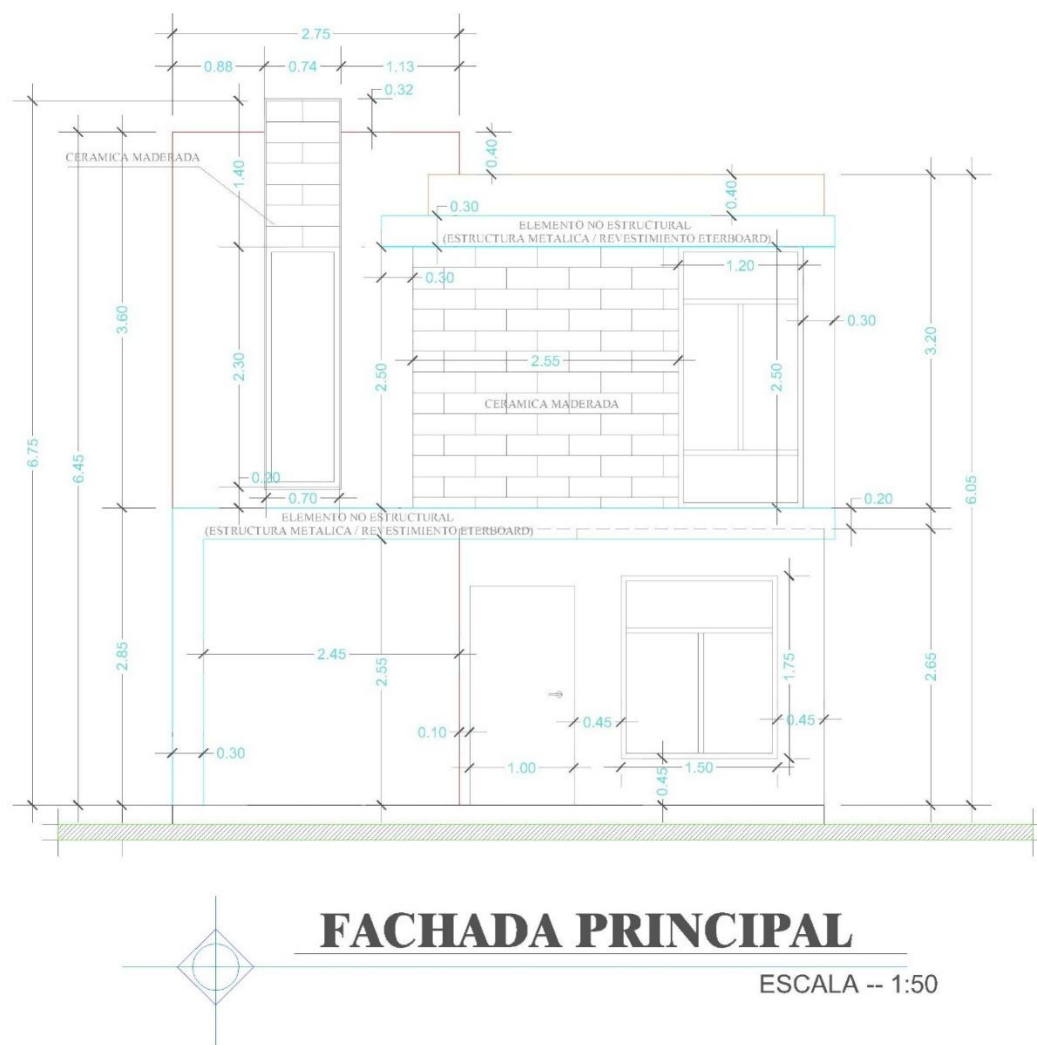
Figura 30*Planos arquitectónicos vivienda de hormigón armado**Nota. Proporcionado por arquitecto de la vivienda.*

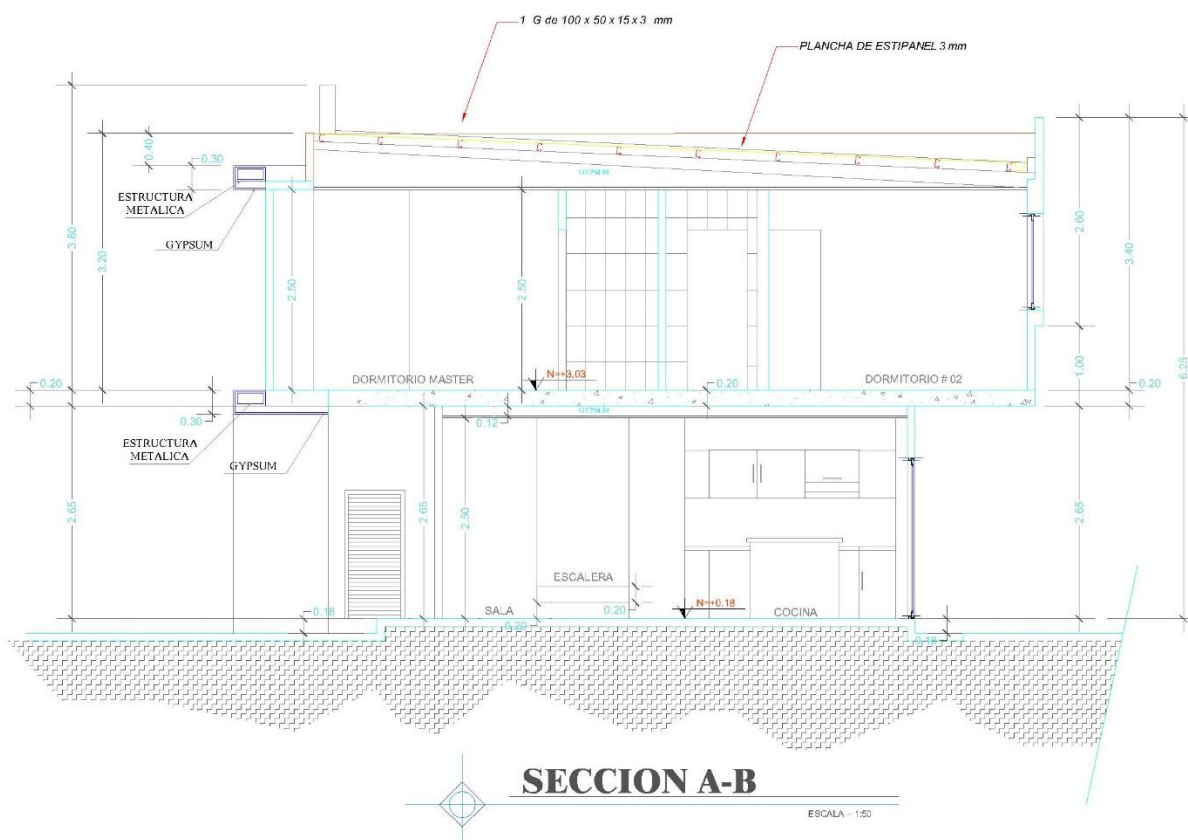
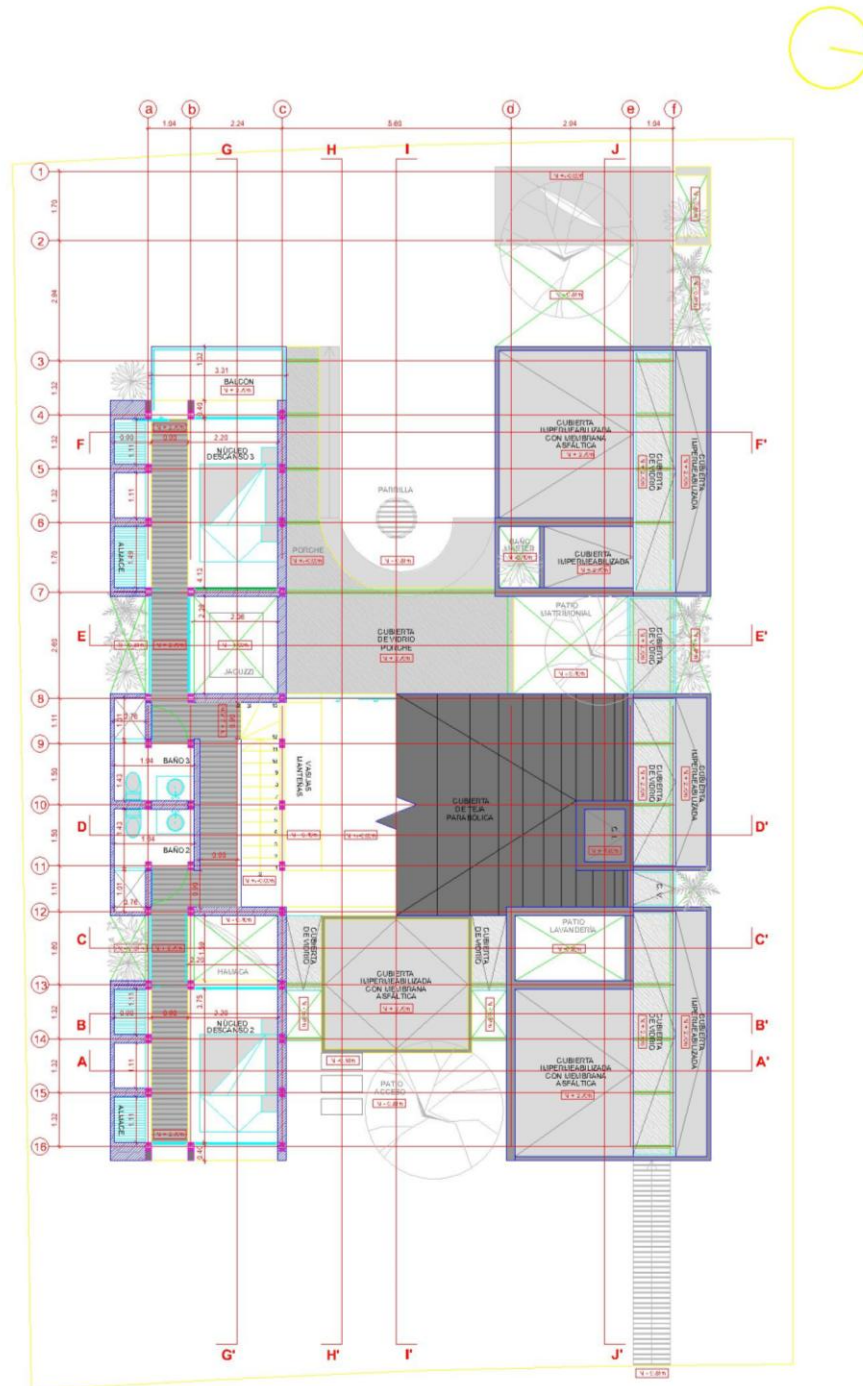
Figura 31*Planos arquitectónicos vivienda de hormigón armado**Nota. Proporcionado por arquitecto de la vivienda.*

Figura 32

Planos arquitectónicos vivienda de madera



Nota. Proporcionado por arquitecta de la vivienda.

Cálculo Resistencia/Peso de las vigas estructurales:**Madera maciza:**

$$R/P = \frac{\sigma \text{ (Resistencia a flexión)}(MPa)}{w \text{ (Peso por metro lineal)}(kN/m)}$$

$$R/P = \frac{14.71 \text{ MPa}}{7.35 \text{ kg/m} \div 101.97}$$

$$R/P = \frac{14.71 \text{ MPa}}{0.072 \text{ kN/m}} = \mathbf{204.3 \text{ MPa} \cdot m/kN}$$

Madera laminada:

$$R/P = \frac{\sigma \text{ (Resistencia a flexión)}(MPa)}{w \text{ (Peso por metro lineal)}(kN/m)}$$

$$R/P = \frac{24 \text{ MPa}}{12.05 \text{ kg/m} \div 101.97}$$

$$R/P = \frac{24 \text{ MPa}}{0.118 \text{ kN/m}} = \mathbf{203.38 \text{ MPa} \cdot m/kN}$$

Hormigón:

$$R/P = \frac{\sigma \text{ (Resistencia a flexión)}(MPa)}{w \text{ (Peso por metro lineal)}(kN/m)}$$

$$R/P = \frac{21 \text{ MPa}}{144 \text{ kg/m} \div 101.97}$$

$$R/P = \frac{21 \text{ MPa}}{1.41 \text{ kN/m}} = \mathbf{14.89 \text{ MPa} \cdot m/kN}$$

Cálculo económico de elementos individuales en la vivienda de hormigón:

Base de cálculo: Hormigón $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ preparado en obra $\rightarrow \$112.46/\text{m}^3$ (CYPE Ecuador 2024) Acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow \$1.73/\text{kg}$ (CYPE Ecuador 2024)

Tabla 40

Columna $30 \times 30 \text{ cm}$ (8 unidades) altura total: 5.15 m | volumen total: 3.71 m^3

Material	Cemento Portland (sacos 50kg)	Arena (árido fino)	Ripio (árido grueso)	Agua	Acero $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$	Encofrado (tablas+puntales)	Alambre #18	Costo total
Cantidad	25.97 sacos	2.08 m^3	2.41 m^3	686.72 lt	166.96 kg	50.88 m^2	2.40 kg	—
Precio unitario	\$8.50/saco	\$12.00/ m^3	\$14.00/ m^3	\$0.001/lt	\$1.73/kg	\$3.50/ m^2	\$2.00/kg	—
Costo	\$220.75	\$24.96	\$33.74	\$0.69	\$288.84	\$178.08	\$4.80	\$751.86

Nota. Elaboración propia.

Tabla 41

Columna $20 \times 30 \text{ cm}$ (10 unidades) altura total: 5.15 m | volumen total: 3.09 m^3

Material	Cemento Portland (sacos 50kg)	Arena (árido fino)	Ripio (árido grueso)	Agua	Acero $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$	Encofrado (tablas+puntales)	Alambre #18	Costo total
Cantidad	21.63 sacos	1.70 m^3	2.01 m^3	571.65 lt	139.10 kg	52.30 m^2	2.00 kg	—
Precio unitario	\$8.50/saco	\$12.00/ m^3	\$14.00/ m^3	\$0.001/lt	\$1.73/kg	\$3.50/ m^2	\$2.00/kg	—
Costo	\$183.86	\$20.40	\$28.14	\$0.57	\$240.64	\$183.05	\$4.00	\$660.66

Nota. Elaboración propia.

Tabla 42

Vigas 30×20 cm — nivel entepiso (50.03 m lineales) | sección: 30×20 cm | volumen total: 3.00 m

Material	Cemento Portland (sacos 50kg)	Arena (árido fino)	Ripio (árido grueso)	Agua	Acero fy=4200 kg/cm²	Encofrado (tablas+puntales)	Alambre #18	Costo total
Cantidad	21.00 sacos	1.65 m ³	1.95 m ³	555.50 lt	135.00 kg	30.02 m ²	1.95 kg	—
Precio unitario	\$8.50/saco	\$12.00/m ³	\$14.00/m ³	\$0.001/lt	\$1.73/kg	\$3.50/m ²	\$2.00/kg	—
Costo	\$178.50	\$19.80	\$27.30	\$0.56	\$233.55	\$105.07	\$3.90	\$568.68

Nota. Elaboración propia.

Tabla 43

Losa de cimentación (44.27 m²) | espesor: 25 cm | volumen total: 11.07 m³

Material	Cemento Portland (sacos 50kg)	Arena (árido fino)	Ripio (árido grueso)	Agua	Acero fy=4200 kg/cm²	Encofrado (tablas+puntales)	Alambre #18	Costo total
Cantidad	77.49 sacos	6.09 m ³	7.20 m ³	2,047.95 lt	276.75 kg	44.27 m ²	8.30 kg	—
Precio unitario	\$8.50/saco	\$12.00/m ³	\$14.00/m ³	\$0.001/lt	\$1.73/kg	\$3.50/m ²	\$2.00/kg	—
Costo	\$658.67	\$73.08	\$100.80	\$2.05	\$478.98	\$154.95	\$16.60	\$1,485.13

Nota. Elaboración propia.

Análisis de Costo de Ciclo de Vida (LCC) a 30 años

-Vivienda de madera

Tabla 44

Instalaciones y acabados — Casa Ceibo (sistema de madera) a 330 m²

Rubro	Descripción	Costo estimado/m ²
Instalación eléctrica	Red de distribución interior, tablero, puntos de luz y tomacorrientes	\$39.80/m ²
Instalación sanitaria	Red de agua potable, desagüe y accesorios sanitarios	\$35.00/m ²
Pisos y revestimientos	Madera vista, cerámica, porcelanato	\$95.00/m ²
Cerramientos exteriores	Tablero OSB + lana mineral + cámara de aire	\$85.00/m ²
Pintura y acabados interiores	Pintura látex + barniz sellador UV madera vista	\$48.00/m ²
Puertas y ventanas	Aluminio + vidrio, puertas madera	\$65.00/m ²
Herrajes, tornillería y anclajes	Conectores galvanizados, acero inoxidable	\$82.20/m ²
TOTAL		≈ \$450/m ²

Nota. Elaboración propia.

Tabla 45

Diseño, corte CNC e ingeniería — Casa Ceibo (sistema de madera)

Rubro	Descripción	Costo estimado/m ²
Modelado BIM	Desarrollo del modelo tridimensional completo de la estructura	\$15.00/m ²
Ingeniería estructural	Memoria de cálculo, planos estructurales, NEC-SE-MD	\$12.00/m ²
Corte CNC en taller	Fabricación digital de elementos estructurales con tolerancias de precisión industrial.	\$35.00/m ²

Diseño arquitectónico	Honorarios de diseño: 8–12% del valor de obra	\$18.00/m ²
TOTAL		≈ \$80/m ²

Nota. Elaboración propia.

Tabla 46

Imprevistos y gastos administrativos — Casa Ceibo (sistema de madera)

Rubro	Descripción	Porcentaje aplicado	Costo estimado/m ²
Imprevistos de obra	Ajustes y contingencias durante montaje y ensamble	3% del costo directo	\$25/m ²
Gastos administrativos	Gestión, coordinación y documentación del proyecto	1.5% del costo directo	\$12/m ²
IVA materiales especializados	Herrajes, conectores e insumos importados	—	\$3/m ²
TOTAL			≈ \$40/m ²

Nota. Elaboración propia.

-Vivienda de hormigón armado

Tabla 47

Instalaciones, acabados y cerramientos — Vivienda tipo (hormigón armado)

Rubro	Descripción	Costo estimado/m ²
Instalación eléctrica	Red de distribución interior, tablero, puntos de luz y tomacorrientes	\$39.80/m²
Instalación sanitaria	Red de agua potable, desagüe, accesorios sanitarios	\$35.00/m²
Cerramiento bloque hormigón 15cm	Mampostería + enlucido interior y exterior	\$45.00/m²
Pisos y revestimientos	Cerámica piso y pared, porcelanato	\$55.00/m²
Pintura interior y exterior	Látex interior + pintura exterior impermeabilizante	\$18.00/m²

Puertas y ventanas	Aluminio + vidrio, puertas MDF	\$42.00/m²
Cubierta Steel Panel AR-2000	Sistema completo incluyendo perfiles G	\$45.20/m²
TOTAL		≈ \$280/m²

Nota. Elaboración propia.

Tabla 48

Diseño e ingeniería estructural — Vivienda tipo (hormigón armado)

Rubro	Descripción	Costo estimado
Diseño arquitectónico	Planos arquitectónicos, memorias, especificaciones	8–12% del valor de obra → ~\$28/m²
Diseño estructural	Planos estructurales, memorias de cálculo NEC-SE-HM	\$8/m²
Permisos municipales	Aprobación de planos, permiso de construcción	1–3% del valor declarado → ~\$6/m²
Fiscalización de obra	Supervisión técnica durante ejecución	\$3/m²
TOTAL		≈ \$45/m²

Nota. Elaboración propia.

Tabla 49

Imprevistos y gastos administrativos — Vivienda tipo (hormigón armado)

Rubro	Descripción	Porcentaje aplicado	Costo estimado/m²
Imprevistos de obra	Ajustes, correcciones y contingencias durante ejecución	5% del costo directo	\$33/m²
Gastos administrativos	Gestión, coordinación y documentación del proyecto	2% del costo directo	\$13/m²
IVA materiales y servicios	15% sobre materiales no incluidos	—	\$4/m²
TOTAL			≈ \$50/m²

Nota. Elaboración propia.