

ITESO, UNIVERSIDAD JESUITA DE GUADALAJARA

Reconocimiento de validez oficial por acuerdo secretarial número 15018 publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano

MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



“Diseño paramétrico de panel prefabricado en tierra cruda y fibras vegetales para entornos cálido-secos: Aplicación en Hermosillo, Sonora”

Modalidad TOG: Proyecto profesionalizante de desarrollo o innovación.

Trabajo para obtener el grado de:

MAESTRO EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES

Presenta:

Arq. Abraham Ignacio Bernal Osorio

Asesor: Mtro. Francisco Álvarez Partida

Tlaquepaque, Jalisco, a 19 de mayo de 2026



Agradecimientos

A mi amoroso Padre Celestial, por darme la oportunidad de seguir preparándome para hacer mi parte en este mundo y preparar el camino para hacer posible esta etapa.

Al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), al Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano (DHDU), y al claustro académico y estudiantil de la Maestría en Proyectos y Edificación Sustentable (MPES) por brindarme las herramientas, recursos, instalaciones y todo lo necesario para realizar este Trabajo de Obtención de Grado.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico que hizo posible cursar esta maestría que me ha permitido crecer, aprender y conectarme con temas apasionantes que suman al bienestar ambiental.

A mi estimado asesor, el Mtro. Francisco Álvarez Partida, por cada una de las asesorías, recomendaciones y aportes que brindaron claridad y dirección a este proyecto.

Al mi buen amigo, el Ing. Miguel Vergara y el equipo de SUA Ingeniería, quienes me apoyaron en la elaboración de pruebas, asesorías y recomendaciones para la elaboración esta investigación

A mi querida, amada y paciente esposa, Natalia I. López, quien ha estado presente en cada momento de esta aventura demostrando su incondicional amor al siempre estar animándome a esforzarme para cumplir mis sueños, por ser un ejemplo de constancia, superación y convicción



Índice.

<i>Agradecimientos</i>	II
Resumen.....	VIII
Palabras Clave.....	VIII
Índice de Tablas.	IX
Índice de Figuras.....	X
Abstract.....	XV
Key Words.....	XV
Introducción.	1
Planteamiento del problema.....	3
Los sistemas constructivos en climas cálido-secos (caso de Hermosillo, Sonora).	3
Impacto de la industria de la construcción en el medio ambiente.....	9
Conclusión del planteamiento del problema.	11
Justificación.	12
Hipótesis.	14
Objetivos.....	14
Objetivo general.	14
Objetivos específicos.....	14
Marco teórico.	16
La bioconstrucción y el uso de tierra como material alternativo.	16
Sistemas mixtos de tierra.....	19
Innovación en la materialidad de los sistemas mixtos de tierra.	21
Impacto ambiental de la construcción con tierra.	22
Los sistemas de construcción prefabricados.	28



Los sistemas prefabricados y la sustentabilidad.	30
El diseño paramétrico y los sistemas prefabricados de construcción en tierra cruda.	32
Diseño paramétrico y sustentabilidad.	32
Sistemas paramétricos y los sistemas constructivos prefabricados de tierra.	35
Aplicación de parametrización y procesos biomiméticos.	39
Diagrama voronoi.	39
Biomimetismo - ramificación opuesta.	42
Estado del Arte.	45
Casos de estudios de sistemas de construcción prefabricados con tierra.	45
Panel prefabricado de tierra vertida con fibras vegetales. Amàco.	45
Hanok. Sistema de construcción modular.	48
Sistemas mixtos prefabricados – Quincha prefabricada.	54
Normatividad aplicable.	58
Ámbito urbano – legal.	58
Plan de Desarrollo Metropolitano de Hermosillo.	58
Reglamento de Construcción para el Municipio de Hermosillo.	59
Código de Edificación de Vivienda.	60
Uso de Materiales.	60
Norma E.080. Diseño y construcción con tierra reforzada.	60
Norma andina para diseño y construcción en bahareque encementado.	62
Desempeño Higrotérmico.	63
NOM- 020- ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones. Envoltorio de edificios para uso habitacional.	63
Sustentabilidad y Durabilidad.	64
NXM-AA-164-SCFI-2013. Edificación Sustentable y Requerimientos Ambientales Mínimos.	64



NMX C-228-ONNCE-2010. Industria de la Construcción - Materiales Termoislantes- Determinación de la Adsorción de Humedad y Absorción de Agua	65
ISO 7892. Elementos constructivos verticales — Ensayos de resistencia al impacto — Cuerpos de impacto y procedimientos generales de ensayo.....	66
Conclusión normativa.	67
Evaluación de los sistemas constructivos. Indicadores de evaluación de sustentabilidad.....	69
Indicadores Ambientales.....	69
Indicadores Tecnológicos.	70
Indicadores sociales y de sustentabilidad.	71
Metodología.	73
Fase 01: Empatía (<i>Design Thinking</i>).....	76
Fase 02: Definición (<i>Design Thinking</i>).	77
Fase 03: Fase de ideación y generación de opciones paramétricas (<i>Design Thinking</i> + Prototipado Rápido).	77
Definición de módulo.	78
Estudio de entramado.	78
Traducción del modelo digital al sistema constructivo.	82
Selección de materiales del sistema.....	82
Fase 04: Prototipado físico inicial (Prototipado rápido).	83
Pruebas preliminares. (granulometría y límites de Atterberg).....	83
Desarrollo de Prototipos	89
Fase 05: Validación del prototipo mediante pruebas y ensayos experimentales.	94
Capacidad Térmica (Prueba de Soplete):	94
Durabilidad:	96
Resultados.	101
Fase 01: Empatía (<i>Design Thinking</i>).....	101



Experiencia con sistemas prefabricados:	101
Factores que tomar en cuenta (Durabilidad):	103
Operatividad de los sistemas (incluyendo mano de obra):	106
Percepción sobre el uso de tierra cruda en la construcción:	108
Fase 02: Definición (<i>Design Thinking</i>)	110
Fase 03: Ideación y generación de opciones paramétricas (<i>Design Thinking</i> + Prototipado Rápido).	112
Definición del Módulo.....	112
Estudio de entramado.	113
Traducción del modelo digital al sistema constructivo.	140
Fase 04: Prototipado físico inicial (Prototipado Rápido).	160
Pruebas preliminares (Granulometría y Límites de Atterberg).....	160
Cartas de plasticidad (Límites de Atterberg).	169
Desarrollo de prototipos de baja fidelidad.....	174
Fase 05: Validación del prototipo mediante pruebas y ensayos experimentales.	178
Capacidad Térmica (prueba de soplete).	178
Pruebas de Impacto.....	185
Prueba de Karsten.	196
Conclusiones y futuras líneas de investigación.	202
Respuesta a preguntas de investigación	202
¿Es posible integrar la tierra cruda en un sistema prefabricado moderno que responda al contexto constructivo de Hermosillo?	203
¿Qué configuración geométrica y material ofrece el mejor desempeño estructural en el panel?	203
¿Cuál es la capacidad higrotérmica y de durabilidad del sistema ante las condiciones del clima cálido-seco?	203



Logros y descripción de los objetivos planteados.....	204
Comprobación de la hipótesis formulada.....	206
Contraste entre los fundamentos teóricos y los resultados de la investigación.....	207
Limitaciones y condiciones específicas que obstaculizaron la investigación.....	208
Conclusiones adicionales no previstas en los objetivos iniciales.....	209
Aspectos no resueltos en la investigación.....	211
Sistema de anclaje y conexión entre módulos y estructura portante.....	211
Comportamiento del sistema bajo ciclos húmedo-seco prolongados.....	211
Resistencia térmica en régimen permanente.....	211
Compatibilidad del sistema con estructuras portantes convencionales.....	212
Escalado del proceso de fabricación.....	212
Impacto del consumo energético activo en la operación del edificio.....	212
Aceptación social y viabilidad económica.....	212
Futuras líneas de investigación.....	212
Validación in situ en Hermosillo, Sonora.....	213
Caracterización normativa del desempeño energético.....	213
Desarrollo del sistema de anclaje y conexión.....	213
Optimización del proceso de fabricación hacia la industrialización.....	213
Análisis del ciclo de vida (cradle to grave) y simulación energética dinámica.....	214
Exploración de fibras vegetales regionales y estabilizantes alternativos.....	214
Propuesta normativa para sistemas constructivos prefabricados de tierra en México.....	214
Reflexión final.....	215
Bibliografía.....	217
Anexos.....	227



Resumen.

La industria de la construcción representa una de las principales fuentes de impacto ambiental global. En Hermosillo, Sonora, región con clima cálido-seco y temperaturas de entre 8°C y 40°C, predominan envoltentes de concreto y acero con resistencia térmica insuficiente frente a los requerimientos normativos, generando dependencia de sistemas activos de climatización. Ante esta dualidad de inadecuación higrotérmica e impacto ambiental elevado, esta investigación propone un sistema de panel prefabricado tipo sándwich con estructura mixta de tierra cruda y fibras vegetales, optimizado mediante diseño paramétrico y principios biomiméticos. La metodología integró *Design Thinking* y Prototipado Rápido en cinco fases. Se aplicó una encuesta estructurada a profesionales de la construcción para identificar criterios operativos, cuyos datos se triangularon con el marco teórico y normativo. Mediante *Rhino 7* con *Grasshopper* se desarrollaron dos geometrías de entramado como voronoi simplificado y ramificación opuesta, validadas estructuralmente en MATLAB. Se fabricaron ocho prototipos a escala 1:2, configurados a partir de dos tipos de núcleo, poliestireno expandido (EPS) y paja de trigocristalino, y dos condiciones de refuerzo (con y sin malla pollera hexagonal), empleando tierra clasificada como arena arcillosa procedente de Hermosillo. La validación experimental incluyó prueba de soplete, prueba de impacto por caída libre (de 10.90–174.44 J) y prueba de *Karsten* con y sin mucílago de nopal como hidrofugante. La configuración de Ramificación Opuesta con malla pollera presentó el mayor desempeño estructural, con una rigidez flexional 125% superior a la variante sin refuerzo. La prueba de soplete demostró que la contracara se mantuvo a temperatura ambiente aun cuando la superficie expuesta superó los 100 °C. Los paneles con núcleo de EPS permanecieron íntegros hasta 43 J, y el mucílago de nopal redujo la absorción superficial hasta en un 56%. Los resultados confirman la viabilidad técnica del sistema para climas áridos, aunque su consolidación requiere validación in situ, caracterización normativa en régimen permanente y el desarrollo de un marco regulatorio nacional para sistemas prefabricados de tierra cruda.

Palabras Clave.

Prefabricación, Tierra Cruda, Sustentabilidad, Diseño Paramétrico.



Índice de Tablas.

Tabla 1 Sistemas constructivos de muros-techo del Estado de Sonora.....	5
Tabla 2 Comparación de conductividad térmica (K) de materiales envolventes.	12
Tabla 3 Resultados de simulación térmica en ECOTEC.....	25
Tabla 4 Resultados comparativos de monitoreo de temperatura y humedad relativa.	26
Tabla 5. Posibilidades de aplicación de diagramas voronoi en arquitectura, diseño y planeación urbanos.....	42
Tabla 6 Indicadores de Sustentabilidad que aplican a la propuesta proyectual.	69
Tabla 7. Corridas experimentales. Para la generación de prototipos.	93
Tabla 8 Matriz de cargas ensayadas en prueba de impacto.....	97
Tabla 9. Organización de información a partir de la encuesta realizada en Fase 01 y la triangulación con fuentes bibliográficas.	111
Tabla 10 Modulaciones Base Voronoi. Estudio de Iteraciones.	114
Tabla 11 Simplificación de entramados voronoi.	115
Tabla 12 Estudio de iteraciones en modulaciones de ramificación opuesta.	122
Tabla 13 Interpretación de los valores mostrados en la Rigidez Flexional D.	126
Tabla 14 Interpretación de los valores mostrados en el gráfico de tensión de compresión en el carrizo.	130
Tabla 15 Interpretación de carga crítica de pandeo.....	134
Tabla 16. Comparativa cualitativa de cada una de las muestras analizadas en el proceso de estudios de laboratorio.	168
Tabla 17 Resultados procesados de prueba de soplete.....	179
Tabla 18 Tabla de muestras tomadas para ejecución de la prueba de impacto.	186
Tabla 19 Resultado de prueba de impacto en PV-I	186
Tabla 20. Resultado de prueba de impacto en PV-II	187
Tabla 21 Resultado de prueba de impacto en PV-III.....	188
Tabla 22 Resultado de prueba de impacto en PV-IV.....	189
Tabla 23 Resultado de prueba de impacto en PV-V	190
Tabla 24 Resultado de prueba de impacto en PV-VI	191
Tabla 25 Resultado de prueba de impacto en PV-VII	192
Tabla 26 Resultado de prueba de impacto en PV-VIII.....	193



Tabla 27 Clasificación de superficie a partir de la cantidad de ml absorbidos.	196
Tabla 28 Registro de absorción sin hidrofugante.	197
Tabla 29 Registro de absorción con hidrofugante.	199

Índice de Figuras.

Figura 1 Resultados georreferenciados de Resistencia Térmica (R) y Coef. Global de Transferencia de Calor (U) en techos.	6
Figura 2 Resultados georreferenciados de Resistencia Térmica (R) y Coef. Global de Transferencia de Calor (U) en muros.	7
Figura 3 Valores "R" para techos y muros a partir de normas de referencia térmica.	8
Figura 4 Condiciones de temperaturas promedio anuales de la ciudad de Hermosillo, Sonora. ...	9
Figura 5 Ejemplos de aplicación de bioconstrucción.	16
Figura 6. Ejemplo de Arq. Vernácula del desierto. Aplicación de muros de adobe, pórtico/pasillo de acceso y techo terrado.	18
Figura 7. Arquitectura de tierra aplicada bajo esquemas de diseño actuales.	18
Figura 8 Rueda de las técnicas de tierra.	19
Figura 9 Composición de estructura de sistema mixto de tierra.	20
Figura 10. Ejemplo de sistema modular prefabricado	29
Figura 11. Ejemplo de Sistema de Paneles Compuestos.	29
Figura 12. Ejemplo de Sistema Híbrido.	30
Figura 13 <i>Análisis de impacto ambiental de los sistemas constructivos prefabricados.</i>	31
Figura 14. Diagrama de flujo de optimización de diseño en fase de ideación/diseño.	34
Figura 15. Ejemplos de técnicas de fabricación digital 3D; de izquierda a derecha: fabricación, aditiva, formativa y de ensamble.	36
Figura 16. TerraPerforma- Sistema modular desarrollado a partir de 3DP en arcilla.	37
Figura 17. Detalle de módulos para armado.	38
Figura 18. Impresión de prototipo modular de arcilla.	38
Figura 19 Ejemplos del diagrama voronoi en la naturaleza en el ala de libélula (izquierda) y concha de erizo de mar (derecha).	40
Figura 20 Reglas para la generación de divisiones Voronoi	40
Figura 21 Ejemplo de código Voronoi utilizando Grasshopper.	41



Figura 22 Mezquite y Palo Verde	43
Figura 23 Disposición de hojas tipo opuesta.	43
Figura 24. Muestras de mezclas de tierra para elaboración de paneles prefabricados.	46
Figura 25. Estructura interna de panel de tierra vertida.....	47
Figura 26. Colado de tierra vertida en encofrado para armado de panel.	47
Figura 27. Instalación de panel de tierra vertida.....	48
Figura 28 Sistema tradicional Hanok.....	49
Figura 29 Modulación Kan.	50
Figura 30 Proceso constructivo de Hanok.	51
Figura 31 Montaje de módulos de paneles en sistema Hanok.	52
Figura 32 Aplicación de aplanado grueso sobre paneles de la envolvente.	52
Figura 33 Colocación de malla de refuerzo en panel.....	53
Figura 34 Sistema de unión entre quinchá prefabricada y estructura.	55
Figura 35 Panel prefabricado de quinchá	55
Figura 36 Montaje de sistema estructural de paneles a la estructura de la vivienda.	56
Figura 37 Proceso de "Enquinchado" y "Embarre"	57
Figura 38 Proceso de aplicación de Design Thinking.	74
Figura 39. Diagrama base del proceso de diseño.....	79
Figura 40. Muestra base para prueba granulométrica.....	84
Figura 41 Proceso de lavado para la limpieza de finos.....	85
Figura 42 Proceso de secado de muestra.	86
Figura 43 Mallas granulométricas.	86
Figura 44. Copa casagrande para pruebas de límites plásticos y líquidos.	87
Figura 45 Copa casa grande con preparación para prueba.	88
Figura 46. Análisis de límites plástico, líquido y de contracción.	88
Figura 47 Materiales para ejecución de prueba ígnea.....	95
Figura 48 Equipo empleado para la aplicación de prueba de impacto.	96
Figura 49 Colocación de tubo de Karsten en panel colocado en vertical.	99
Figura 50 Aplicación de hidrofugante (mucílago de nopal) sobre el panel.	100
Figura 51. Resultado de P-05: ¿Con qué tipo de sistemas de paneles prefabricados ha trabajado? (Seleccione todas las que apliquen)	102



Figura 52. Resultado de P-06: ¿Cuáles considera que son las principales ventajas de los paneles prefabricados? (Seleccione hasta 3 opciones).....	103
Figura 53 Resultado de P-07: ¿Qué tan importante considera la resistencia a la intemperie en un sistema de muros prefabricados? (1= Nada importante, 5= Muy importante) Promedio Actual 4.88	104
Figura 54 Resultado de P-08: En su experiencia, ¿cuáles son los principales factores que afectan la durabilidad de un muro prefabricado? (Seleccione hasta 3 opciones).....	105
Figura 55 Respuesta de P-10: ¿Qué tipo de mano de obra considera más adecuada para la instalación de un sistema de paneles prefabricados?	106
Figura 56. Respuesta de P-13: ¿Cuál considera que es el tamaño ideal de un panel prefabricado para facilitar su instalación?.....	107
Figura 57. Respuesta a P-14: ¿Cómo evaluaría la facilidad de instalación de los paneles prefabricados en comparación con los sistemas tradicionales? (1 = Mucho más difícil, 5 = Mucho más fácil).....	108
Figura 58. Respuesta a P-16: ¿Qué barreras cree que podrían dificultar la adopción de estos paneles en el mercado? (Seleccione las más relevantes)	109
Figura 59 Definición del módulo a poner en práctica para el desarrollo del prototipo.	113
Figura 60 Entramados para sistemas mixtos de tierra. Aplicación al proceso de simplificación de Voronoi.....	117
Figura 61 Generación de puntos base de la geometría.	118
Figura 62 Filtrado y organización de los puntos base.	118
Figura 63 Armado del panel simplificado de base Voronoi.	119
Figura 64 Dimensionamiento de módulo real y módulo de prototipo. Aplicación de entramado base voronoi.	120
Figura 65 Modelo generado a partir de la simplificación de la geometría tipo voronoi.....	120
Figura 66 Estudio de estructuras de ramificaciones.	121
Figura 67 Codificación corregida para redistribución de nodos en entramado de ramificación opuesta.	123
Figura 68 Dimensionamiento de módulo real y módulo de prototipo. Aplicación de entramado de ramificación opuesta.	124
Figura 69 Vista isométrica de capas de panel.	124



Figura 70. Rigidez Flexional. Análisis del modelo matemático.	126
Figura 71 Deflexión máxima lateral. Análisis del modelo matemático.	128
Figura 72 Tensión de compresión en carrizo. Análisis del modelo matemático.	130
Figura 73 Tensión de tracción en la Tierra. Análisis del modelo matemático.	132
Figura 74 Carga crítica de pandeo. Análisis del modelo matemático.	133
Figura 75 Frecuencia propia fundamental. Análisis del modelo matemático.	135
Figura 76 Ancho de grieta por retracción. Análisis del modelo matemático.	136
Figura 77 Factores de Seguridad. Análisis del modelo matemático.	138
Figura 78 Composición PV-I	141
Figura 79 Composición PV-II.....	141
Figura 80 Composición PV-III.....	142
Figura 81 Composición PV-IV	142
Figura 82 Composición PV-V.....	143
Figura 83 Composición PV-VI	144
Figura 84 Composición PV-VII.....	144
Figura 85 Composición PV-VIII.....	145
Figura 86 Dimensionamiento de Marco guía de panel.	149
Figura 87 Dimensionamiento del núcleo.	149
Figura 88 Dimensionamiento y despiece del entramado de Ramificación Opuesta (Vista en alzado y planta).	150
Figura 89 Dimensionamiento y despiece del entramado de Voronoi Simplificado (Vista en alzado y planta).	151
Figura 90 Dimensionamiento de mezcla embebida en entramado.	152
Figura 91 Dimensionamiento de área de aplicación del acabado transpirable.	152
Figura 92 Dimensionamiento de aplicación de malla de refuerzo.....	153
Figura 93 Detalles de posibles anclajes.	154
Figura 94 Marcos base para construcción de entramados a base de estacas de carrizo.	155
Figura 95 Unión de nodos con cuerda de henequén.	155
Figura 96 Entramados colocados en núcleos de EPS con textil como unión.	156
Figura 97 Elaboración de núcleo de paja.....	157
Figura 98 Aplicación de mezcla a módulo.....	158



Figura 99. Composición granulométrica, límites de consistencia y masa volumétrica, humedad del material.....	160
Figura 100. Composición granulométrica, límites de consistencia y masa volumétrica, humedad del material. Muestra M-01.....	163
Figura 101. Composición granulométrica, límites de consistencia y masa volumétrica, humedad del material. Muestra M-02.....	165
Figura 102. Comparativa de curvas granulométricas de M-00, M-01 y M-02.....	167
Figura 103 Carta de Plasticidad M-00	170
Figura 104. Carta de Plasticidad M-01.	171
Figura 105. Carta de Plasticidad M-02.	172
Figura 106 Prototipos de paneles.....	174
Figura 107 Ejemplo de panel con mezcla y aplanado de contención.	175
Figura 108 Paneles PV-I a PV-IV	176
Figura 109 Paneles PV-V a PV-VIII	176
Figura 110 Proceso de aplicación de la prueba de soplete. Con exposición directa de flama en área puntual.....	178
Figura 111 Zonas afectadas tras exposición a flama directa durante el ensayo. Núcleo EPS. .	183
Figura 112 Zonas afectadas tras exposición a flama directa durante el ensayo. Núcleo Paja ..	184
Figura 113 Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (derecha) en PV-I.....	187
Figura 114 Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (derecha) en PV-II.....	188
Figura 115 Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (derecha) en PV-III	189
Figura 116 Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (derecha) en PV-IV	190
Figura 117 Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (centro y derecha) en PV-V	191
Figura 118 Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (centro y derecha) en PV-VI	192
Figura 119 Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (centro y derecha) en PV-VII.....	193
Figura 120 Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (centro y derecha) en PV-VIII	194



Abstract.

The construction industry is one of the leading sources of global environmental impact. In Hermosillo, Sonora, a hot-dry region with temperatures ranging from 8 °C to 40 °C, building envelopes predominantly composed of concrete and steel exhibit thermal resistance values below normative requirements, generating structural dependence on active cooling systems. Faced with this dual challenge of hygrothermal inadequacy and elevated environmental impact, this research proposes a sandwich-type prefabricated panel system with a mixed structure of raw earth and plant fibers, optimized through parametric design tools and biomimetic principles. The methodology integrated Design Thinking and Rapid Prototyping across five phases. A structured survey was administered to local construction professionals to identify operational criteria, whose findings were triangulated with the theoretical and normative framework. Using Rhino 7 with Grasshopper, two lattice geometries were developed, simplified voronoi and opposite branching, and structurally validated in MATLAB. Eight prototypes at 1:2 scale were fabricated, configured from two core types, expanded polystyrene (EPS) and crystalline wheat straw, and two reinforcement conditions (with and without hexagonal wire mesh), using sandy clay soil sourced from Hermosillo. Experimental validation included a blowtorch test, a free-fall impact test (10.90 – 174.44 J), and a Karsten tube test with and without cactus mucilage as a natural water repellent. The Opposite Branching configuration with wire mesh demonstrated the highest structural performance, exhibiting flexural stiffness 125% greater than the unreinforced variant. The blowtorch test showed that the unexposed face remained at ambient temperature even when the exposed surface exceeded 100 °C. EPS-core panels remained structurally intact up to 43 J, and cactus mucilage reduced surface water absorption by up to 56%. The results confirm the technical viability of the system for arid climates, although full consolidation requires in-situ validation in Hermosillo, normative characterization under steady-state thermal conditions, and the development of a national regulatory framework for prefabricated raw earth construction systems.

Key Words.

Prefabrication, Loam, Sustainability, Parametric Design.



Introducción.

La industria de la construcción se ha consolidado como una de las principales fuentes de contaminación ambiental a nivel global. Debido a la naturaleza de sus procesos, este sector demanda un elevado consumo energético y genera residuos y emisiones que alteran significativamente el equilibrio ecosistémico (Kaur & Arora, 2012). En este contexto, es importante el replanteamiento de los procesos urbano-arquitectónicos para que promuevan edificaciones con menor cantidad de impactos medioambientales y que respondan al contexto regional de las edificaciones.

De acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el desarrollo del punto no. 11 “Ciudades y comunidades sostenibles” (ONU, 2018) prevé que, para el año 2030, cerca del 67% de la población viva en zonas urbanas, con esto la demanda de vivienda y centros de trabajo será una de las áreas de oportunidad más clara para la gestión de la sustentabilidad en la industria de la construcción (Zhang, 2020). Tan solo en México, se espera que ese año, la cantidad de viviendas oscile las 42.4 millones, lo que representa un gran reto para la gestión de recurso básicos y también para la construcción sustentable (INEGI, 2020).

Ante la inminente necesidad de la generación de espacios habitables y el reto en términos de recursos económicos y ambientales que esto representa, organismos nacionales e internacionales al cuidado de los recursos y servicios ecosistémicos, como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en México o el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), con la suma de gremios de arquitectos, ingenieros y expertos en la construcción alrededor del mundo han procurado incentivar el desarrollo de sistemas alternativos para la construcción.

El uso de materiales y sistemas alternativos, como la tierra cruda, surge entonces, como una estrategia viable desde una perspectiva ambiental y cultural (Gatti, 2012). Este tipo de materiales y sistemas han permitido la generación de espacios en zonas de confort en climas extremos, pues su correcto empleo permite el control de temperatura, humedad, aislamiento acústico, etc. sin mencionar el reducido impacto ambiental en su proceso comparado con materiales tradicionales (Zuleta Roa, 2011).

En la presente investigación, este material ha sido estudiado desde la gestión de una propuesta de elemento constructivo prefabricado tipo panel con estructura mixta, es decir, que



combine las propiedades de la tierra cruda con materiales fibrosos de origen natural, y al mismo tiempo con elementos constructivos altamente empleados en el contexto constructivo de regiones industrializadas.

La ciudad de Hermosillo, Sonora, al ser una región con un clima extremo (cálido-seco) y con un desarrollo industrial elevado, es un área ideal para los procesos de esta investigación, ya que permite hacer una relación más directa con las propiedades térmicas (ver **Figura 1** y **Figura 2**) y control de humedad que son necesarios para este tipo de clima, además de ser un campo donde se es posible analizar procesos constructivos prefabricados.

Para entender estos procesos, se emplea una metodología mixta (*design thinking* + prototipado rápido) basada en el diseño participativo, teórico y experimental. Esto permitió evaluar y ajustar las características de la propuesta de manera más ordenada y eficaz, apoyado por herramientas de diseño paramétrico. Este tipo de diseño es crucial para identificar características de modulación, dosificación de materiales y evaluaciones que permiten identificar áreas de oportunidad. Una vez establecidos los modelos ideales para su reproducción, se procedió a la ejecución de prototipos de baja fidelidad, los cuales fueron evaluados a través de ensayos para identificar características higrotérmicas y de durabilidad que puedan ser contrastadas con los sistemas actuales.

A través del análisis de los resultados obtenidos mediante la aplicación metodológica se concluye que el reto no radica únicamente en la selección de un material, sino en su integración con los sistemas constructivos contemporáneos (Astilludo Cordero & Vacacela Albuja, 2015). En este sentido, la presente investigación propone un modelo que integre la tradición vernácula, la innovación y la sustentabilidad como ejes rectores para el desarrollo de la propuesta. En base a estos, será posible atender líneas de mejora a la propuesta que permitan atender patologías propias del sistema desde una perspectiva integral.

El uso de sistemas constructivos de tierra en la actualidad suele ser cuestionado; este documento busca establecer las bases para futuras líneas de investigación que fomenten su documentación y socialización. El propósito es integrar estas iniciativas en los procesos constructivos contemporáneos para derribar prejuicios existentes y validar la tierra cruda como una alternativa técnica viable y competitiva.



Planteamiento del problema.

Si bien el propósito u objetivo de la presente investigación se abordará de manera puntual más adelante, este se fundamenta en el análisis de dos problemáticas críticas: la baja compatibilidad de los materiales empleados en el contexto climático de la región de Hermosillo, Sonora, y el consecuente impacto ambiental negativo de éstos, derivado de su ciclo de vida.

Esta desconexión entre material y entorno se ha agudizado con la proliferación de sistemas industrializados. Si bien estos procesos buscan la eficiencia productiva, el crecimiento acelerado de las manchas urbanas ha fomentado una explotación de recursos que se refleja en un impacto ambiental, económico y social. En consecuencia, la estandarización de estos materiales ha provocado el desplazamiento de recursos vernáculos que, históricamente, ofrecían niveles óptimos de confort higrotérmico con una huella ambiental significativamente menor (Cervantes Abarca & Ramírez Alférez, 2016).

Uno de los frutos más significativos de la industrialización de la construcción son los sistemas prefabricados. Pese al costo ambiental y energético, éstos, basados en concreto y acero, han consolidado un posicionamiento hegemónico en la edificación contemporánea. Su posicionamiento y predominancia en el mercado son atribuidos a las ventajas mecánicas como su alta resistencia a la compresión, durabilidad, resistencia al fuego además posee una gran versatilidad de aplicación en diferentes elementos constructivos (Fernández-Ordóñez & Fernández Gómez, 2009).

No obstante, es precisamente esta hegemonía la que permite plantear el reto de integración de los materiales alternativos, tales como la tierra cruda, en sistemas de prefabricación que logren equilibrar la eficiencia estructural con el desempeño higrotérmico necesario para la región de estudio.

Los sistemas constructivos en climas cálido-secos (caso de Hermosillo, Sonora).

Es posible relacionar cómo en diferentes zonas geográficas, se observan edificaciones con sistemas constructivos o materiales que no corresponden al contexto del proyecto, esto ocurre por diferentes razones: principalmente la falta de conocimiento sobre técnicas de aplicación de materiales locales, la falta de oferta en el mercado de este tipo de materiales e incluso la ausencia



de normativa reguladora que permita su aplicación, así como el desarrollo histórico de la arquitectura y la construcción en la región (Méndez Sáinz, 2000), la ciudad de Hermosillo, Sonora, ubicada al noroeste de México y objeto de estudio de la presente investigación no es una excepción a esta regla.

De acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda, realizado en 2020, por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el Estado de Sonora se cuenta con 876,333 viviendas particulares habitadas (INEGI, 2020); de estas, los materiales de construcción se encuentran diversificados de la siguiente forma:

- Pisos y Losas: 49.4% son a base de firmes de concreto.
- Muros: 92.5% son a base de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, concreto.
- Techos: 74.7% son a base de concreto armado o sistema de vigería pretensada con bovedilla.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el censo, es inmediatamente notorio que los materiales de la envolvente (muros y techos) mayormente empleados en el estado corresponden a derivados del acero y el concreto. Esto no es estrictamente negativo; sin embargo, es interesante identificar las características higrotérmicas de estos materiales y su aprovechamiento en el contexto regional de estudio.

Para ello, se puede hacer una interrelación entre la “Norma Oficial Mexicana de eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios de uso habitacional (NOM-020-ENER-2011)” la cual hace una evaluación a la envolvente de las edificaciones mediante el coeficiente global de transferencia de calor (Secretaría de Energía, 2011), también el “Código de Edificación de Vivienda” parte VI, cap. 27 (CONAVI, 2017), donde se presentan los valores de resistencia térmica para elementos envolventes para diversas ciudades de México y la “NMX-460-ONNCCE” (ONNCCE, 2009), resistencia térmica para la vivienda, con tres variantes, “R” mínima, para confort y ahorro de energía, en techos y muros (Morillón Gálvez & Reséndiz Pacheco, 2017).

Siguiendo esta metodología, Morillón y Reséndiz (2017) realizaron un análisis a nivel nacional sobre los sistemas constructivos de envolvente empleados en México, en el caso del estado de Sonora, los sistemas constructivos empleados mantenían una predominancia de los derivados del concreto y el acero (ver **Tabla 1**).



Tabla 1*Sistemas constructivos de muros-techo del Estado de Sonora.*

ESTADO	MUROS	TECHOS	No. viviendas	% de viviendas que lo usan	Total de viviendas estado
Sonora	Tabique, ladrillo, tabicón	Lámina de asbesto	14,929	2.24%	
Sonora	Adobe	Lámina metálica o plástico	15,280	2.29%	
Sonora	Madera	Lámina metálica o plástico	21,071	3.16%	
Sonora	Tabique, ladrillo, tabicón	Lámina metálica o plástico	72,743	10.89%	
Sonora	Tabique, ladrillo, tabicón	losa de concreto, tabique, ladrillo	451,537	67.63%	667,672

Nota: Tabla recuperada de “Materiales y sistemas constructivos utilizados en la vivienda” (Morillón Gálvez & Reséndiz Pacheco, 2017, p. 45). Se muestran los sistemas constructivos más empleados en el Estado de Sonora a partir del análisis metodológico empleado por los autores en 2010, el uso de tabique, ladrillo, tabicón en muros y losa de concreto, tabique, ladrillo siguen apareciendo como materiales mayormente empleados, de acuerdo con el último censo de INEGI (2020).

A partir de los resultados del análisis de Morillón y Reséndiz (2017), se realizó una regionalización de la resistencia térmica (R) y el coeficiente global de transferencia de calor (U) a partir de los sistemas constructivos empleados en techos siguiendo la metodología de la NOM-020-ENER-201, descrita en apartado “Materiales y sistemas constructivos utilizados en la vivienda” (2017, p. 24) (ver **Figura 1**) y muros (ver **Figura 2**) a nivel nacional. La interpretación de ambas georreferencias se desarrolla a continuación:



Figura 1

Resultados georreferenciados de Resistencia Térmica (R) y Coef. Global de Transferencia de Calor (U) en techos.



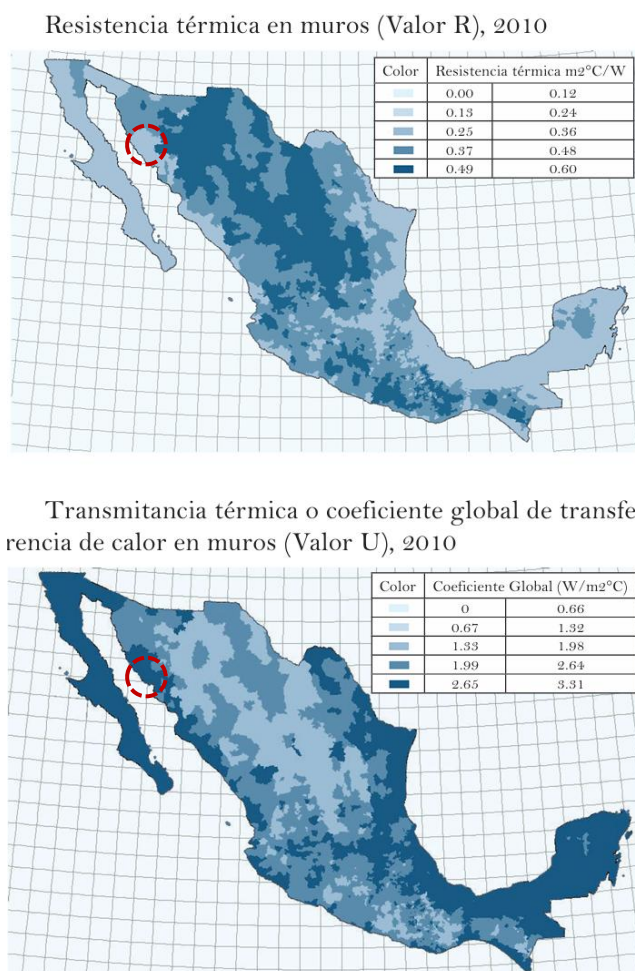
Nota: Figura recuperada de “Materiales y sistemas constructivos utilizados en la vivienda” (Morillón Gálvez & Reséndiz Pacheco, 2017, p. 82). El círculo rojo delimita el municipio de Hermosillo, Sonora.

De acuerdo con la georreferencia, se identifica que el valor “R” en techos, para el municipio de Hermosillo se encuentra en el rango de 0.33 a 0.40 m² °C/W, mientras que los valores “U” se encuentran entre 2.63 – 3.50 W/m² °C. De acuerdo con la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011), es posible interpretar que el valor “R” es considerado con un nivel de aislamiento bajo, permitiendo que las temperaturas exteriores penetren con mayor facilidad hacia el interior; en el caso del valor “U”, al ser un rango relativamente alto indica que la energía térmica que atraviesa el sistema del techo es bastante elevada. Estas consideraciones se toman en cuenta a partir de los valores de la norma aplicables para la región.



Figura 2

Resultados georreferenciados de Resistencia Térmica (R) y Coef. Global de Transferencia de Calor (U) en muros.



Nota: Figura recuperada de “Materiales y sistemas constructivos utilizados en la vivienda” (Morillón Gálvez & Reséndiz Pacheco, 2017, p. 81). El círculo rojo delimita el municipio de Hermosillo, Sonora.

En el caso de los coeficientes en los muros, el valor “R” se encuentra en el rango de 0.25 a 0.36 m² °C/W, mientras que los valores “U” se encuentran entre 2.65 y 3.31 W/m² °C. Siguiendo la lectura bajo la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011), se interpreta que mantiene las mismas condiciones que en el caso de los elementos del techo, es decir, un alto flujo de energía calorífica transitando por los elementos constructivos. Estas consideraciones se toman en cuenta a partir de los valores de la norma aplicables para la región.

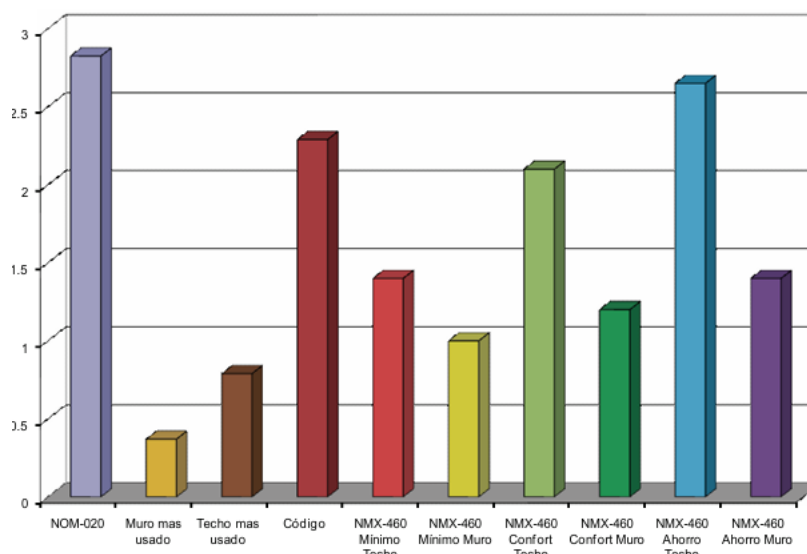
Ahora bien, una vez obtenidos este rango de valores “R” y “U” de la envolvente, es posible hacer un análisis con base en las normativas de referencia para la caracterización térmica de los materiales, a partir de la región climática y la ciudad (NOM-020-ENER 2011, Código de



Edificación de Vivienda y NMX-460-ONNCCE). Los valores de la **Figura 3** indican el rango “R” en techos y muros para climas cálidos secos.

Figura 3

Valores "R" para techos y muros a partir de normas de referencia térmica.



Nota: Figura adaptada a partir del gráfico de la ciudad de Mexicali (región comparable climatológicamente con Hermosillo) en “Materiales y sistemas constructivos utilizados en la vivienda” (Morillón Gálvez & Reséndiz Pacheco, 2017, p. 91). Se consideran como referencia los valores, al pertenecer al mismo sistema climático.

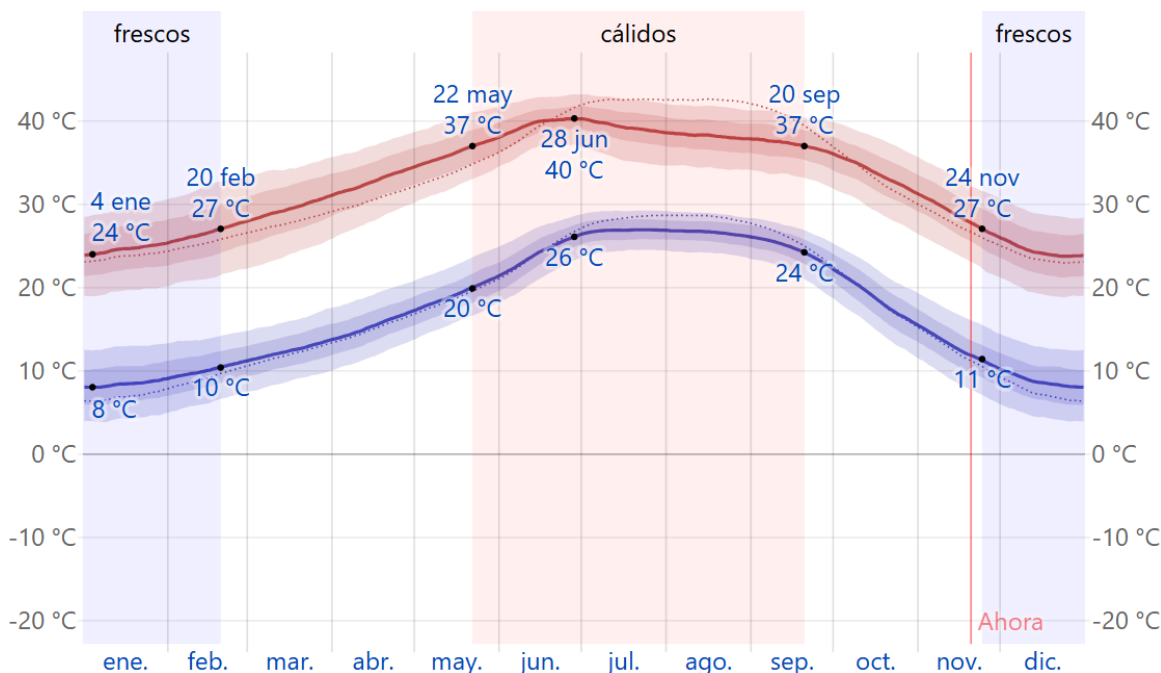
Al comparar los valores requeridos por las normas de referencia térmica analizadas en la figura anterior, con los rangos de valor “R” obtenidos a partir de la interpretación de las georreferencias, es inevitable identificar que los valores de los materiales mayormente empleados en la región publicados por INEGI (2020) (ver **Tabla 1**) se encuentran muy por debajo de los requisitos mínimos de las normas por sí solos, es decir, se requiere incrementar la capacidad aislante de los materiales y ser combinado con estrategias bioclimáticas y sistemas pasivos para llegar a los rangos de confort higrotérmico (Morillón Gálvez & Reséndiz Pacheco, 2017).

A partir de lo expuesto, se concluye que los materiales derivados del acero y el concreto no cubren por sí solos las necesidades higrotérmicas de las edificaciones en la región (Fernández, 1994). Lo anterior se debe a las condiciones climáticas extremas, donde las temperaturas máximas promedio alcanzan los 40 °C entre junio y agosto, mientras que las mínimas oscilan entre 8 °C y 10 °C durante enero (INEGI, 2020) (ver **Figura 4**).



Figura 4

Condiciones de temperaturas promedio anuales de la ciudad de Hermosillo, Sonora.



Nota: La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diario con las bandas de los percentiles 25° a 75°, y 10° a 90°. Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes. Obtenida de weatherspark, con valores recopilados de la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional General Ignacio L. Pesqueira García.

En consecuencia, la industria de la construcción en Sonora, específicamente en Hermosillo, enfrenta el desafío de desarrollar edificaciones que garanticen el confort térmico mediante estrategias pasivas (Molar-Orozco & Huelsz-Lesbros, 2017).

Actualmente, el predominio de materiales como el acero y el concreto ha desplazado a las técnicas tradicionales que, históricamente, ofrecen una mejor adaptación al entorno local y un menor impacto ambiental (Fernández A. , 1994). Por ello, resulta urgente replantear las estrategias de diseño en función del contexto climático y social, priorizando el uso de materiales locales y estratégicos junto a técnicas pasivas que reduzcan la dependencia energética y aseguren condiciones de habitabilidad adecuadas para la región.

Impacto de la industria de la construcción en el medio ambiente.

Tras el análisis de las envolventes analizado con anterioridad, es evidente que, bajo las características climáticas extremas de Hermosillo, estos materiales carecen de las propiedades adecuadas para llegar a los niveles de confort higrotérmico necesario para el usuario por sí solos,



debido a los bajos valores de resistencia y alta transmitancia térmica. Esto, deriva a una necesidad del replanteamiento del uso de estos materiales, y explorar configuraciones que permitan su adaptación a la región para un mayor aprovechamiento de estos.

Esta incapacidad de los materiales para actuar como barreras térmicas eficientes no solo afecta la habitabilidad, sino que establece el punto de partida de la segunda problemática analizada en la presente investigación: el elevado costo ambiental que yace en la cadena de producción de estos.

Bajo esta perspectiva, el impacto ambiental derivado del uso del acero y del concreto se vuelve un factor crítico, al considerarse como uno de los elementos más contaminantes de la industria constructiva. Para dimensionar esto, es importante comprender que: por cada tonelada de acero producida se generan 1.8 toneladas de CO₂ (Ortiz Domínguez, s. f.), mientras que la producción del concreto emite alrededor de 800-850 kg de CO₂ por cada tonelada de cemento producida, sumado a los 510 kg de CO₂ por cada tonelada de *clinker* (componente clave para la producción del cemento), los 23 kg de CO₂ equivalente por cada tonelada de agregado natural procesado a partir de arena de río y los 33 kg por tonelada procesada de piedra triturada para la fabricación del concreto (Buriticá et al., 2022), dando un total acumulado de 1.4 toneladas de emisiones CO₂ por cada tonelada de concreto producido.

De acuerdo con Cervantes y Ramírez Alférez (2016), el sector de la construcción en México representa anualmente una proporción significativa del consumo de recursos y generación de impactos ambientales, tal como:

- 17% del consumo total de energía.
- 5% del consumo total de agua.
- 25% del consumo total de electricidad.
- 20% de las emisiones de dióxido de carbono.
- 20% de los desechos generados.

El crecimiento del sector de la construcción ha jugado un papel crucial como motor dinamizador de la economía mexicana; sin embargo, ha producido también diversos efectos negativos de índole ambiental, social y en la competitividad de las ciudades. Con la creciente



urbanización, las edificaciones se han convertido en el elemento rector. Las tendencias de diseño, uso de materiales y métodos constructivos están incrementando el costo, la escasez de materiales y recursos naturales, provocando un sistema de presión sobre la calidad ambiental local y global (Cervantes Abarca & Ramírez Alférez, 2016).

Conclusión del planteamiento del problema.

Con base en el análisis planteado, es posible determinar que la problemática relacionada con el hábitat proyectada en contextos climatológicos extremos, como los de Hermosillo, Sonora, no reside exclusivamente en la naturaleza de los materiales industrializados. Es irresponsable determinar que un material es completamente idóneo o inapropiado; sin embargo, sí es posible afirmar que su implementación desvinculada de las condiciones climáticas y geográficas no permite un aprovechamiento óptimo de sus características.

El acero y el concreto, pilares de las edificaciones contemporáneas, poseen virtudes estructurales innegables (Fernández-Ordóñez & Fernández Gómez, 2009); no obstante, al ser utilizados como elementos predominantes en las envolventes, sin estrategias de aislamientos adicionales, su baja resistencia térmica (R) y elevada transmitancia (U) condenan a la edificación a una dependencia perpetua de sistemas de climatización artificial (Morillón Gálvez & Reséndiz Pacheco, 2017). Esta configuración operativa de los espacios invisibiliza un ciclo de ineficiencia donde la arquitectura deja de ser un refugio pasivo para convertirse en un consumidor de energía de alto costo.

La evidencia de que la producción de acero y concreto genera emisiones de CO₂ que superan con creces su propio peso unitario revela una paradoja técnica: se construye para proteger al ser humano de un clima exterior que el mismo proceso constructivo está ayudando a exacerbar mediante el calentamiento global (García Ochoa, Quito Rodríguez, & Perdomo Moreno, 2022).

Bajo este escenario de crisis energética y ambiental, se vuelve imperativo explorar alternativas que logren reconciliar la eficiencia constructiva con el equilibrio ecológico.



Justificación.

Tal como se mencionó en el planteamiento del problema, la industria de la construcción en la actualidad vive una etapa donde los espacios habitables dejan de ser un refugio y pasan a convertirse en fuentes de consumo y gasto energético debido a una aplicación desvinculada de los materiales. Surge, por ende, una dualidad respecto a los materiales de las envolventes, donde la ineficiencia térmica ambiental y la degradación ambiental sistemática producida por su ciclo de vida obligan directa e indirectamente a replantear los procesos de la concepción material de la arquitectura donde se optimicen las edificaciones y se revalorice el origen de sus componentes.

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de transformar los paradigmas constructivos en regiones como Hermosillo, con condiciones climáticas que requieren una especial atención a los elementos que forman el refugio del hábitat.

Ante este escenario, el uso de sistemas constructivos basados en tierra cruda, como se plantea en este documento, representa una oportunidad relevante, tanto por su disponibilidad local como por sus propiedades higrotérmicas (ver **Tabla 2**) (Minke, 2005).

Tabla 2

Comparación de conductividad térmica (K) de materiales envolventes.

MATERIAL	Densidad	Conductividad λ
Adobe	1200 kg/m ³	0,46 W/mk
Tapial	1400-2000 kg/m ³	0,6/1,6 W/mk
Bloque de tierra comprimida (BTC)	1700 kg/m ³	0,81 W/mk
Hormigón armado	2300-2500 kg/m ³	2,3 W/mk
Hormigón en masa in situ	2000-2300 kg/m ³	1,65 W/mk
Pared de ladrillo macizo	2170 kg/m ³	1,04 W/mk
Pared de ladrillo hueco	670 kg/m ³	0,22 W/mk

Nota: Tabla recuperada de (Catalán Díez, 2017). Elaborada a partir de datos obtenidos de (Bestraten, Hormías, & Altemir, 2010). Se muestra la comparación de conductividad térmica entre materiales de envolventes convencionales (hormigón armado, en masa *in situ*, ladrillo macizo y ladrillo hueco) y a base de tierra cruda (adobe, tapial y BTC).



Desde una perspectiva socioambiental, el uso de materiales que se incorporen de manera más integral al contexto de la edificación es posible acortar la brecha de vulnerabilidad que se genera en base a esta problemática que tiende a producir una pobreza energética latente: la población se ve obligada a destinar gran parte de sus ingresos al pago de electricidad para alcanzar niveles de confort básicos (Gómez Lima, 2025).

Por otra parte, esta investigación se posiciona en la intersección de tres campos de estudio que se abordan de manera integrada: la bioconstrucción, la prefabricación y la aplicación del diseño paramétrico (se definen de manera puntual en el marco teórico). La mayoría de los estudios sobre construcción con tierra tienden a centrarse en enfoques tradicionales o en mejoras de materiales (Gomez Patrocinio, 2021), y las investigaciones sobre diseño paramétrico se orientan principalmente a la exploración formal o estructural (Wieslaw Rokicki, 2016), existe un área de oportunidad significativa de cruzar estos campos en la exploración de aplicación del diseño paramétrico a la construcción con tierra cruda. El desarrollo de esta investigación aporta conocimiento al articular los procesos de diseño computacional con evaluación empírica del desempeño de la propuesta.

El factor innovador y diferenciador yace en la deconstrucción ideológica sobre el uso de tierra cruda y materiales naturales en los procesos constructivos contemporáneos a través de la tecnificación de este tipo de materiales mediante la prefabricación. Donde el enfoque paramétrico en el diseño de la propuesta no solo nace como un recurso formal, sino como un medio de exploración para la optimización material, estructural y eficiencia productiva de esta. De esta manera se contribuye a la construcción de un marco metodológico para futuras líneas de investigación que busquen este tipo de integraciones conceptuales y prácticas.

En conclusión, la justificación de esta investigación no solo radica en el uso de la tierra por su valor histórico constructivo, sino por su capacidad de convertir este material en una alternativa de bajo impacto ambiental, capaz de resolver la dualidad existente entre la necesidad de hábitat y el cuidado ambiental, atendiendo las patologías que implica usar este material, así como los que se emplean en los procesos convencionales.



Hipótesis.

La integración de herramientas de diseño paramétrico y principios biomiméticos en el desarrollo de un panel prefabricado a base de tierra cruda y fibras vegetales permite obtener un sistema constructivo viable para climas cálido-secos, con propiedades higrotérmicas y de durabilidad competitivas frente a los sistemas convencionales de cerramiento.

Objetivos

Objetivo general.

Generar una propuesta de elemento constructivo prefabricado tipo panel compuesto, estudiado desde un prototipo de baja fidelidad con procesos de validación parcial, basado en un sistema de estructura mixta que tome como base la tierra cruda y fibras vegetales como material principal, adecuado para climas cálidos-secos, aplicando sistemas de parametrización que permitan una optimización estructural y de material que responda a las características contextuales de la región de Hermosillo, Sonora.

Objetivos específicos.

1. Fundamentar el uso de tierra cruda y fibras vegetales mediante un análisis técnico y crítico de sus propiedades. Desmitificando prejuicios técnicos o culturales y validando estos recursos como materiales contemporáneos viables, estableciendo un marco teórico que justifique su integración en sistemas constructivos modernos frente a la crisis ambiental actual.
2. Desarrollar un sistema modular parametrizado que permita la estandarización y adaptabilidad del panel prefabricado. Enfocado en la optimización geométrica de la estructura base del panel, garantizando una producción eficiente y maximizando el aprovechamiento de los recursos materiales.
3. Determinar la capacidad higrotérmica y de durabilidad en un régimen transitorio, no permanente, de la propuesta en relación con las características contextuales de la ciudad de Hermosillo, Sonora.
4. Contrastar los resultados del diseño frente a los estándares constructivos actuales para validar la viabilidad técnica del panel. Esta síntesis permite discutir las ventajas del sistema



propuesto, posicionándolo como una alternativa competitiva y sustentable para la edificación en la región.



Marco teórico.

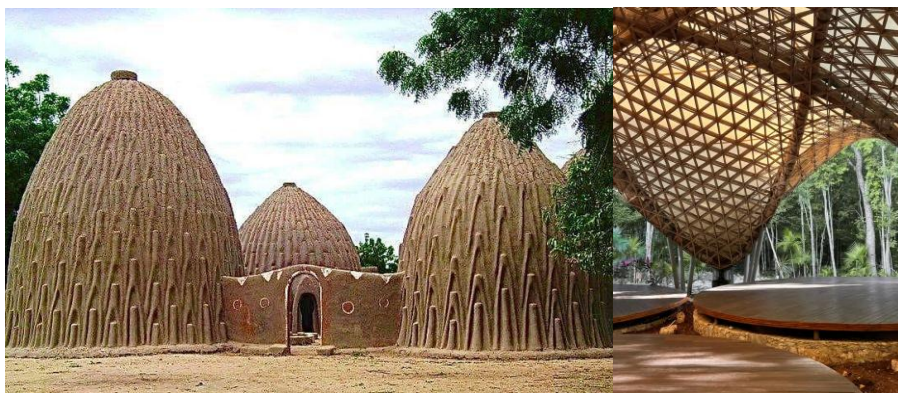
Antes de comenzar a definir la propuesta técnica, es fundamental definir algunos conceptos que sustentan esta investigación. Como se ha expuesto en la justificación, esta investigación resalta el cruce de tres líneas conceptuales: la bioconstrucción, la prefabricación y el diseño paramétrico. La integración de estas líneas permite no solo comprender el origen del proyecto sino también establecer las bases teóricas de la viabilidad de una propuesta constructiva que responda a las demandas de optimización y sostenibilidad actuales.

La bioconstrucción y el uso de tierra como material alternativo.

En primer lugar, es importante definir el concepto de bioconstrucción y su relación con el uso de la tierra cruda como material de construcción. Esta se entiende como los “sistemas constructivos basados en materiales de bajo impacto ambiental, de origen natural” (Pimentel, 2025, p. 21), estos materiales son conocidos como “biomateriales” y son aquellos que pueden ser obtenidos de manera directa en el sitio de edificación o con el mínimo proceso de transformación cerca a este, algunos ejemplos de estos materiales son: la tierra arcillosa, la madera, fibras vegetales (paja, zacatón, etc.), el bambú, entre otros. El origen de la bioconstrucción no tiene un lugar de origen específico, nace a partir de la necesidad de habitar en diferentes culturas y rincones del globo (ver **Figura 5**).

Figura 5

Ejemplos de aplicación de bioconstrucción.



Nota: A la izquierda, acceso a una casa obus en Pouss, Camerún, mostrando una técnica de tierra conocida como COB, a la derecha se muestra la aplicación de bambú en una obra contemporánea llamada “El Átomo”, ubicada en Kaybé, Tulum desarrollada por ArquitecturaMixta ©



De acuerdo con Nico Pimentel (2025), el gran principio de la bioconstrucción es la observación, pero ¿qué se debe observar? La respuesta radica en el entorno, es decir, los recorridos solares, el viento, el agua (yacimientos o precipitaciones), la vegetación existente, las características topográficas y la cultura local. Ya sea que se realice de manera directa o por medio de análisis indirectos que brinden la información necesaria para integrar todas las variables posibles al proceso de diseño. Consecuente con la observación y el análisis integral del entorno, es posible determinar las técnicas o sistemas de bioconstrucción que son más adecuados para implementar.

Bajo esta premisa, el uso de la tierra cruda se identifica como una respuesta coherente a las condiciones climáticas de Hermosillo, Sonora. Sin embargo, la transición hacia este material requiere resolver interrogantes técnicas que surgen de manera natural, al tratarse de un material fuera de los convencionales aplicados en la región y desconocido del tema; particularmente, sobre la selección de la técnica más apta para el clima cálido-seco, la fiabilidad del material frente a las patologías y su incorporación a los procesos actuales de construcción que se emplean. Responder a estas cuestiones no solo valida la viabilidad de la propuesta de esta investigación, sino que permite establecer criterios de estabilización y diseño necesarios para garantizar su óptimo desempeño y a su vez desmentir los prejuicios hacia este tipo de materiales.

Las evidencias de la fiabilidad del uso de la tierra cruda se encuentran todavía de pie. Lo importante es entender apropiadamente el material y diseñar apropiadamente, siempre vinculando los factores esenciales de entender y observar el contexto (Pimentel, 2025)

La construcción con tierra en Sonora y el norte de México, nace como una adaptación de los elementos arquitectónicos que trajeron consigo los grupos colonizadores y evangelistas, en combinación con la cultura constructiva de los pueblos endémicos y sus criterios para mitigar el clima extremo en sus espacios habitables, dando como resultado sistemas constructivos eficientes que permitieron una habitabilidad más amena en el desierto (ver **Figura 6**) (Peña Barrera & Chávez Ortiz, 2016) .

Algunas de estas características que adoptó la fusión cultural fueron (Peña Barrera & Chávez Ortiz, 2016, pp. 60-61):

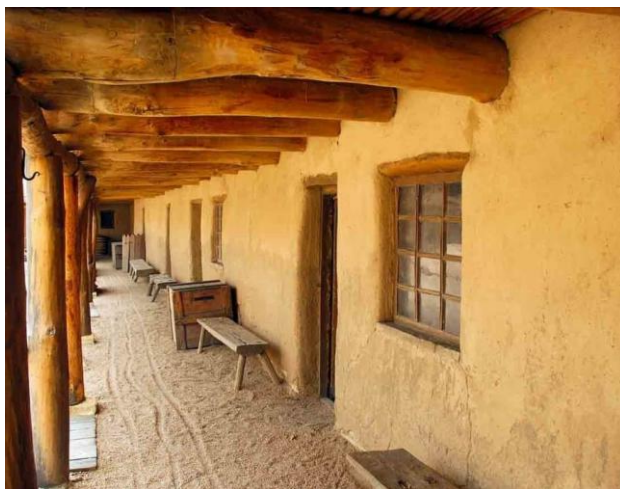
- Muros de adobe secados al sol.



- Techos de terrado sostenidos con viguería de troncos o tabletas de madera.
- Pretilos elevados para proveer de sombra.
- El zaguán cuya función climática es proporcionar un área de mitigación ante el clima extremo que circula del exterior al interior

Figura 6.

Ejemplo de Arq. Vernácula del desierto. Aplicación de muros de adobe, pórtico/pasillo de acceso y techo terrado.



Nota: Sitio histórico nacional: Bent's Old Fort en Colorado, EE. UU.

La arquitectura del desierto entonces responde a la condición de definir ante la escasez, los recursos más adecuados para edificar el espacio (ver **Figura 7**) (Peña Barrera, 2018) .

Figura 7.

Arquitectura de tierra aplicada bajo esquemas de diseño actuales.

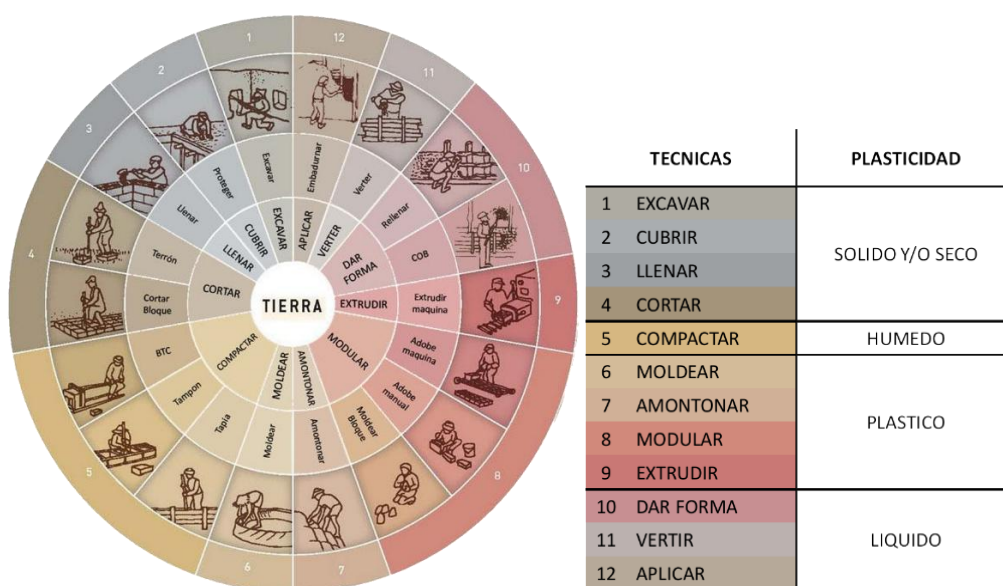


Nota: (izquierda) Casa Rosales, proyecto realizado por Israel Espin Arquitectos, fotografía de Francisco Mosqueda; (derecha) Entre Pinos, proyecto realizado por Taller Héctor Barroso, fotografía de Rory Gardiner.



La tierra es “el material de construcción natural más importante y abundante en la mayoría de las regiones del mundo” (Gatti, 2012, p. 6). Se han podido desarrollar diferentes técnicas y experimentaciones de manera que la prefabricación industrial y normativa de calidad de los materiales realizados a base de tierra cruda se encuentran a la par de los materiales tradicionales que se aplican en la construcción actual (Gatti, 2012). Este material cuenta con una gran variedad de características, que permiten, como mencionó Ordóñez (2013), una gran adaptabilidad para diferentes sistemas constructivos, esto gracias a su plasticidad, cohesibilidad y su compactibilidad (ver **Figura 8**)

Figura 8
Rueda de las técnicas de tierra.



Nota: Gráfico recuperado de (Arquitectura y Construcción en Tierra. Estudio Comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra., 2012) Se muestran los sistemas de construcción con tierra cruda más comunes clasificados de acuerdo con la técnica y el nivel de plasticidad.

Sistemas mixtos de tierra.

Los Sistemas Mixtos Tradicionales son un ejemplo de esto, los cuales han podido adaptarse a procesos de prefabricación y estandarización. Este tipo de sistemas abarcan técnicas en las que se combinan la tierra con elementos como madera, bambú, paja, fibras e incluso acero en zonas no maderables, para obtener estructuras de alta calidad (Zazu Vives, 2021).

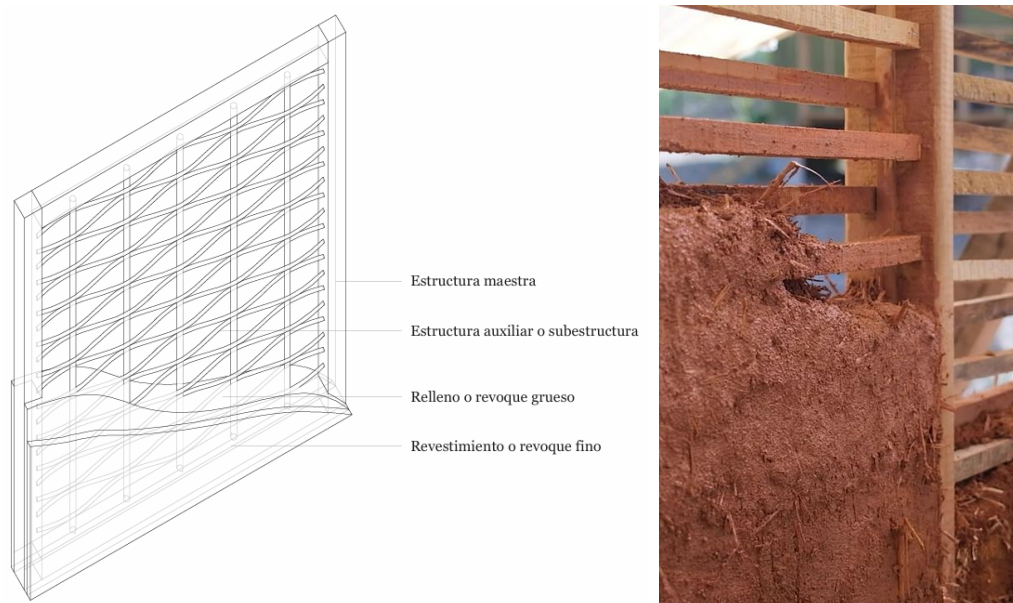
De acuerdo con Gómez Patrocinio - et. al (2021), los sistemas mixtos se distinguen entre muros entramados y muros tejidos, siendo los primeros aquellos que necesitan ser rellenados a



través de un sistema de mampostería y los segundos el resultado de un entramado vegetal y tierra que se emplea a modo de relleno o revoque (empastado). Esta técnica, como muchas otras derivadas de la construcción con tierra, tiene variantes alrededor del mundo y puede ser conocida como “bahareque, quinchá, *taipa de mão*” entre otros nombres, sin embargo, su composición es básicamente la misma, es decir, está conformada por una estructura maestra, una auxiliar, un relleno y un revestimiento, tal como se muestra en la **Figura 9**

Figura 9

Composición de estructura de sistema mixto de tierra.



Nota: Gráfico recuperado de (Zazu Vives, 2021, p. 14) y TierraAmigo ®. A la izquierda se muestra la composición estructural del sistema y a la derecha se aprecia un proceso donde se arma el módulo.

La ventaja del empleo de este tipo de sistemas, si bien tiene un cierto nivel de complejidad, no representa una curva de aprendizaje muy elevada, en comparación con otros sistemas convencionales. (Carazas & Rivero, 2002).

Los procesos de instalación y versatilidad de empleo que tiene ante diferentes situaciones contextuales, es decir, puede ser empleado en climas variados y diferentes altitudes, siempre y cuando se cumplan con los requisitos granulométricos de la tierra o esta sea caracterizada adecuadamente abren la posibilidad de iteraciones que se orienten hacia su prefabricación (Astillado Cordero & Vacacela Albuja, 2015). En contextos urbanos actuales, puede ser empleado en edificaciones verticales debido a su adaptable modulación y sinergia con otro tipo de sistemas constructivos (Zazu Vives, 2021).



Los sistemas mixtos de tierra se han convertido en un campo de la experimentación hacia la prefabricación, debido a las ventajas de modulación que tiene comparada con otros sistemas de tierra cruda (Vacacela, 2015). Además, ha presentado ventajas como poseer un menor peso, menor sección, tener un comportamiento apto ante sismos y la posibilidad de caracterización del tipo de tierra empleado y compatibilidad con elementos constructivos más convencionales; características, que en otros tipos de sistemas de tierra suelen ser un poco más complicados de alcanzar (Astilludo Cordero & Vacacela Albuja, 2015)

Gradualmente la tierra, como material constructivo ha respondido a la necesidad de reinventarse para su integración a las necesidades constructivas actuales (Alzate & Osorio, 2014). Esta tecnificación del material y la aparición de profesionistas enfocados a este tipo de sistemas han permitido que poco a poco el estigma ideológico en contra de este material permee dentro de las comunidades de la construcción.

En la presente investigación, por lo anterior descrito, se toma como la base proyectual de esta investigación la exploración de la tierra cruda a través de sistemas mixtos, específicamente técnicas derivadas del bahareque. A diferencia de los sistemas de tierra masiva, cuya rigidez suele limitar la versatilidad formal, los sistemas mixtos ofrecen una elevada capacidad de modulación y compatibilidad estructural con materiales y marcos técnicos contemporáneos (Vacacela, 2015). Esta hibridación permite que la tierra deje de percibirse como un material artesanal aislado para integrarse en procesos de prefabricación y estandarización de componentes.

Innovación en la materialidad de los sistemas mixtos de tierra.

En el desarrollo contemporáneo de sistemas constructivos sustentables, la innovación en la materialidad no se limita a la sustitución de materiales convencionales por alternativas naturales, sino que implica la reconfiguración de sistemas híbridos que articulan diferentes niveles de desempeño técnico, ambiental y constructivo (Architecture & Urban Research Institute, 2025).

La sinergia de la construcción híbrida y la prefabricación es un ejemplo palpable de eficiencia e innovación. Están conectadas bajo el objetivo compartido de mejorar la eficiencia, precisión y el impacto de la industria de la construcción en el medio ambiente. Pero sin duda, este tipo de mancuernas en la construcción eleva el nivel de complejidad de los proyectos, especialmente cuando se investiga la compatibilidad de diferentes materiales o técnicas, que



requiere de procesos de investigación, pruebas de materiales y la generación de prototipos para su análisis y comprensión de funcionamiento. A pesar de las complejidades involucradas, los métodos de construcción híbridos a menudo traen beneficios significativos que superan los desafíos (Zamora, 2024).

En este contexto, la presente investigación plantea un escenario comparativo entre configuraciones 100% naturales y configuraciones híbridas, con el objetivo de analizar cómo la incorporación de materiales convencionales puede modificar el comportamiento estructural, térmico y constructivo del sistema, como el poliestireno expandido (EPS) como núcleo y acero como refuerzo al panel.

Esta distinción introduce una diferencia conceptual relevante: mientras que los sistemas completamente naturales buscan maximizar la coherencia ecológica y la eficiencia del ciclo de vida del material, los sistemas híbridos priorizan la mejora del desempeño técnico mediante la incorporación estratégica de elementos que, aunque poseen un mayor impacto ambiental en su producción, pueden contribuir a optimizar el comportamiento global del sistema a lo largo de su ciclo de vida (Golubchikov & Badyina, 2012).

Bajo este marco, la incorporación de acero y EPS en la presente investigación no se plantea como una contradicción al enfoque sustentable, sino como una estrategia de exploración que permite evaluar hasta qué punto los sistemas híbridos pueden mejorar propiedades clave como, la resistencia mecánica, la estabilidad dimensional o el aislamiento térmico, sin comprometer de manera significativa los beneficios ambientales asociados al uso de la tierra (Miceli, 2015). En este sentido, se propone una reflexión más amplia sobre los límites y posibilidades de la innovación material en sistemas constructivos de bajo impacto.

Impacto ambiental de la construcción con tierra.

Como se menciona con anterioridad, la construcción, tal cual es conocida actualmente, es responsable de un alto consumo de recursos y energía para su ejecución, lo cual se traduce como un impacto directo en el medioambiente de manera directa o indirecta (Cervantes Abarca & Ramírez Alfárez, 2016).

Para evaluar el impacto ambiental que producen las construcciones, se aplica un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), el cual considera diferentes etapas de impacto desde la obtención de



materias primas, la manufacturación, transporte, uso y demolición (Cabrera, González, & Mingolla, 2021). La cuantificación del consumo energético, así como las emisiones de GEI permite comprender y comparar las diferentes alternativas constructivas que se están desarrollando (González Calderón, 2022), específicamente aquellas cuya base es la tierra cruda.

Es preciso reconocer que el uso de la tierra cruda y otros sistemas alternativos no constituye una neutralización total de los impactos negativos de la industria, ya que cualquier intervención humana en la biosfera genera, inherentemente, una alteración ecosistémica. No obstante, la implementación de estos sistemas permite minimizar dicha huella ambiental, posicionándose como una estrategia de mitigación que prioriza la regeneración frente a la explotación intensiva de los recursos (Aranda & Suárez, 2019).

Si bien, se conocen las propiedades positivas empíricas que convierte a este material en un elemento clave para el desarrollo de una arquitectura y edificación sustentable (Gatti, 2012), es importante cuestionarse, ¿cuál es realmente el impacto ambiental que tiene el uso de este material?

Para responder a estos cuestionamientos es importante comparar, no solo el ACV de materiales tradicionales en contra de los de base tierra, si no identificar la cuantificación de la energía consumida durante la fase de producción, la cual se denomina energía embebida o incorporada, así como sus características termo-físicas y mecánicas para que surja un punto de comparación con los sistemas convencionales y permita interpretar su lugar en la dualidad de la problemática planteada al inicio de la investigación.

Autores como González Calderón (2022) de la Universidad Autónoma de Coahuila, y un grupo de investigación encabezado por Santiago Cabrera (2021) de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, realizaron un estudio, donde, a partir de métodos comparativos analizaron el consumo energético entre materiales tradicionales y en base tierra, lo cual mostró la siguiente información:

Valores de energía embebida o incorporada (kWh/kg) para materiales tradicionales de alto consumo:

- Aluminio virgen: 80 kWh/kg
- Acero de refuerzo: 2.4 kWh/kg
- Concreto: 0.7 kWh/kg



Valores de energía embebida o incorporada (kWh/kg) para materiales utilizados en sistemas constructivos a base de tierra cruda:

- Tierra: 0.04 kWh/kg
- Paja: 0.07 kWh/kg
- Madera: 0.75 kWh/kg

De acuerdo con esta información, los materiales base para la bioconstrucción presentan coeficientes claramente menores, esto, debido a que los sistemas constructivos a base de tierra cruda como el adobe, tapial y el bahareque no requieren de altas temperaturas para su transformación ni materiales de alta pureza, lo cual se traduce en un menor consumo energético y una menor cantidad de procesos de transformación de la materia. Esto último se puede considerar como el agente diferenciador sustancial con elementos constructivos tradicionales hacia la edificación sustentable (Vázquez, 2001).

Es importante identificar y reconocer que la energía incorporada está directamente relacionada con los niveles de emisiones de CO₂, es decir, a una mayor cantidad de energía incorporada, mayor será la cantidad de emisiones o carbono incorporado, lo que se traduce en un mayor impacto que contribuye al deterioro ambiental. (Sabnis, Mysore, & Anant, 2015). Para ilustrar esta relación, a continuación, se muestra la comparativa de emisiones de materiales tradicionales y materiales empleados en el desarrollo de sistemas constructivos a base de tierra cruda:

Valores de emisiones de CO₂ (gCO₂ eq/kg) para materiales tradicionales de alto consumo:

- Aluminio virgen: 14,200 gCO₂ eq/kg
- Acero de refuerzo: 575 gCO₂ eq/kg
- Concreto: 164 gCO₂ eq/kg

Valores de emisiones de CO₂ (gCO₂/kg) para materiales utilizados en sistemas constructivos a base de tierra cruda:

- Tierra: -12 gCO₂ eq/kg
- Paja: -1,660 gCO₂ eq/kg
- Madera: -1,670 gCO₂ eq/kg



Si se analiza la interacción de estos datos dentro de un mismo sistema constructivo, se observa que el concreto demanda aproximadamente 17 veces más energía por unidad de masa que la tierra cruda. Desde la perspectiva de la bioconstrucción, la viabilidad de estos materiales es argumentada a través de ACV, debido a que no solo debe de importar la baja demanda energética primaria, sino su reintegración al medio natural una vez cumplido con su vida útil (Blachet, 2017)

Los niveles de emisiones producidos por ambos grupos de materiales, es notoria la ventaja que presentan los materiales aplicados en los sistemas a base de tierra cruda, al ser de origen natural y bajo procesamiento, poseen características que permiten enclaustrar el carbono. (González Calderón, 2022) Sin embargo, en el contexto de Hermosillo, esta baja energía embebida se complementa con la eficiencia operativa. La literatura académica especializada (Minke, 2025) sugiere la hibridación de sistemas, pues permite capitalizar la baja huella ambiental de la tierra y las fibras sin renunciar a la precisión y durabilidad de los estándares de construcción actual.

En cuanto a sus características higrotérmicas, Astilludo y Vacacela (2015), realizaron una simulación apoyada del software ECOTEC. Esta simulación tenía como objetivo hacer una comparación entre un panel de bahareque (sistema mixto) de 10 cm de espesor que contempla 2.5 cm de tierra a cada lado, ladrillo rojo recocido de 14 cm de espesor y un bloque de concreto de 15 cm de espesor, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados (ver **Tabla 3**)

Tabla 3

Resultados de simulación térmica en ECOTEC.

Panel/Pared	Bahareque	Ladrillo	Bloque
Valor U ($W/m^2 \cdot K$)	0,91	3,14	4,68
Acceso ($W/m^2 \cdot K$)	2,55	4,38	5,51
Absorción térmica (0-1)	0,495	0,495	0,545
Disminución térmica (0-1)	0,92	0,82	0,85
Aislante térmico (h)	4	4	5

Nota: El procedimiento para la elaboración de las pruebas se generó a partir de la introducción de los datos de las cualidades del muro, es decir, espesor, características y coeficientes de absorción de los materiales que incluye el software. Se simuló bajo características ambientales y climáticas de Loja, Ecuador. (sitio de análisis del estudio analizado de (Astilludo Cordero & Vacacela Albuja, 2015)).

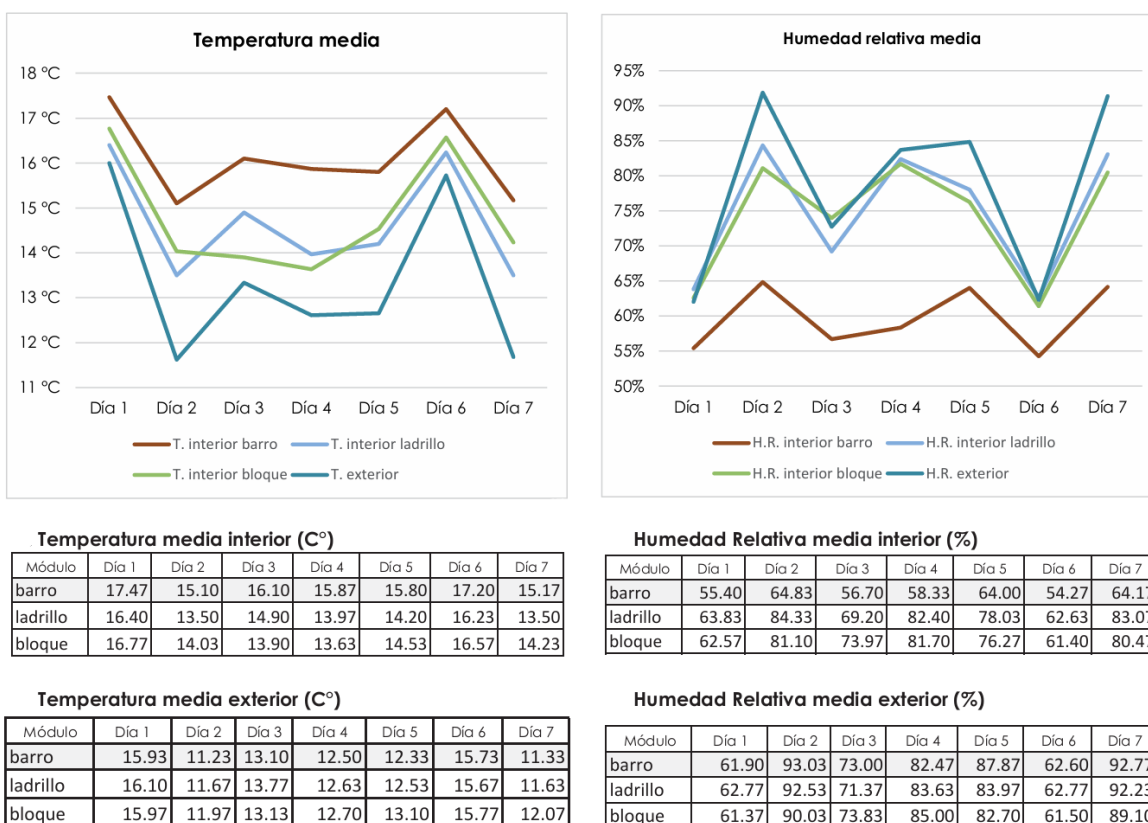
Vacacela (2015), amplía este estudio a través de un monitoreo de módulos habitables basados en estos tres tipos de envolventes tal como se muestra en la **Tabla 4**, donde es posible



observar cómo el módulo propuesto de bahareque posee una temperatura media entre 15 y 17.5°C, mientras que la humedad relativa se mantiene en un rango de 60%. Con esto, se puede afirmar que, dado que la temperatura de confort del estudio realizado oscila entre los 21 y 25°C, el módulo no alcanza los niveles de confort térmico; pero se encuentra bastante cerca, por lo tanto, el ajuste para alcanzarlo estará en aumentar el ancho del panel, y con ello el ancho del núcleo aislante para así obtenerlo.

Tabla 4

Resultados comparativos de monitoreo de temperatura y humedad relativa.



Nota: La zona de confort establecida para el área de estudio es de 21°C a 25°C. Los resultados son reflejo de monitoreo del comportamiento de la envolvente (muros) realizado durante 7 días, las lecturas se realizaron a las 6:00, 13:00 y 20:00 hrs, estos resultados reflejan la lectura media de dicho monitoreo.

En conclusión, la comparativa anterior identifica que los materiales convencionales muestran una desventaja respecto a las características higrotérmicas, energía embebida y emitida; sin embargo, esto no significa que los biomateriales brinden una seguridad ambiental absoluta.



Este estudio debe ser tomado en cuenta como precedente metodológico y comparativo; los valores mostrados permiten identificar las ventajas de aplicación del uso de la tierra cruda frente a materiales convencionales; sin embargo, es importante contextualizarlos en Hermosillo para obtener valores más aplicables.

La elección de materiales locales (convencionales o biomateriales) y la aplicación de diseño bioclimático son factores base para el desarrollo de una reducción de la huella ambiental y la optimización en las edificaciones (Cabrera, González, & Mingolla, 2021). Es importante identificar que estos solo pueden ser considerados como sustentables si los procesos de producción son gestionados desde una perspectiva donde se permita un equilibrio entre la explotación del recurso y su restitución, así como la coherencia de los materiales respecto al tipo de clima local. (González Calderón, 2022).



Los sistemas de construcción prefabricados.

Una realidad de la industria de la construcción es la necesidad de ejecutar de manera eficiente cada uno de sus procesos, tanto en la operatividad como en la ejecución de proyectos de edificación, derivada de esta necesidad, los sistemas constructivos prefabricados surgen como una herramienta fundamental para llevarlo a cabo.

La implementación de este tipo de sistemas ha generado una serie de ventajas en la industria, por ejemplo, la reducción de costos y tiempos de ejecución de los proyectos, la factibilidad de modulación de los elementos, sean estos envolventes o estructuras principales, también, dada esta característica los elementos que componen el sistema pueden ser utilizados en diferentes regiones sin la necesidad de una capacitación especializada para su ejecución, esto debido a que los sistemas de ensamblado o armado son definidos a través de manuales y fichas técnicas que brindan una mayor comprensión del sistema (Robles Cairo & Calderón Aguilera, 2022).

Estos sistemas han evolucionado constantemente desde su aparición en la industria, permitiendo que estos puedan ser adaptados a todo tipo de diseños arquitectónicos y necesidades estructurales actuales (Gunawardena & Mendis , 2022), en resumen, estos sistemas, “han surgido para integrar diversas tecnologías en una solución más holística y sistemática” (p. 70) permitiendo la ejecución de proyectos de manera más integral y eficiente.

De acuerdo con Gunawardena y Mendis (2022), existen tres principales tipos de sistemas prefabricados:

- 1) **Construcción Modular (Volumétrica):** Este tipo de unidades son fabricadas completamente fuera del sitio donde serán colocadas, para después ser llevadas al sitio y ser ensambladas y formar una estructura completa. (Ver **Figura 10**)
- 2) **Sistema de Paneles:** Son unidades de paneles planos fabricadas en un sitio externo; su aplicación puede ser tanto para interior como exterior, regularmente cuentan con un sistema de anclado específico. (Ver **Figura 11**)



- 3) **Sistema Híbrido:** Es la combinación de sistemas de paneles y la construcción modular; este tipo de sistemas es mayormente aplicado en espacios con muchos servicios que son replicables, como cocinas o baños. (Ver **Figura 12**).

Figura 10.

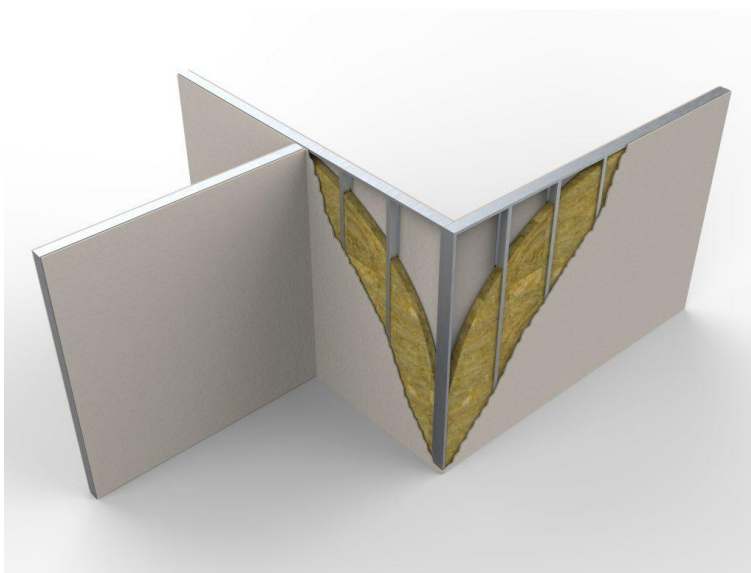
Ejemplo de sistema modular prefabricado



Nota: Fotografía por Blumer Lehmann Holzbau.

Figura 11.

Ejemplo de Sistema de Paneles Compuestos.



Nota Sistema Volcapanel AR. Recuperada de <https://volcan.cl/soluciones/volcopanel-ar/>.



Figura 12.

Ejemplo de Sistema Híbrido.



Nota: Recuperada del catálogo Atlántida Homes (2024).

Para esta investigación, se plantea el desarrollo de un prototipo tipo panel orientado principalmente a muros. La aplicación de este tipo de sistemas ha sido ejecutada principalmente en edificaciones de poca altura, lo que es conveniente si el panel quiere ser orientado a vivienda o comercio. También, este tipo de sistema ofrece como ventaja el uso de mano de obra no especializada (Novas , 2010), lo que representa un ahorro significativo en costos en comparación con otro tipo de sistemas prefabricados.

Como se mencionó anteriormente, los sistemas constructivos prefabricados han evolucionado gracias al desarrollo tecnológico, de esta manera, existe hoy día una variedad extensa de estos sistemas en el mercado, que puede ser fácilmente adaptada a las condiciones que se requieran. (Fernández-Ordóñez & Fernández Gómez, 2009). Esto ha permitido que cada día estén más adaptados a las normativas locales, y así como las edificaciones de sistemas tradicionales, estos puedan responder de manera positiva al contexto del sitio (Boafo, Kim, & Kim, 2016).

Los sistemas prefabricados y la sustentabilidad.

Gracias a los avances tecnológicos, los sistemas prefabricados han evolucionado de manera positiva en el campo del impacto climático, cada vez, los nuevos productos en el mercado emplean tecnologías que prestan especial atención a los beneficios ambientales, económicos, sociales y culturales, con este enfoque, los sistemas prefabricados de construcción notan una tendencia hacia una integración de la sustentabilidad cada vez más notoria en la industria de la construcción, que



tradicionalmente ha sido caracterizada por una gran demanda energética y altas emisiones de CO₂ (Teng, Li, Pan, & Ng, 2018).

La construcción a base de sistemas prefabricados ha demostrado ser significativamente más eficiente en el uso de la energía, en comparación con la construcción con sistemas tradicionales desarrollados *in situ*. De acuerdo con un estudio, realizado de manera colaborativa por la Universidad Tsinghua en Beijing, China, la Universidad Tecnológica de Dalian, China y la Universidad del Estado de Louisiana, los sistemas prefabricados demostraron tener un grado de ventajas en el impacto ambiental, incluyendo una reducción del 35.82% en el uso de recursos, así como una reducción de 6.61% en daños a la salud y un 3.4% en daños hacia los ecosistemas (Cao, Li, Zhu, & Zhang, 2015).

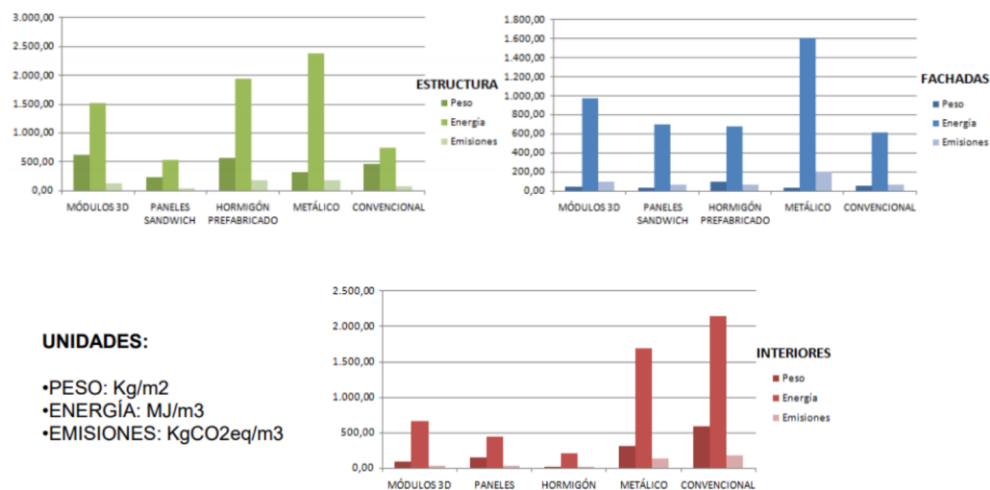
Si bien, la prefabricación en la construcción ha mostrado múltiples beneficios en términos de sustentabilidad ambiental, es necesario tomar en cuenta y abordar de manera crítica los desafíos que estos suponen para el impacto climático, por ejemplo, el uso de materia prima con una alta huella de carbono y consumo energético, de acuerdo con López Flores (2018), el impacto ambiental de los sistemas prefabricados a base de materiales como el acero y el concreto es bastante elevado, de acuerdo con la

Figura 13.

Figura 13

Análisis de impacto ambiental de los sistemas constructivos prefabricados.





Nota: Comparativa según tipo de materiales constructivos y aplicación en la edificación. Cela (2011) “Evaluación del impacto ambiental de diferentes sistemas constructivos industrializados comparados con un sistema constructivo tradicional”.

En este sentido López Flores (2018), observa una relación consistente: los sistemas más industrializados y pesados concentran los mayores valores de energía y emisiones en casi todos los casos expuestos. Esto sugiere una carga ambiental asociada a sus procesos de fabricación y materiales base.

En el caso de los sistemas que concuerdan con la intención conceptual de esta investigación, se identifica que los sistemas compuestos o paneles tipo sándwich muestran menores impactos relativos, particularmente en emisiones. Esto indica que la prefabricación ligera puede ser una estrategia efectiva para reducir la huella ambiental, debido a los beneficios de optimización del material y un menor desperdicio en obra.

Uno de los materiales que ha sido explorado para el desarrollo de este tipo de sistemas y es un buen complemento a este tipo de sistemas ligeros es la tierra cruda, reconocida debido a sus características que le hacen un material de bajo coste energético asociado con su extracción, transporte y producción así como sus propiedades térmicas, las cuales son beneficiosas para el tipo de clima que se busca atender en esta investigación, además de poseer una característica que lo coloca sobre los demás es que no es un material combustible y permite regular los niveles de humedad del interior del espacio construido (Zuleta Roa, 2011).

El desarrollo de sistemas prefabricados con base en tierra es entonces una alternativa con muchas vías de oportunidad para su exploración; desde esta investigación, se abordará desde sus



capacidades térmicas y su huella de carbono en comparación con otro tipo de sistemas. Sin embargo, es importante identificar el nivel de complejidad que representa este proceso de innovación (Zamora, 2024) por lo que se deben estudiar diferentes tipos de herramientas de diseño y prototipado como el diseño paramétrico para hacer evaluaciones constantes de las propuestas y encontrar así las configuraciones óptimas.

El diseño paramétrico y los sistemas prefabricados de construcción en tierra cruda.

Diseño paramétrico y sustentabilidad.

De acuerdo con Wassim Jabi (2013), el concepto de diseño paramétrico es “un proceso basado en el pensamiento algorítmico que establece la expresión de parámetros y reglas, que, en conjunto, definen, codifican y aclaran la relación entre la propuesta de diseño y el resultado final” (p. 22).

Son muchas las aplicaciones en las que el diseño paramétrico puede participar en el desarrollo de la industria de la construcción y la arquitectura sustentable. Uno de los enfoques de los sistemas paramétricos es la oportunidad de reducir el factor tiempo en el proceso de diseño, así como la optimización de recursos para obtener el mayor beneficio a un menor costo de recursos materiales (Zhang, 2020).

El optimizar los procesos, se ha convertido en una de las prioridades para el desarrollo de ciudades y edificaciones en la actualidad, sin embargo, es importante realizarlo desde una perspectiva sustentable, siguiendo los principios planteados por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) mencionados anteriormente, esto se convierte entonces, en un área de oportunidad que permita la gestión de un proceso arquitectónico y constructivo más eficiente y sustentable (Kohlhase, 2012).

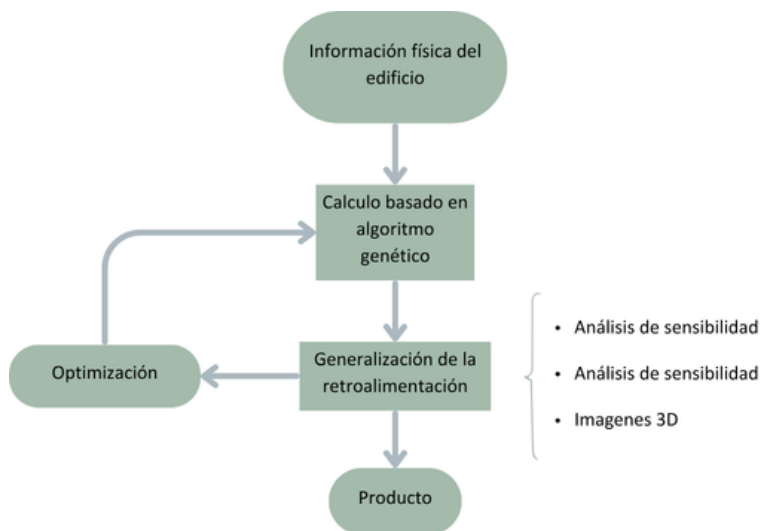
En este sentido, el desarrollo del panel de muro a base de tierra cruda que se propone desarrollar bajo esta investigación busca incorporar a su desarrollo un proceso de optimización desde la fase de ideación/diseño (**ver Fase 03** del proceso metodológico) del desarrollo del prototipo de panel de tierra cruda. Esto en el entendido de que los factores relacionados con la primera fase de diseño son, en la mayoría de los casos, determinantes para el desarrollo de un producto/diseño que cumpla con su objetivo de manera íntegra (Zhang, 2020).



Los procesos del diseño paramétrico permiten, a través de simulaciones apoyadas por software especializado, obtener la mejor administración no solo de recursos, sino de características necesarias para obtener resultados óptimos que respondan a las demandas sustentables, para lograr este tipo de soluciones, Zhang (2020), propone un sistema metodológico (ver **Figura 14**) basado en el Modelado de Información de Construcción (BIM) y algoritmo genético. El primero permite recobrar la información desde cada etapa del proceso de diseño, con ello se puede obtener la información física de la edificación a manera de parámetros que permite un proceso de evaluación más acertado; el segundo se refiere a una simulación de procesos de evolución del sistema (Zhang, 2020),. El resultado de ambos análisis permite determinar niveles de prioridad dentro de los parámetros, de esta manera, se pueden hacer ajustes en los valores para desarrollar sistemas adecuados al objetivo, en el caso de esta investigación, la obtención de una propuesta que permita desarrollar un sistema constructivo óptimo, de bajo recurso material y bajo impacto medioambiental.

Figura 14.

Diagrama de flujo de optimización de diseño en fase de ideación/diseño.



Nota: Recuperada y traducida de Zhang 2020 (p.3).

Una de las herramientas adyacentes al proceso del diseño paramétrico es el *diseño biomimético*, este hace referencia a la imitación de un organismo o su comportamiento, incluso de ecosistemas completos, en términos de forma, materiales, métodos de construcción, procesos y funciones (Zari, 2010), en el campo que compete a esta investigación, hace referencia entonces a la transferencia de principios biológicos a la construcción, aplicando sistemas biológicos



estructurales que permitan desarrollar tecnologías más sustentables con un beneficio ecológico siendo estos más próximos a los modelos naturales (Zhang, 2020).

Como se mencionó en este documento, uno de los principales objetivos del desarrollo de esta investigación y esta propuesta de sistema constructivo es desarrollar un sistema que cuente con una huella de carbono menor a la de los sistemas constructivos tradicionales que son empleados en la actualidad, por ello, las herramientas de la bioparametría serán consideradas en el desarrollo de este Zari (2010).

Los métodos paramétricos proveen tanto a los arquitectos y constructores una manera efectiva de realizar simulaciones más allegadas a la realidad desde las primeras etapas del diseño, de manera que pueden lograr resultados óptimos y adaptados a las necesidades propias del proyecto, con la oportunidad de hacer los ajustes necesarios para lograrlo (Zhang, 2020).

Sistemas paramétricos y los sistemas constructivos prefabricados de tierra.

La investigación y el desarrollo de los sistemas paramétricos han revolucionado la perspectiva en que se abordan los procesos de los proyectos, se convierten en una herramienta valiosa para la gestión de estos, permitiendo una mayor precisión y optimización para resolver problemáticas puntuales. Este enfoque ha sido aprovechado en el campo de la construcción con tierra cruda, donde la aplicación de estos sistemas se ha explorado con la intención de obtener un mayor aprovechamiento de los recursos y obtener resultados más precisos.

De acuerdo con Kolarevic (2001, p. 269): “los nuevos procesos de diseño, fabricación y construcción impulsados digitalmente desafían cada vez más la relación histórica entre la arquitectura y los medios de producción” actuales, los avances en este campo y en la industria de la construcción misma en búsqueda de procesos que sean de menor impacto ambiental han llevado al desarrollo de tecnologías que permitan la aplicación de materiales y sistemas constructivos con un menor impacto ambiental, como los basados en tierra, un campo que poco a poco ha ganado interés dentro de la industria.

Como se ha mencionado en esta investigación, la construcción con tierra cruda es una respuesta al impacto negativo que han producido los sistemas tradicionales de la construcción. Una de las desventajas que tienen los sistemas constructivos de tierra, es su poca capacidad de



adaptabilidad a los procesos constructivos actuales, la cual, a través de procesos con enfoque paramétrico es posible compensar (Gomma, Jabi, Soebarto, & Xie, 2022).

Una de las aplicaciones con mayor fuerza en la actualidad relacionada con estos conceptos es el desarrollo de *Sistemas de Fabricación Digital para la Construcción con Tierra* (DMEC), utilizando principalmente cuatro métodos: aditivo, formativo y ensamble (ver **Figura 15**), siendo la fabricación aditiva (AM) y la impresión 3D (3DP) las que más han encontrado espacio en la industria actual (Gomma, Jabi, Soebarto, & Xie, 2022).

Figura 15.

Ejemplos de técnicas de fabricación digital 3D; de izquierda a derecha: fabricación, aditiva, formativa y de ensamble.



Nota: Recopilación obtenida de biblioteca digital en fuentes de internet.

Estas técnicas han permitido un avance en el desarrollo de los sistemas constructivos con base tierra, especialmente los prefabricados, quienes han encontrado retos significativos en su implementación debido a la falta de información en sus aspectos de aplicación en la construcción, por ejemplo, la fabricación de máquinas para su ejecución, los procesos y flujo de trabajo en la construcción y estándares de los materiales empleados; de igual manera, otro de los retos a los que se enfrenta recae en el comportamiento de estos sistemas, es decir, su estabilidad estructural así como su rendimiento térmico y ambiental. Este tipo de desafíos es una de las causas por las que la industria de la construcción se resiste a adoptar este tipo de sistemas constructivos, además de la falta de regulaciones y normativa que respalde su uso (Gomma, Jabi, Soebarto, & Xie, 2022).

La mejora de los DMEC deberá entonces de ser desarrollada a fin de “potenciar y establecer un mejor entendimiento de los desafíos que obstaculizan el proceso de adopción de estos métodos en los esquemas actuales de la construcción” (Gomma, Jabi, Soebarto, & Xie, p. 3).



Las técnicas AM y 3DP son un ejemplo en cuanto al uso de herramientas digitales de parametrización se refiere; esto proporciona un campo de oportunidad para que nuevas técnicas y tecnologías puedan ser adaptadas para la implementación en nuevos sistemas. La fabricación digital para la construcción con tierra es una de las alternativas necesarias para la aplicación de sistemas constructivos alternativos con bajo impacto ambiental, la incorporación de estas nuevas tecnologías a las técnicas constructivas ancestrales da como resultado edificaciones más sustentables y una producción alternativa más limpia, con la cual se espera competir e incluso sustituir las técnicas empleadas con materiales tradicionales dominada principalmente por el concreto y el acero (Veliz Reyes, Gomaa, Jabi, & Chatzivasileiadi, 2019). Son muchos los ejemplos de aplicación que existen en la actualidad; cada uno de ellos ha sido desarrollado con el propósito de ofrecer alternativas para el desarrollo de nuevos sistemas constructivos con materiales “no convencionales” y mejorar los existentes.

Un ejemplo sobre la implementación de estas técnicas es el proyecto de *TerraPerforma* (ver **Figura 16** y **Figura 17**), el cual fue desarrollado por el Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC) (2017), donde se utilizó la técnica 3DP en tres diferentes técnicas: en fabricación robótica, impresión *in situ* y la impresión en arcilla, con el propósito de generar un sistema modular que permitiera la edificación de muros con características térmicas que respondieran a las condiciones climáticas de una región cálida con temperaturas oscilantes entre los 35-40 °C, a través de la aplicación de softwares de índole paramétrico especializado (*Rhino CFD*, *Ladybug* y *Karamaba*) en el análisis de características físicas como los niveles de radiación solar, conductividad térmica, convección térmica, masa térmica así como el comportamiento estructural del prototipo (IAAC, 2017).

Figura 16.

TerraPerforma- Sistema modular desarrollado a partir de 3DP en arcilla.

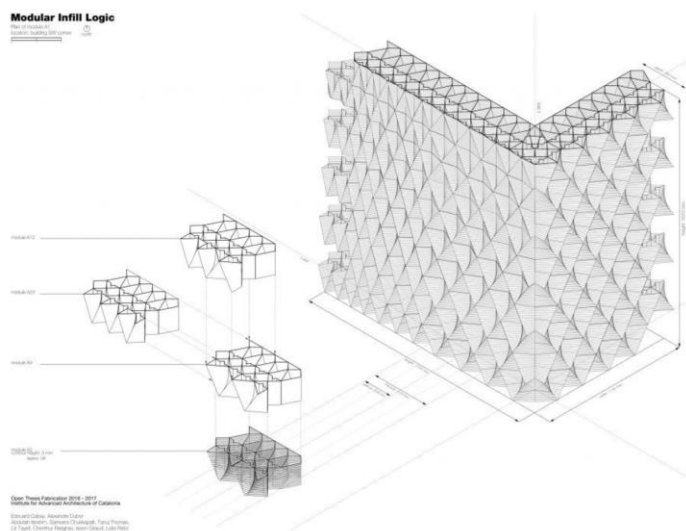




Nota: Recuperada de Open Thesis Fabrication 2016-2017. Institute for Advanced Architecture of Catalonia

Figura 17.

Detalle de módulos para armado.



Nota: Recuperada de Open Thesis Fabrication 2016-2017. Institute for Advanced Architecture of Catalonia

Cada una de las características del módulo fue diseñada paramétricamente, para obtener el mayor rendimiento posible en función de los niveles de radiación solar, comportamiento del viento y el razonamiento de la impresión 3DP, de manera que fuese concebido de manera integral (ver **Figura 18**) (IAAC, 2017).



Figura 18.*Impresión de prototipo modular de arcilla.*

Nota: Recuperada de Open Thesis Fabrication 2016-2017. Institute for Advanced Architecture of Catalonia

De manera general, y en base a lo ahora expuesto, es evidente el avance tecnológico y de investigación, que existe en la actualidad, en cuanto al desarrollo de técnicas constructivas y tecnologías para el uso de la tierra como principal material en la construcción, así como su continuo avance. La concepción y el desarrollo de este tipo de sistemas permitirá, no solo beneficios medioambientales, sino también económicos, culturales y sociales, entendiendo que sus beneficios de la implementación son completamente integrales, y, aun y cuando estos sistemas todavía no son parte básica para la industria de la construcción, los avances, como los aquí presentados permitirá su evolución hasta su próxima incorporación a los sistemas constructivos básicos (Gomma, Jabi, Soebarto, & Xie, 2022).

Aplicación de parametrización y procesos biomiméticos.

La integración del diseño asistido de manera digital ha redefinido la relación que existe entre el diseño y la producción, optimizando los recursos y los parámetros que permitan la generación de mejores resultados (Kolarevic, 2001)

En este sentido, la incorporación de metodologías basadas en parametrización digital (Gomma, Jabi, Soebarto, & Xie, 2022) y principios biomiméticos (Zari, 2010) permite explorar configuraciones geométricas capaces de responder de manera más eficiente a las condiciones específicas de uso y contexto.



Estas aproximaciones, inspiradas tanto en modelos matemáticos como en patrones de organización presentes en la naturaleza, abren la posibilidad de desarrollar sistemas constructivos que integren criterios de eficiencia material, adaptabilidad y desempeño técnico, mismos que se relacionan con el objetivo de la presente investigación (Reddi, Jain, Yun, & Reddi, 2012).

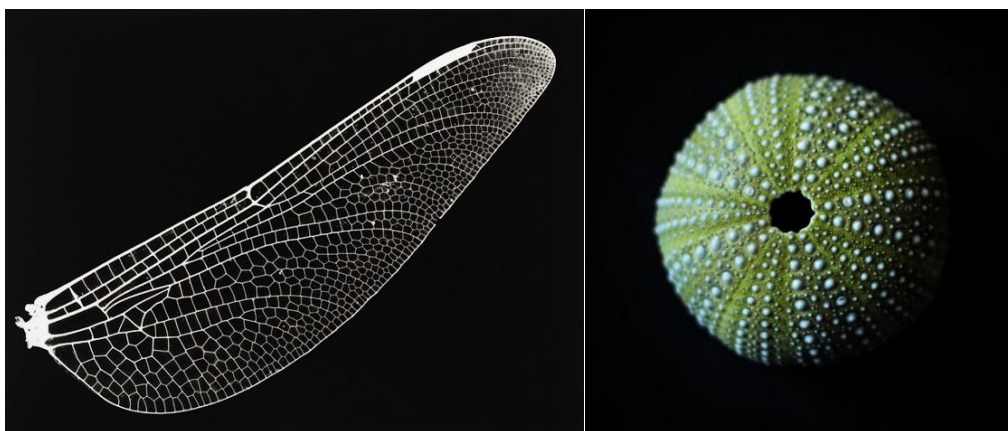
Si bien, este tipo de geometrías o principios, no se han estudiado o aplicado estrictamente desde la perspectiva del desarrollo de paneles de tierra cruda, sí se ha implementado al desarrollo de elementos arquitectónicos con el fin de optimizarlos (Nowak , 2015). A continuación, se define cada una de ellas y cómo su aplicación aporta beneficios al desarrollo de la propuesta.

Diagrama voronoi.

Inspirado en los patrones de la naturaleza que se encuentran presentes en diferentes medios como las alas de libélulas o en las corazas de erizos de mar (ver **Figura 19**), el diagrama voronoi es un gráfico que consta de células creadas a partir de diagramas de óvalos, bordes y nodos que se encuentran de manera equidistante de al menos tres centros (ver **Figura 20**). Este diagrama permite la creación de una cuadrícula óptima de uniones, gracias a esta versatilidad. Debido a esto, despierta el interés para su aplicación dentro de los campos de la arquitectura, la construcción y espacios públicos. (Nowak , 2015).

Figura 19

Ejemplos del diagrama voronoi en la naturaleza en el ala de libélula (izquierda) y concha de erizo de mar (derecha).



Nota: Imágenes inspiradas en las mostradas en (Nowak , 2015). Prueba que el sistema voronoi representa una solución para elementos ligeros y robustos.



De acuerdo con Nowak (2015, p. 33): “El diseño de estructuras y elementos tanto en la arquitectura como en la planeación urbana a través del uso de métodos de geometría computacional crea nuevas oportunidades para el desarrollo de proyectos de todo tipo de índoles” donde la aplicación de diagramas de voronoi resalta claramente en el campo. Ver **Tabla 5**.

Tabla 5.

Posibilidades de aplicación de diagramas voronoi en arquitectura, diseño y planeación urbanos

Elemento de diagrama voronoi		Centros	Aristas	Células 2D	Células 3D
Aplicación					
Planeación Urbana		Formación de puntos centrales	Ruta	Región	x
Diseño Urbano		Dominante	Ruta o aristas de áreas específicas	Actividad del área	Arquitectura de menor envergadura
Arquitectura	Forma espacial	Puntos de áreas de iluminación	Elemento estructural	Superficie	Forma estructural
	Divisiones en fachada	Puntos de áreas de iluminación natural o creación de divisiones con centros agregados	Aristas de iluminación	Paneles	X
	Superficie estructural	Creación de divisiones con centros agregados	Elemento estructural	Paneles	X
	Estructura Espacial			X	Estructura

Nota: Elaboración propia a partir de información en (Nowak , 2015).

“La capacidad de generar un número infinito de soluciones alternativas para parámetros dados es una ventaja considerable de los métodos de discretización del espacio digital en la búsqueda de la eficiencia arquitectónica y estructural” (Wieslaw Rokicki, 2016, p. 162)



Biomimetismo - ramificación opuesta.

Tal como se ha mencionado a lo largo de este documento, la aplicación de elementos bioparamétricos, para el desarrollo de esta propuesta ha jugado un papel fundamental, debido a que ha permitido resolver este proyecto de una manera eficiente, desde una perspectiva de la naturaleza (Zari, 2010).

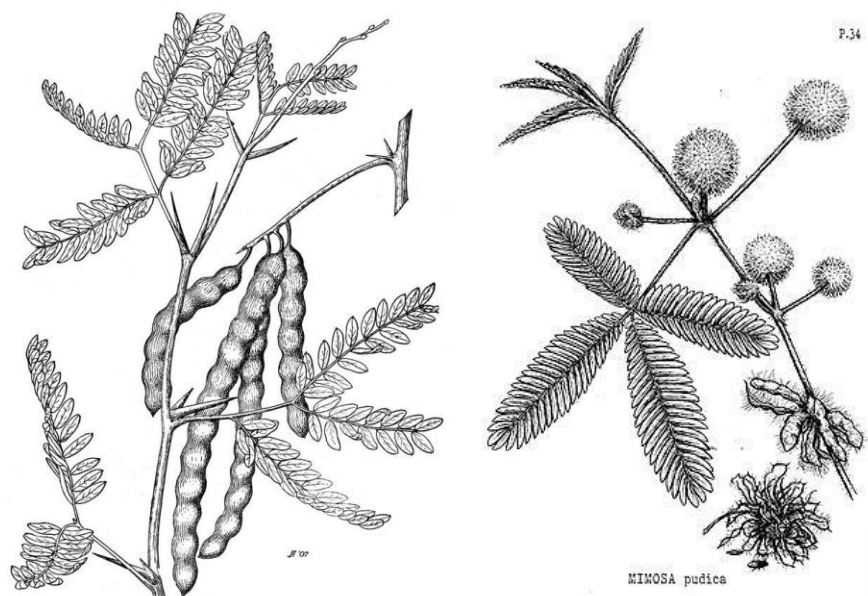
El desarrollo de la propuesta desde la perspectiva y el estudio de patrones de organización foliar permite identificar características de organización estructural que posibilitan maximizar de manera equilibrada las capacidades y características de la propuesta en cuanto a este tema. Para este caso específico se analiza el sistema de ramificación opuesto presente en los árboles endémicos de la región: palo verde y mezquite (IMPLAN, 2020). Ver **Figura 22**.

Figura 22
Mezquite y Palo Verde



Nota: Imágenes recuperadas de Paleta Vegetal de Hermosillo (IMPLAN 2017). Muestran el tipo de tronco, forma de hoja, y fruto de mezquite (izquierda) y palo verde (derecha)



Figura 23*Disposición de hojas tipo opuesta.*

Nota: Imágenes recuperadas de Pinterest de distribución de hojas de mezquite (izquierda) y palo verde (derecha).

Los patrones en hojas opuestas son caracterizados por situarse en pares a cada lado del tallo, generando una organización equilibrada y eficiente para la captura de luz y facilitar la ventilación. Aplicados a la arquitectura y la construcción, estos principios pueden regir la modulación, orientación y geometría de elementos como lo son los paneles para mejorar sus capacidades de generación de confort. (Sanz, 2019).

Los patrones naturales siguen principios de crecimiento diferencial y optimización geométrica que son traducidos en módulos prefabricados con formas interconectadas, equilibrando cargas de viento, gravedad y torsión (Villanueva Cajide & Casas Cobo, 2018).

Al emular las estrategias evolutivas de las plantas, estas geometrías pueden integrarse mediante herramientas de diseño computacional y técnicas de fabricación digital, dando lugar a sistemas constructivos más adaptativos al clima, eficientes en recursos y con un lenguaje arquitectónico armónico con el entorno (Zari, 2010).

Aporte al diseño de la propuesta. Diseño de panel compuesto o tipo sándwich.

A partir de los fundamentos expuestos sobre el uso de geometrías paramétricas y principios biomiméticos, su incorporación en la presente investigación no se limita a un ejercicio formal o



exploratorio, sino que responde a una estrategia de optimización del sistema constructivo propuesto (Wassim, 2013). En este sentido, las configuraciones derivadas de diagramas voronoi y patrones de ramificación opuesta no solo aportan un lenguaje geométrico, sino que permiten replantear la organización interna del panel en términos de distribución de esfuerzos, eficiencia material y desempeño (Wieslaw Rokicki, 2016).

De esta manera, los principios de optimización geométrica descritos previamente se traducen en decisiones constructivas concretas, tales como la modulación del entramado, la densidad de elementos y la configuración del núcleo, como se desarrolla en la Fase 03 de la metodología de esta investigación. En consecuencia, el uso de herramientas paramétricas y enfoques biomiméticos se plantea como un puente metodológico entre la teoría y la experimentación, que permite explorar soluciones constructivas más eficientes, adaptativas y coherentes con los objetivos de sustentabilidad planteados en la investigación.



Estado del Arte.

Casos de estudios de sistemas de construcción prefabricados con tierra.

Como se ha mencionado anteriormente, el desarrollo de los sistemas constructivos, con perspectiva de sustentabilidad, ha generado un interés genuino en la experimentación y desarrollo de sistemas con materiales alternativos. A continuación, se presentan algunos de los sistemas de construcción prefabricada en base a tierra que son tomados como referencia para el desarrollo de la propuesta que se plantea en esta investigación.

Panel prefabricado de tierra vertida con fibras vegetales. Amàco

El siguiente caso de estudio a analizar es el panel de tierra vertida no estabilizada; este sistema prefabricado experimental fue realizado en colaboración con *Amàco*, un centro de investigación y formación en la construcción con tierra y fibras vegetales con centro operativo en *Villefontaine*, Francia. Tiene como propósito la difusión y la promoción de las técnicas de construcción con tierra en diferentes regiones del mundo para el desarrollo de ciudades y edificaciones sustentables (Amàco, 2024).

El desarrollo de este sistema prefabricado surge como respuesta del diseño arquitectónico para resolver una conexión entre la mediateca *James Baldwin* y la *Casa de los Refugiados*. El resultado fue una edificación, cuyo interior es el resultado de muros prefabricados de una mezcla de tierra y fibra vegetal en marco de madera. En total se utilizaron 32 paneles de tierra cruda de 1.50 m x 2.50 m x 0.30 m. La mezcla de tierra cruda y fibras vegetales fue elaborada por *Amàco*, la particularidad de esta mezcla es que fue realizada sin aditivos o estabilizadores como cemento o cal (Amàco, 2024).

La formulación de los prototipos de los paneles fue desarrollada bajo un sistema metodológico experimental, donde el primer prototipo elaborado mostró una buena estructura, así como resistencia al fuego y tener solo algunas grietas mínimas. A partir de este prototipo se comenzó a trabajar en tres prototipos más, gracias a que la tierra contenía limos muy finos y cohesivos, esto permitió que el montaje y desmontaje de los paneles fuesen más sencillos (ver **Figura 24**). Esta serie de prototipos presentó características positivas como, superficies lisas y



pocos defectos, con lo cual fue posible la elaboración del prototipo final, el cual contenía 28% de tierra, 71% de agregados, 1% de paja, a esta mezcla se le agregaría un 15% de agua (Amàco, 2024).

Figura 24.

Muestras de mezclas de tierra para elaboración de paneles prefabricados.



Nota: Fuente amàco.

La fabricación de este panel se utilizó un encofrado de madera que permitiera la contención de la tierra, hay que especificar, que los sistemas constructivos de tierra vertida asemejan al proceso de colado de concreto tradicional, por lo que es necesario que el encofrado cuente con características permeables para facilitar el desencofrado del panel (Amàco, 2024).

Al interior del encofrado, se coloca una estructura de madera (ver **Figura 25**), esta estructura permite otorgarle rigidez al panel, acelera el tiempo de secado, facilita la manipulación y el transporte de los paneles. Posteriormente a colocar la estructura de madera y el encofrado, el siguiente paso es hacer el colado de tierra, la mezcla de tierra, así como el concreto tradicional es mezclado a través de un camión revolvedora o una revolvedora de sitio, utilizar esta técnica permite una mayor integración de todos los componentes de la mezcla de tierra. La tierra es vertida en el encofrado (ver **Figura 26**), en esta parte de la ejecución del proceso es muy importante colocar las mangueras vibradoras, estas permitirán que las burbujas de aire atrapadas en la mezcla puedan ser desintegradas para obtener una mayor consistencia y resistencia en la mezcla. Por último, es importante dejar secar el panel, alrededor de cinco semanas antes de retirar el encofrado y transportarlos al sitio para su instalación (ver **Figura 27**) (Amàco, 2024).



Figura 25.*Estructura interna de panel de tierra vertida.**Nota: Fuente amàco.***Figura 26.***Colado de tierra vertida en encofrado para armado de panel.**Nota: Fuente amàco.*

Figura 27.*Instalación de panel de tierra vertida.**Nota:* Fuente amàco.

Este tipo de sistemas de paneles permite una exploración más amplia de las posibilidades que tiene el empleo de la tierra cruda como material de construcción, así como su adaptabilidad a los diferentes proyectos que existen para resolverlos con un menor impacto ambiental. Para llegar a estas conclusiones, es necesario incentivar de manera activa la investigación, la experimentación y la apertura de foros para seguir compartiendo los beneficios que tiene mezclar sistemas constructivos ancestrales con nuevas tecnologías, para obtener un mayor aprovechamiento de cada elemento.

Hanok. Sistema de construcción modular.

Existen pruebas de que, al unir los procesos artesanales con las innovaciones tecnológicas, es posible obtener grandes resultados; prueba de ello es el sistema *Hanok*.

Hanok se refiere a la arquitectura construida en Corea con técnicas y estilos propios desde tiempos prehistóricos. En un sentido estricto, la palabra *Hanok* significa “casa residencial”, y en un sentido más amplio, incluye “toda la arquitectura tradicional coreana” (ver **Figura 28**). El origen del *hanok* data del año 6000 a.C., se estima que el *hanok* tradicional fue completó a finales del periodo *Joseon* (1392-1910) (Architecture & Urban Research Institute, 2025).



Este sistema constructivo, a pesar de su peso histórico, fue desplazado por los procesos de industrialización que encontraban este sistema obsoleto. Es a partir de la década de 1990, que el valor del sistema *hanok*, como el sistema arquitectónico tradicional coreano, fue resignificado y recobró interés, impulsado por la búsqueda de valores estéticos tradicionales y la necesidad de viviendas más saludables y sustentables. Este reciente incremento en popularidad ha permitido que el desarrollo de las edificaciones de este tipo se haya modernizado, permitiendo la estandarización y la industrialización de algunos de sus procesos (Architecture & Urban Research Institute, 2025).

Figura 28

Sistema tradicional Hanok

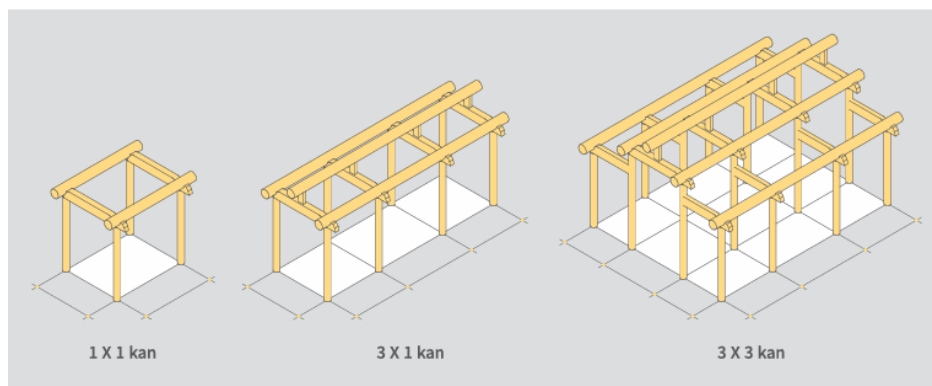


Nota: Imágenes recuperadas de diversas fuentes de internet.

El *hanok* es un proceso caracterizado por un concepto de modularidad, llamado *Kan* (ver **Figura 29**). Esta unidad de medida representa el espacio entre dos columnas y actúa como la base del diseño, su valor se toma a partir de las necesidades de modulación del proyecto arquitectónico, el valor común empleado es de 8 ja (1 ja =30 cm aproximadamente), sin embargo, puede variar dependiendo el tipo de madera empleada (National Hanok Center, 2017).



Figura 29 *Modulación Kan.*



Nota: Imágenes recuperadas de (National Hanok Center, 2017, p. 26). Se muestra un ejemplo de modulación creado a partir de la unidad de Kan empleada

El proceso de construcción del *hanok* comienza con la elección del sitio y termina con el cuidado del entorno inmediato de la edificación. Este proceso, de manera general, se basa en un proceso secuencial, esta se puede observar en la **Figura 30** donde: en la hilera superior se muestra (de izquierda a derecha): ceremonia de comienzo de construcción, ubicación de zapatas aisladas para columnas, colocación de columnas; en hilera central (de izquierda a derecha) ceremonia de cimentación de columnas, corte y colocación de trabes principales, armado de estructura para cubierta; en hilera inferior (de izquierda a derecha) colocación de sistema de cubierta, colocación de panel para muro al que se agrega un enjarre grueso de tierra + fibra vegetal, colocación de acabado fino en paneles internos (National Hanok Center, 2017) .



Figura 30*Proceso constructivo de Hanok.*

Nota: Imágenes recuperadas de https://www.hanokdb.kr/theology_eng/sub_04_01 el 10 de abril de 2026. Se muestra el proceso de construcción de *hanok*.

Basado tradicionalmente en el uso de madera, piedra y tierra cruda, el sistema *hanok* se ha adaptado a las demandas contemporáneas mediante la industrialización de sus elementos. Un ejemplo destacado es su sistema de muros: paneles tipo sándwich prefabricados que emplean una estructura de bambú externa y un núcleo aislante (ya sea un material natural o industrial) diseñados para recibir un recubrimiento de tierra cruda. Como se observa en la **Figura 31** estos paneles están dimensionados para integrarse con precisión en la estructura de postes y vigas de madera. Esta innovación tecnológica optimiza los tiempos de ejecución y los costos operativos sin sacrificar la esencia técnica ni los beneficios bioclimáticos del sistema tradicional.



Figura 31

Montaje de módulos de paneles en sistema Hanok.



Nota: Imágenes recuperadas del proceso mostrado en: <https://youtu.be/fCtKYCe-GXU>. Se muestra la colocación de un panel compuesto de un elemento aislante y reforzado con una estructura de lata de bambú, colocado en una estructura de madera para completar la envolvente.

De acuerdo con el manual del sistema *Hanok* (2017), el uso de tierra cruda en los paneles de la envolvente otorga beneficios importantes que permiten una sana operatividad del sistema, además de brindar características higrotérmicas claves para el confort (ver **Figura 32**)

Figura 32

Aplicación de aplanado grueso sobre paneles de la envolvente.



Nota: Imagen recuperada del proceso mostrado en: <https://youtu.be/fCtKYCe-GXU>. Aplicación de aplanado grueso, en la mayoría de los casos, se aplica con jana plana metálica o de madera.

A manera de refuerzo, después de la capa gruesa de enjarre de tierra, se coloca una malla de refuerzo, ya sea de nylon u otro material; esta otorga rigidez al aplanado y al panel. La malla es embebida dentro del panel al aplicar presión sobre ella contra el aplanado grueso, posteriormente



se da el aplanado fino o, en su defecto, un aplanado en cal (ver **Figura 33**) (National Hanok Center, 2017).

Figura 33

Colocación de malla de refuerzo en panel.



Nota: Imágenes recuperadas del proceso mostrado en: <https://youtu.be/fCtKYCe-GXU>. A la izquierda: aplicación de malla de refuerzo, el obrero aplica presión contra el aplanado grueso, cada una de las capas del panel se une de manera física, no química. A la derecha: aplicación de aplanado en cal, se realiza una vez seca la capa superior del enjarre de tierra (3-5 días aprox.), la colocación de cal seguirá permitiendo el secado de las capas internas de tierra.

Como conclusión se observa que el sistema *hanok* revela que su valor fundamental para la arquitectura contemporánea reside en su lógica de modularidad sistémica, la cual prefigura los principios de la prefabricación moderna (Gunawardena & Mendis , 2022). Al operar bajo un sistema mixto, la estructura de postes y vigas ofrece una infraestructura geométrica y estructural ideal para la integración de sistemas de paneles tipo sándwich (Blachet, 2017). Esta combinación funge como antecedente para la convivencia entre estructuras rígidas y rellenos adaptables.

La incorporación de paneles tipo sándwich revestidos con tierra cruda se presenta no como una ruptura, sino como una evolución tecnológica que resuelve las limitaciones críticas de la construcción en tierra tradicional, especialmente la intensidad de mano de obra y los prolongados tiempos de secado, sin sacrificar las propiedades de inercia térmica e higroscopicidad de la materia prima. El uso de tierra cruda como material de recubrimiento en este sistema también sienta un



precedente sobre el uso de materiales con buen desempeño higrotérmico ante situaciones climáticas vulnerables como el que se presenta en esta investigación (Minke, 2025).

Sistemas mixtos prefabricados – Quincha prefabricada.

Diferentes grupos académicos y de investigación como el Programa Iberoamericano de Ciencias y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) han realizado numerosos estudios sobre los sistemas mixtos, su propósito ha sido la recuperación de estos sistemas, así como su divulgación (Zazu Vives, 2021).

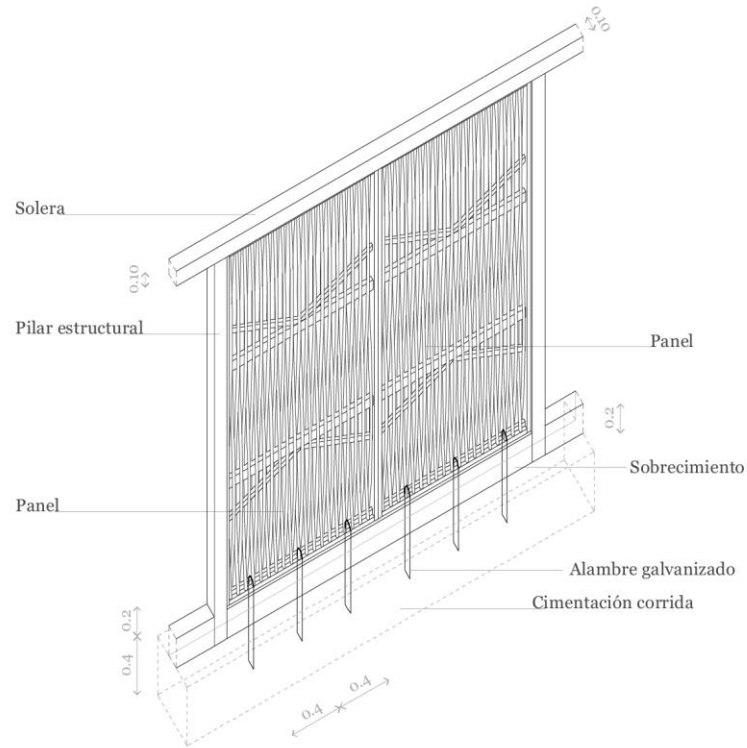
El desarrollo de estas técnicas en un orden prefabricado ha sido una exploración que ha permitido la diversificación de su aplicación en diferentes contextos. Como se hizo mención anteriormente, la unión ancestral y actual en los sistemas constructivos, por medio de los avances tecnológicos actuales, permite un aprovechamiento enriquecido de las técnicas y la transmisión de los saberes.

Entendiendo esto, un grupo de investigación latinoamericano que propone un sistema de “Quincha Prefabricada”, esta investigación y desarrollo posterior de réplicas fue encabezado por el Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda (ININVI), FUNDASAL y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Este sistema constructivo mixto emplea cerramientos con paneles prefabricados de madera aserrada. Estos se montan y fijan a la cimentación y a las zonas laterales de la estructura (ver **Figura 34**). Sobre los paneles se aplica el revoque o enjarre a base de una mezcla de tierra y fibra vegetal, para finalmente, aplicar una capa de tierra, cemento o yeso a manera de acabado (ver **Figura 35**). Este proceso de sistematización de la construcción tradicional de la “quincha”, es un reflejo de lo antes mencionado sobre la unión de saberes tradicionales y la aplicación de los nuevos conocimientos (Zazu Vives, 2021).

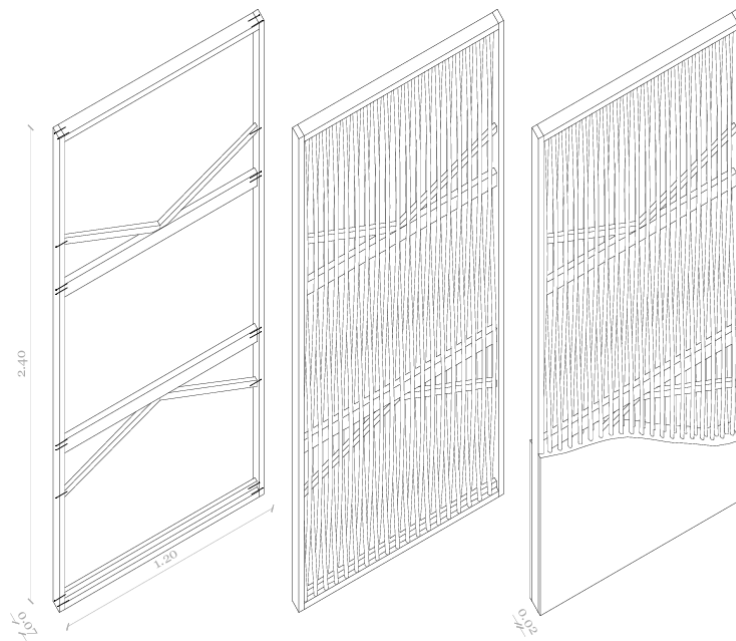


Figura 34 Sistema de unión entre quincha prefabricada y estructura.



Nota: Gráfico recuperado de (Zazu Vives, 2021, p. 21).

Figura 35
Panel prefabricado de quincha



Nota: Gráfico recuperado de (Zazu Vives, 2021, p. 20).



El proceso constructivo empleado en este sistema no requiere de una mano de obra especializada, además, permite la aplicación de la autoconstrucción, esto debido a que los procesos empleados no requieren de equipo ni técnicas especializadas.

Dentro de los procesos constructivos planteados en esta propuesta, el marco del panel es fijado a la estructura (regularmente bastidores de madera) y a la cimentación (ver **Figura 36**), a partir de que los marcos son fijados, comienza el “enquinchado” el cual es rellenar con caña en forma de trenzado (ver **Figura 37**), alternando sus extremos delgados con los gruesos, de esta manera se obtienen anchos iguales a ambos extremos del panel, la tensión de las cañas determinará la rigidez del panel. Una vez realizado el trenzado, se comienza con el “embarre”, que es rellenar con una mezcla de tierra y fibras vegetales todo el “enquinchado”, una vez rellenado, se procede con un aplanado de tierra final, el cual puede ser estabilizado con yeso o cemento (ver **Figura 37**) (Lorenzo Gálligo, 2005).

Figura 36

Montaje de sistema estructural de paneles a la estructura de la vivienda.



Nota: Gráfico recuperado de (Zazu Vives, 2021, p. 20).



Figura 37
Proceso de "Enquinchado" y "Embarre"



Nota: Gráfico recuperado de (Zazu Vives, 2021, p. 20). A la izquierda se aprecia el muro antes de recibir la aplicación de la mezcla de tierra y fibra vegetal; a la derecha se aprecia el proceso de "embarre", con carretilla y cuchara de albañil tradicional.



Normatividad aplicable.

Una vez analizadas las bases teóricas y casos de estudio, es posible observar que la idea conceptual de la prefabricación de elementos y sistemas constructivos a base de tierra cruda está en constante estudio e innovación. Esto sienta un precedente para la transición tecnológica y de conocimientos ancestrales hacia su inclusión en los procesos contemporáneos de construcción.

El desarrollo de estos sistemas, especialmente aquellos que se basan en materiales no convencionales como la tierra cruda, requieren su validación dentro de un marco normativo que garantice su viabilidad técnica, seguridad estructural, desempeño ambiental y aceptación del sector de la construcción (Morel, et al., 2021).

En este sentido, el presente apartado analiza las principales normas nacionales e internacionales aplicables a la propuesta del sistema de panel prefabricado compuesto propuesto; se identifican tanto sus alcances como limitaciones frente a tecnologías emergentes. Dentro de este análisis resalta un vacío normativo significativo, lo que hace necesario interpretar, adaptar y articularlas para sustentar su implementación.

Para hacer un análisis integral de las normativas que se estudiaron, se dividió el análisis en las siguientes categorías: ámbito urbano – legal; uso de materiales; desempeño higrotérmico y, por último, sustentabilidad y durabilidad. Si bien en este tipo de investigación sería posible analizar características adicionales, estas categorías sugieren un sustento normativo basado en los objetivos de la investigación.

Ámbito urbano – legal.

Plan de Desarrollo Metropolitano de Hermosillo.

En el caso de Sonora, diferentes organismos sociales, cuerpos académicos, agentes gubernamentales tanto del Estado como del municipio de Hermosillo han comenzado a desarrollar iniciativas y lineamientos para el desarrollo de edificaciones que respondan a las características de la región.

Se utilizan procesos que se acoplen a los sistemas de construcción de una manera más sustentable, tal y como se indica en el Plan de Desarrollo Metropolitano de Hermosillo (PDMH) (IMPLAN, 2017), en su capítulo 4, y punto 4.1.4 “Vivienda”, donde expone en el 2do apartado lo



siguiente: “Establecer lineamientos e incentivos fiscales que propicien la construcción de vivienda sustentable, usando parámetros de diseño bioclimático y eco tecnologías” y en el 4to apartado: “Impulsar vivienda digna con criterios ecológicos y atender deficiencias de la vivienda existente” (IMPLAN, 2017, p. 163). En este contexto, el sistema propuesto se alinea con las directrices del capítulo 4, al proponer el empleo de materiales locales y reducir el impacto ambiental asociado a la construcción.

De igual manera, las directrices que se plantean en el PDMH se alinean adicionalmente a los principios del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (ONU, 2018), en el punto 11, el cual se orienta a la generación de ciudades y comunidades sustentables, a través de soluciones constructivas accesibles, resilientes y de bajo impacto ambiental.

Reglamento de Construcción para el Municipio de Hermosillo.

Como se ha mencionado en repetidas ocasiones, se eligió el sitio de estudio y la ciudad de Hermosillo, Sonora, para la aplicación. Esta región cuenta con características idóneas para la experimentación del uso de la tierra cruda como material de construcción. En el ámbito normativo, el reglamento local no establece lineamientos específicos para el uso de este material; sin embargo, existen parámetros que se pueden abordar al aplicar este material.

De acuerdo con el capítulo “A: Habitabilidad”, sección “III. Confort térmico” art. 4, de la NTC-PA-2018 (IMPLAN & CIDUE, 2018), establece que “con el objeto de asegurar la salud de los ocupantes de cualquier edificación”, se deben de generar las condiciones para mantener el interior de las edificaciones a una temperatura entre 18°C y 27°C “en todo momento en que las temperaturas exteriores se encuentren entre 5°C y 45°C” (p. 14).

A partir de lo anterior, es notable el vacío normativo respecto a los biomateriales; sin embargo, esto no exime del cumplimiento técnico ni de habitabilidad, sino que exige un mayor rigor en el cálculo y la experimentación de la propuesta. De este modo, la propuesta responde ante la discordancia que existe entre las exigencias normativas de confort térmico y la diversificación de los materiales permitidos. En este sentido, la integración de la tierra cruda se posiciona como una estrategia de diseño resiliente, capaz de cumplir con los requerimientos normativos de



habitabilidad por medio de las características propias que brinda este material por sí solo o combinándolo con materiales convencionales.

Código de Edificación de Vivienda.

A través del Código de Edificación de Vivienda (CEV) (CONAVI, 2017), reconoce la evolución tecnológica en la edificación al permitir la implementación de materiales innovadores tras una fase de validación técnica, y gestionar el uso de materiales locales que respondan a las características bioclimáticas locales.

En la sección 3105: “Materiales de construcción” del CEV, se establecen “los requerimientos para la selección y gestión de materiales para la construcción de un proyecto de desarrollo residencial que minimice los posibles impactos al medio ambiente y asegure la seguridad y bienestar de los habitantes” (p. 380), específicamente, en el apartado 3105.3.5 “Materiales de origen natural” se establece que se debe de “favorecer el uso de materiales de origen naturales” (p. 381) especialmente aquellos que cuenten con una certificación nacional o internacional. De la misma manera en el apartado 3105.6 “Materiales regionales”, se indica que se debe favorecer el uso y la compra de materiales de construcción, ya sean de origen natural o no, que se encuentren dentro de un radio no mayor a 800 km.

Estos apartados permiten identificar cómo la normativa mexicana promueve una transición hacia modelos edificatorios bioclimáticos que respondan a las características específicas de las diferentes regiones de la República Mexicana. El reconocimiento de este tipo de materiales por parte de CONAVI brinda una base legal sólida para la propuesta de sistemas constructivos alternativos. Bajo esta línea, la presente investigación se alinea con estas bases normativas, proponiendo un sistema que, mediante el uso de materiales regionales, satisfaga la demanda higrotérmica cumpliendo los criterios de selección y gestión material.

Uso de Materiales.

Norma E.080. Diseño y construcción con tierra reforzada.

Si bien esta norma no tiene una vigencia estricta en territorio nacional, esta norma, de origen peruano, tiene como objetivo establecer requisitos y criterios técnicos de diseño y construcción para edificaciones de tierra reforzada que pueden ser tomadas en cuenta dentro de la



propuesta. Así como conceder durabilidad a las edificaciones de tierra frente a fenómenos naturales o de origen antrópico (ICG, 2017).

La aplicación de la tierra cruda dentro del sistema propuesto deberá contar con una caracterización granulométrica precisa, garantizando una proporción de arcilla óptima según los requerimientos de la técnica de tierra reforzada, tal como se describe en el artículo 5.1: “Requisitos de los materiales para la construcción de edificaciones de tierra reforzada. Tierra” (ICG, 2017, p. 6), para obtener esta verificación se podrán consultar los Anexos 1 (p. 19) y 2 (p. 20), estas pruebas pueden ser contrastadas con los criterios de estabilización sugeridas por Carazas y Rivero (2002, p. 9).

Dependiendo del balance granulométrico, la mezcla empleada puede ser reforzada con aditivos naturales como la paja, en proporción 1 volumen de paja por 5 de tierra o 1:2, según sea el caso. Esta estabilización física, detallada en el artículo 12.4 “Condiciones de la tierra a utilizar” (ICG, 2017, p. 17), busca mitigar la retracción lineal y mejorar la capacidad aislante del elemento constructivo. De la misma manera, se recomienda un proceso de secado controlado y lento para evitar cambios fluctuantes de temperatura y evitar afectar su composición y estabilidad estructural (ICG, 2017, p. 18).

En México, no existe un sustento normativo en cuanto a las condiciones granulométricas con las que se debe de contar para la edificación con tierra cruda, sin embargo, sí existe un procedimiento establecido para realizar este análisis en el manual M-MMP-1-06-03 (2003), este mismo recomienda la obtención del límite plástico y líquido, es decir, los límites de *Atterberg*, siguiendo lo indicado por el manual M-MMP-1-07-07 (2007) a diferencia de la norma E.080, los procedimientos de ambos manuales son realizados en un laboratorio especializado, los valores que se obtienen indican valores técnicos que permiten una caracterización más estricta del material, para su análisis y posible estabilización.

El recurso teórico y práctico que provee la norma E.080 constituye una estrategia de transferencia técnica análoga. Ante la ausencia de una normativa detallada en el territorio nacional para este tipo de sistemas, estas directrices internacionales proporcionan el rigor metodológico necesario para validar la dosificación y el uso de la tierra cruda. De este modo, la investigación integra estos lineamientos como un marco de referencia técnico que legitima el uso de la tierra



cruda, transformándola de un material de construcción tradicional en un componente tecnológico de alto desempeño, alineado con los estándares contemporáneos.

Norma andina para diseño y construcción en bahareque encementado.

Esta norma establece las bases para el empleo de sistemas mixtos, como el bahareque, como principal sistema constructivo en una edificación, es decir, identifica las características técnicas y operativas que este deberá de cumplir, así como se especifican materiales y la compatibilidad entre ellos (INBAR, 2015).

Una de las características más importantes de un sistema mixto es el recubrimiento o enlucido. En general, este tipo de sistemas son cubiertos con revoques de tierra y fibras vegetales, tal como se espera realizar con la propuesta que se presenta en esta investigación. De acuerdo con el punto 5.1.2 “Recubrimiento” de la norma (INBAR, 2015, p. 16), el revoque de tierra puede ser reforzado cuando se aplica sobre malla de alambre galvanizado (pollera hexagonal por lo general), misma que deberá ser anclada al marco del sistema. Al utilizar este refuerzo, la capa del recubrimiento obtiene mayor estabilidad y firmeza que benefician las características de durabilidad del sistema.

Para asegurar la estabilidad del panel, se recomienda que el marco del sistema deberá de contar con un nivel de humedad menor al 19%, el guardar esta cantidad de humedad en el marco o el entramado del sistema se valida la compatibilidad de los materiales al momento de trabajar con ellos (INBAR, 2015, p. 17).

La adopción de la Norma Andina (INBAR, 2015) permite fundamentar técnicamente la interacción entre los componentes del sistema constructivo propuesto. Se subraya que la durabilidad de este tipo de sistemas (mixtos) no depende únicamente de la calidad de la tierra utilizada o su composición granulométrica, sino de la correcta preparación de los soportes y el control higroscópico de los materiales. De igual modo, la integración de mallas de refuerzo, de acuerdo con el punto 5.1.2, establece una medida de mitigación ante patologías constructivas, garantizando una mayor adherencia del revoque y una estabilidad mecánica frente a refuerzos dinámicos a los que puede ser sometido el sistema.



Desempeño Higrotérmico.

NOM- 020- ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones. Envoltante de edificios para uso habitacional.

Tiene como objetivo limitar “la ganancia de calor de los edificios de uso habitacional a través de su envoltante, con objeto de racionalizar el uso de energía en los sistemas de enfriamiento” (Secretaría de Energía, 2011, p. 03). Esta norma se aplica a edificaciones residenciales; para edificaciones no residenciales, se deberá consultar la NOM-008-ENER-2001.

Por medio de diferentes modelos descritos en el Apéndice “B” de la norma, es posible calcular el coeficiente global de transferencia de calor (valor “K”) de la composición de las envoltantes de una edificación no residencial (Secretaría de Energía, 2011, pp. 59-61).

De acuerdo con la propuesta, al ser un sistema mixto, para obtener este valor, es necesario hacer el cálculo tomando en cuenta el núcleo del panel, recubrimientos y los acabados aplicados, de esta manera será posible conocer este valor y realizar la evaluación correspondiente respecto a las condiciones climáticas en Hermosillo. En este tipo de sistemas, el núcleo del panel puede convertirse en el agente clave para obtener el valor de la conductividad térmica (valor K) óptimo para la región.

Si bien, no hay un valor determinado de la conductividad térmica de la tierra cruda, sí existe un valor al interior y al exterior del adobe (exterior: 0.930 W/mK; interior: 0.582 W/mK) en el apéndice “D” (Secretaría de Energía, 2011, p. 73), los cuales se obtuvieron de la NOM-018-ENER-1997. Estos valores funcionan como una referencia en cuanto al uso de la tierra cruda en edificaciones.

Al analizar la norma, es posible comprender que la envoltante debe gestionarse como un sistema dinámico de control térmico. La aplicación del Apéndice “B” de la norma analizada permite cuantificar la eficiencia del panel, transformando la selección material en una decisión basada en el desempeño energético medible.

En este sentido, los parámetros que establece la NMX-C-460-ONNCCE-2009 (ONNCCE, 2009), complementan este análisis debido a que “establece las especificaciones de resistencia térmica total (valor “R”)” (p. 3), de acuerdo con la zona térmica del estado en que se ubique. En el caso de Hermosillo, en la tabla 3, del Apéndice “A” (p. 16) lo establece en la zona térmica 2, lo



cual sugiere que el valor “R” para muros deberá ser de 1.00 como mínimo, 1.10 para considerarse habitable y 1.40 para obtener un ahorro energético (ver tabla 2.- Resistencia Térmica Total (Valor R) de un elemento de la envolvente, del apartado 7. “Especificaciones” de la norma) (p. 9)

Por consiguiente, bajo este análisis, es posible fundamentar que la masa térmica de los materiales de origen natural es capaz de satisfacer los umbrales de transferencia de calor exigidos y de ser necesario es posible buscar una adaptabilidad compatible entre materiales convencionales en combinación con biomateriales, así se posiciona el sistema mixto no solo como una alternativa vernácula, sino como una solución tecnológica de alta eficiencia adaptable a contextos contemporáneos.

Para la obtención de los valores, tanto “K” como “R”, se realizaron ensayos de flama directa amparados por la norma ISO 17025 (2017) como prueba experimental controlada bajo criterios de calidad, repetibilidad y trazabilidad. Con el propósito de conocer los valores reales de la composición propuesta para el sistema que se desarrolla en la presente.

Sustentabilidad y Durabilidad.

NXM-AA-164-SCFI-2013. Edificación Sustentable y Requerimientos Ambientales Mínimos.

Esta norma “especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos de una edificación sustentable para contribuir en la mitigación de impactos ambientales y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales” (Secretaría de Economía, 2013, p. 3). Esta norma es clave para sustentar esta investigación; esto radica en la búsqueda de eficiencia material, abarcando desde el uso de biomateriales, como tierra cruda, hasta componentes convencionales.

La adopción de sus estatutos provee de una base normativa sólida para estructurar la propuesta bajo principios de diseño sustentable y la optimización de recursos, de esta manera, se alinea el desarrollo del panel tipo sándwich de la propuesta con estándares nacionales de calidad ambiental.

Uno de los puntos que deben ser considerados de esta norma es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). En el apartado 5.2.4 “Materiales y Residuos” (Secretaría de Economía, 2013, p. 44), se indica que la selección de los materiales debe considerar los impactos ambientales, sociales y económicos a lo largo de su ciclo de vida. El usar tierra cruda se considera como uso de material



local y de bajo procesos, de esta manera, como se explica en el marco teórico, se reduce considerablemente la energía embebida del sistema propuesto.

En la presente investigación no se realizó el desarrollo del ACV de la propuesta del prototipo, sin embargo, se alienta que de manera complementaria este pueda ser realizado bajo las normas NMX-SAA-14040-IMNC (2009) y NMX-SAA-14044-IMNC (2009) las cuales son equivalentes a las ISO-14040 e ISO-14044 respectivamente.

La normativa incentiva que al menos el 10% de los materiales empleados sean reutilizados o reciclados, esto se puede identificar en el apartado 5.2.4.6 (Secretaría de Economía, 2013, p. 46). Además, así como lo indica el CEV (CONAVI, 2017), se favorece el uso de materiales producidos en un radio igual o menor que 800 km, esto con el propósito de incentivar el uso de materiales locales y reducir el impacto de las emisiones por transporte.

Por otra parte, en el apartado 5.2.5.3 “Calidad del Ambiente Interior” (Secretaría de Economía, 2013, p. 54), se especifican lineamientos sobre la calidad del espacio habitable. En el punto 5.2.5.3.1 se indica que las edificaciones deberán contar, de manera garantizada, temperaturas interiores entre 18°C y 25°C, favoreciendo soluciones bioclimáticas sobre las mecánicas.

NMX C-228-ONNCE-2010. Industria de la Construcción - Materiales Termoaislantes- Determinación de la Adsorción de Humedad y Absorción de Agua

Una de las patologías más críticas en el uso de la tierra cruda y otros biomateriales es su limitada resistencia a la exposición directa al agua (Minke, 2005). Esta vulnerabilidad no solo provoca inestabilidad en la configuración de las mezclas, sino que compromete directamente sus propiedades mecánicas y estructurales

Ante este escenario, resulta imperativo cuantificar la capacidad de absorción de los elementos que conforman la envolvente, con el fin de determinar los métodos de protección más adecuados, ya sea mediante la incorporación de aditivos hidrófugos naturales o sintéticos o la aplicación de acabados especializados, como los revestimientos a base de cal (Minke, 2025).

En este sentido, la norma NMX C-228-ONNCE-2010 (ONNCE, 2014) fundamenta la implementación de estrategias de diseño pasivo como requisitos técnicos de carácter obligatorio y no meramente estético, garantizando así la preservación del material ante la incidencia pluvial. Asimismo, el análisis de los niveles de absorción bajo esta normativa basado en el método de



Karsten (Karsten, 1997) orienta con rigor científico la selección de aditivos y recubrimientos finales.

De este modo, la NMX-C-228-ONNCE-2010 se consolida como un instrumento de control de calidad esencial para mitigar las patologías intrínsecas de la tierra, transformando un recurso tradicional en un componente de ingeniería confiable, durable y apto para su estandarización en el contexto regional.

ISO 7892. Elementos constructivos verticales — Ensayos de resistencia al impacto — Cuerpos de impacto y procedimientos generales de ensayo

La durabilidad de las edificaciones de tierra se ha mantenido en la mesa de debate durante mucho tiempo, esto debido a la serie de prejuicios que provinieron con la transición industrial hacia el concreto y el acero durante el siglo XX (Fernández-Ordóñez & Fernández Gómez, 2009). Muchos usuarios y constructores temen que el rece constante o los impactos leves acumulados generen desprendimientos o debilite el sistema, comprometiendo su durabilidad; al mismo tiempo, existe un temor ante golpes directos pensando que se fracturará o se desmoronará instantáneamente.

Cada uno de estos miedos o prejuicios es justificado; la mayoría de las antiguas construcciones con tierra cruda que sobreviven hoy día se han desmoronado debido a la falta de mantenimiento y las condiciones climáticas a las que se han expuesto durante su ciclo de vida. Incluso, en el contexto actual, al voltear a ver los pueblos locales del país, es posible edificaciones de tierra con diferentes daños lo que genera un imaginario de inestabilidad y desconfianza hacia estos sistemas (Fernández A. , 1994).

Bajo este contexto, es necesario identificar las necesidades normativas en cuanto a la estabilidad física de los elementos de las envolventes. En México, existe normativa que evalúa características estructurales de sistemas de mampostería confinada como la NMX-X-404-ONNCCE-2012 y la NMX-C-036-ONNCCE-2013, además de la NMX-C-405-ONNCE-2014 para evaluación de paneles estructurales.

Debido a que el sistema de panel propuesto no tiene características estructurales de carga, las normas anteriores pueden funcionar como marco de referencia en futuras líneas de investigación y de apoyo a esta; sin embargo, en cuanto a la evaluación de impactos directos que



comprometan su durabilidad, en el contexto normativo mexicano no existe un procedimiento estandarizado que regule la evaluación de resistencia al impacto en elementos de la envolvente. No obstante, de acuerdo con el Reglamento de Construcción de Hermosillo, (IMPLAN & CIDUE, 2018) establece que los sistemas constructivos deben garantizar la seguridad frente a acciones dinámicas durante su vida útil. En este sentido, la evaluación experimental ante los impactos resulta necesaria para validar el desempeño del sistema propuesto.

Ante el vacío normativo expuesto, la ISO 7892 (1988) surge como una guía clara de los procesos de ensayo y evaluación ante los impactos en elementos verticales (aplicable a muros) de una edificación. En este sentido, la norma define los cuerpos de impacto convencionales utilizados para reproducir el efecto de impactos reales.

Para llevar a cabo la simulación, la norma clasifica los impactos en tres categorías en el punto 2 “Tipos de impacto” (pp. 1-2): Cuerpos duros (500 ± 5 g o $1,000 \pm 10$ g.): representan objetos no deformables como el roce de un mueble o lanzamiento de objetos; Cuerpos blandos pequeños (3 ± 0.03 kg): simulan el impacto de un cuerpo humano en un área pequeña (golpe de puño o rodilla) o de objetos deformables pequeños (como un balón) y Cuerpos blandos grandes (50 ± 0.05 kg): representan el impacto de un cuerpo humano sobre un área amplia, como una caída o un golpe con el hombro.

En conclusión, ante la inexistencia de un procedimiento estandarizado en la normativa mexicana para la evaluación de resistencia al impacto en envolventes, la adopción de la norma ISO 7892 resulta imperativa para validar la integridad del sistema propuesto. Esta metodología permite transitar de una apreciación cualitativa a una verificación empírica de la seguridad frente a acciones dinámicas, cumpliendo así con las exigencias generales del Reglamento de Construcción de Hermosillo (IMPLAN & CIDUE, 2018). La clasificación de impactos proporciona un marco de referencia objetivo para asegurar que los paneles de tierra cruda no solo satisfagan criterios térmicos, sino que posean la resiliencia mecánica necesaria para salvaguardar la habitabilidad y durabilidad de la edificación durante su vida útil.

Conclusión normativa.

La alineación de la propuesta con los criterios antes mencionados consolida la viabilidad normativa del panel tipo sándwich de tierra cruda bajo tres dimensiones estratégicas: la



sustentabilidad, el desempeño bioclimático y el confort higrotérmico. Esta normativa proporciona la estructura necesaria para que los procesos de integración de la tierra cruda, como material base de construcción, se integren de manera formal en los procesos de edificación sustentable, asegurando su competitividad en el mercado y su pertinencia ante los retos climáticos de la región de Hermosillo.

A través de este marco normativo, es posible identificar lo imprescindible que es el establecimiento de normativas, así como controles de calidad tanto al sistema constructivo como al material, así como a su proceso operativos de sistemas o materiales en base a tierra cruda (Gatti, 2012).

De manera conjunta, estas normativas incentivan el desarrollo de edificaciones sustentables y la aplicación de materiales y estrategias constructivas que respondan a las diferentes regiones, tal como la tierra cruda u otros biomateriales como el carrizo. Sin embargo, es evidente que la propuesta del panel se encuentra en la intersección entre normativas consolidadas y vacíos regulatorios, enfrentando limitaciones derivadas de la ausencia de estándares específicos para sistemas prefabricados de tierra cruda.

Si bien México aún carece de un marco normativo específico para la tierra cruda, la creciente demanda por sistemas de bajo impacto ambiental ha posicionado este tema como una prioridad en la agenda de normalización. En este contexto, la presente investigación utiliza la normatividad expuesta como un soporte sólido para estructurar la propuesta técnica, demostrando que la tierra puede alinearse a las exigencias de calidad y seguridad actuales a pesar de la falta de un reglamento dedicado exclusivamente a su ejecución.

La discusión sobre sus beneficios ambientales, económicos y sociales, junto con la evaluación de sus propiedades térmicas dentro de manuales técnicos, contribuyen a su validación como un material relevante para la construcción de vivienda sustentable en México, especialmente en climas tan extremos, como el de Hermosillo, Sonora, donde las propiedades térmicas, en este caso del uso de la tierra cruda, son ideales para mitigar las altas temperaturas y con ello disminuir el consumo energético al tratar de mitigarlas por medio de sistemas activos de climatización.



Evaluación de los sistemas constructivos. Indicadores de evaluación de sustentabilidad.

Tras la recopilación de técnicas y sistemas mostrados, es pertinente identificar un proceso de evaluación a partir del contexto de Hermosillo, Sonora. De esta manera, es posible identificar qué elementos y/o características respondan al contexto de la ciudad de estudio. Para esto, se realizó una interpretación del método de evaluación de sistemas constructivos para vivienda de bajo costo definido por Juan Monjo Carrió (1986) haciendo hincapié en los parámetros relacionados con el análisis de adecuación tecnológica e innovación material que son propios del interés de la presente investigación. Los cuales se presentan agrupados en tres grandes grupos: ambientales, tecnológicos y sociales y de sustentabilidad, ordenado bajo el esquema presentado en la **Tabla 6**:

Tabla 6

Indicadores de Sustentabilidad que aplican a la propuesta proyectual.

Flujos Térmicos							
Indicadores Ambientales			Indicadores Tecnológicos			Indicadores Sociales y de Sustentabilidad	
Comportamiento frente a acciones antrópicas	Comportamiento Climático	Comportamiento contra el fuego	Materias Primas	Materiales	Durabilidad y Mantenimiento	Ciclo de vida: residuos de materias primas.	Aceptación social: Identificación Cultural
	Inercia Térmica			Versatilidad			

Nota: Tabla realizada a partir de lo expuesto por Zazu de (2021) y Monjo (1986) Se determina que el uso de estos indicadores abarca de manera íntegra una sana evaluación para la propuesta de esta investigación, abarcando puntos clave para el desarrollo de esta.

Indicadores Ambientales

Estos indicadores tienen como objetivo evaluar la adecuación del sistema constructivo al contexto inmediato del emplazamiento de la edificación. En el caso de esta investigación, se tomarán 3 indicadores de esta sección:

- **Comportamiento frente a acciones antrópicas:**

Este parámetro hace relación con las acciones directas que las personas puedan tener sobre el sistema, especialmente aquellas relacionadas con el intrusismo, teniendo en cuenta la importancia de la seguridad que es necesaria para las edificaciones. Los sistemas con un entramado más sólido dificultan la perforación de los muros, considerándolos más seguros (Zazu Vives, 2021). A continuación, se presentan los puntos a evaluar dentro del indicador:

- Fácil penetración al interior (mala resistencia al impacto). = 1



- Penetración media al interior (buena resistencia al impacto, entramado ligero) = 3
- Poca posibilidad de penetración al interior (buena resistencia, a partir de un entramado opaco) = 5

- **Comportamiento climático:**

Este parámetro evalúa la adecuación ante los agentes naturales que ponen en riesgo la integridad del sistema constructivo, tales como la acción de la lluvia, el sol y el viento. En este caso, derivado de los objetivos de la investigación, se limitará a la evaluación del comportamiento respecto a la inercia térmica. A continuación, se presentan los puntos a evaluar dentro del indicador:

- Inercia térmica baja (interior hueco) = 1
- Inercia térmica media (espesor de relleno $e < 18$ cm) = 3
- Inercia térmica alta (sistema con un aplanado poroso, espesor de relleno $e > 18$ cm) = 5.

- **Comportamiento frente al fuego:**

Identificar como los materiales minerales como la tierra, cal, yeso y cemento mejoran el comportamiento frente al fuego de las estructuras con alma de EPS y paja y armados como el carriz. Estos sistemas adoptan una resistencia importante ante el fuego, siempre y cuando la estructura o los armados estén recubiertos (Monjó Carrió, 1986). Los puntos por evaluar de este indicador son los siguientes:

- Mal comportamiento frente al fuego (estructura expuesta) = 1
- Buen comportamiento frente al fuego (estructura recubierta con aplanado uniforme sin dejar estructura expuesta). = 5

Indicadores Tecnológicos.

Estos indicadores tienen como objetivo evaluar la adecuación tecnológica del sistema, ponderando y valorando los procesos de innovación en los sistemas de construcción mixtos con tierra (Zazu Vives, 2021). En el caso de esta investigación, se tomarán 3 indicadores de esta sección:



- **Materias Primas:**

Se hace una evaluación de la capacidad del sistema de adaptarse con facilidad e inmediatez a las materias primas locales. Se valora positivamente la facilidad con la que puedan realizarse los sistemas con especies y recursos locales, para de esta manera reducir el transporte y los niveles de emisiones de GEI. Se pondera en este indicador lo siguiente:

- Uso de materiales importados = **1**
- Uso de general de materiales locales = **3**
- Uso íntegro con materiales locales = **5**

- **Materiales:**

El empleo de materiales locales reduce tanto el precio sino también favorece el mercado y la producción local, reduciendo el impacto ambiental. En este parámetro se evalúa entonces la capacidad de adaptación que posee el sistema constructivo respecto a la oferta material de la zona.

- Sin posibilidad de adaptación = **1**
- Adaptación media= **3**
- Elemento versátil = **5**

- **Durabilidad y mantenimiento:**

Para la evaluación de este parámetro, es importante tener en cuenta que los sistemas mixtos poseen una necesidad de mantenimiento, de acuerdo con los materiales empleados en su fabricación. Este parámetro no señala las diferencias entre los sistemas, sino entre los insumos empleados para la ejecución del sistema, por lo que es complicado hacer una evaluación cuantitativa, sino más bien, deberá ser de carácter cualitativo.

Indicadores sociales y de sustentabilidad.

Estos indicadores reflejan uno de los factores de la sustentabilidad más importantes y por medio del cual muchos de los procesos pueden ser aceptados o denegados. El carácter social de la propuesta debe de estar enfocada en la aceptación cultural y que coincida con el empleo de elementos que la población encuentre útiles y familiares (Solórzano-Gil, 2015) . Para este indicador, se analizarán los siguientes parámetros:



Ciclo de vida: residuos de materias primas

El ciclo de vida de un material abarca todas las fases en las que se interviene el mismo, incluida las fases posteriores a su utilización como material de construcción (Casas Figueroa, 2011). Debido a que la mezcla de diferentes materias primas dificulta el proceso de reciclaje, se valoran los sistemas que mantengan inalteradas las características del material de origen. Se ponderan entonces los siguientes parámetros:

- No es posible su reutilización o su reciclaje es mínimo = **3**
- Se recicla + 50% del sistema = **5**

- **Aceptación social: identificación cultural:**

Se valora la capacidad del sistema de adaptarse a los procesos constructivos regionales de Hermosillo, Sonora.

- Adaptabilidad baja a sistemas constructivos = **3**
- Alta adaptabilidad a los procesos constructivos = **5**



Metodología.

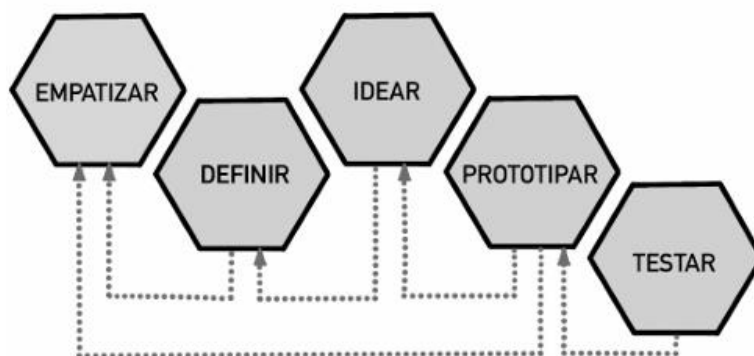
En este apartado se desarrolla el proceso metodológico que se llevó a cabo para la generación de la propuesta del sistema mixto (panel) tipo sándwich que tiene como objeto la presente investigación.

El desarrollo de propuestas enfocadas en la innovación de productos o procesos actuales requiere de sistemas metodológicos tanto cuantitativos como cualitativos de manera que sea posible satisfacer necesidades tanto técnicas como la experiencia del usuario (Cabrero, 2022). Para lograr este enfoque se opta por el desarrollo de un marco metodológico mixto que expande los principios de las metodologías de *Design Thinking* y se integra con técnicas de *Prototipado Rápido*.

Para comenzar a definir el proceso metodológico propio de la investigación, es importante definir de manera sintética en qué consisten los procesos aplicados. En primer lugar, el *Design Thinking* corresponde a un modelo metodológico, que, por medio de la “asimilación de distintas entradas – *inputs* dentro de un proceso colectivo se intercalan procesos para la creación de nuevos escenarios” (Oca, 2025, p. 180) centrándose más en el proceso de diseño en vez del producto resultante “integrando conocimientos provenientes de distintos campos epistémicos” (p. 180).

De acuerdo con Cabrero (2022), la metodología del modelo *Design Thinking*, se divide en cinco fases: 1) Empatizar: Observar y comprender la necesidad del usuario; 2) Definir: Identificar la información recopilada que aporta un valor significativo al proceso de innovación; 3) Idear: Generación de ideas y opciones claves que moldee la información seleccionada; 4) Prototipar: Construcción de prototipos que permite la visualización de las ideas concebidas y 5) Testear: Los prototipos son puestos a prueba con los usuarios implicados, de esta manera, se identifican áreas de mejora de la propuesta. Cada una de estas etapas sucede en un proceso iterativo no secuencial, el cual permite una interacción más libre entre las fases dando la oportunidad de saltar de una a otra con libertad dependiendo de los resultados que se vayan obteniendo hasta obtener los esperados (ver **Figura 38**).



Figura 38*Proceso de aplicación de Design Thinking.*

Nota: Imagen recuperada de Cabrero (2022, p. 27). Se muestra el resumen del proceso de *Design Thinking* según la Universidad de Stanford, 2005, resaltando el proceso no secuencial de la metodología.

El segundo proceso aplicado en esta investigación es el *Prototipado Rápido*, el cual complementa las fases que presenta *Design Thinking*. El prototipar permite materializar una idea y comprobar su viabilidad. En el contexto actual de la construcción y la arquitectura esto se convierte en un factor clave que permite hacer las correcciones necesarias para obtener una solución final (Fernández M. , 2020).

Para el estudio y generación de los prototipos, estos deben hacerse a través de cuatro perspectivas diferentes (Beaudouin-Lafon & Mackay, 2002): 1) Forma: Define la naturaleza del prototipo, si este es físico, digital o un producto multimedia; 2) Fidelidad: Indica el nivel de detalle y funcionalidad del prototipo; 3) Interactividad: Ilustra la capacidad del prototipo para interactuar con él, se clasifican en prototipos fijos, de camino fijo y abiertos, cada uno con un nivel de interacción determinada; por último 4) Evolución: Se refiere a su proceso en el tiempo de creación, desarrollo y culminación. Cada una de estas perspectivas permite determinar la capacidad del prototipo e iterar con sus parámetros para la obtención de diferentes alcances.

En este sentido, el prototipo se convierte no solo en un producto de investigación, sino en un instrumento de aprendizaje que permite materializar soluciones (Fernández M. , 2020). El prototipado rápido alimenta el carácter iterativo del *Design Thinking*. Al no tratarse de un proceso lineal, las herramientas de aplicación tienden a ampliarse; en este caso se aplican herramientas de modelado digital y generación física. El uso de sistemas de modelado digital permite iteraciones más íntimas entre el diseño, el análisis y la producción dando como resultado una gestión y eficacia



en la producción física del prototipo (Soler, 2007), es decir, se vinculan y complementan para la obtención de productos más precisos, sin la necesidad de generar prototipos con alto detalle.

La inclusión del prototipado rápido en esta investigación permite visualizar de manera más tangible la propuesta diseñada, vinculando los parámetros obtenidos por revisión académica y la práctica constructiva actual, siendo la base para la ejecución de ensayos prácticos que comprueban la viabilidad en el contexto climático y constructivo de Hermosillo, Sonora.

Este enfoque establece un proceso iterativo de diseño donde se rescata la opinión y la consciente experiencia en los campos de la edificación al usuario ejecutor (arquitectos, ingenieros, obreros), así como las referencias académicas en sistemas de bioconstrucción y el marco normativo (Cabrero, 2022) con el propósito de la generación de iteraciones por medio de modelos digitales y físicos para su estudio (Soler, 2007). Por ende, este modelo metodológico permite la obtención de datos cualitativos y cuantitativos que brindan el lineamiento de variables y estándares críticos necesarios para la ejecución técnica y funcional de la propuesta.

En este sentido, la decisión de tomar en cuenta a los usuarios ejecutores, las referencias académicas y normativas radica en comprender que, tal como lo expone Morel et al. (2021), la aceptación de la tierra cruda en los procesos constructivos actuales se encuentra obstaculizada debido principalmente a barreras técnicas y operativas; esto se debe tanto al desconocimiento de las técnicas como a una débil o nula transición de las técnicas vernáculas que permitan adaptarlas al contexto contemporáneo. Campos que, desde finales de la década de los 90, la academia ha incrementado su estudio para incentivar la transición tecnológica, pero sin permear adecuadamente (Morel, et al., 2021).

Bajo este argumento y una vez analizado los procesos metodológicos aplicados, se diseñó un modelo metodológico mixto que extrae de cada uno de los procesos fases esenciales que permite la generación de una propuesta más afín a las necesidades constructivas, técnicas, higrotérmicas y ambientales de Hermosillo, esta se estructura en un total de cinco fases, combinadas entre las que proporcionan tanto *Design Thinking* y *Prototipado Rápido*: 1) Empatía; 2) Definición; 3) Ideación (aplicación paramétrica); 4) Prototipo Físico y 5) Validación. Si bien estas fases empatan con la base de *Design Thinking*, las herramientas de *Prototipado Rápido* se incluyeron a partir de la Fase no. 3. Cada una de estas fases se desarrolla de acuerdo a lo descrito a continuación.



Fase 01: Empatía (*Design Thinking*).

En esta primera fase, se retoma la postura hecha por Morel et al. (2021), en donde refiere que, para que exista una transición tecnológica de la construcción con tierra, es necesario un acercamiento al usuario ejecutor.

Se define como usuario ejecutor a: arquitectos, ingenieros, residentes y obreros, es decir, personal en constante contacto con el contexto de edificación desarrollado en Hermosillo, Sonora. Se ha procurado un equilibrio entre profesionistas y obreros dedicados a proyectos habitacionales y comerciales con un mínimo de cinco años en el campo de la construcción y el desarrollo de proyectos

A este grupo se aplicó un modelo de encuesta estructurada (ver **Anexo 1**) con el objetivo de comprender la relación existente del gremio con los sistemas constructivos prefabricados convencionales en cuatro rubros principales: 1) Experiencia con sistemas prefabricados; 2) Factores que tomar en cuenta, respecto a durabilidad; 3) Operatividad de los sistemas (incluyendo mano de obra) y 4) Percepción de uso de la tierra cruda en la construcción. Estos rubros fueron establecidos, de acuerdo con Oca (2025), quien especifica la importancia de la asimilación de distintas perspectivas que puedan ser intercaladas en el proceso de la innovación.

Para la aplicación de la encuesta estructurada se utilizó la herramienta “Formularios” que brinda la plataforma de *Google* bajo el título “Percepción de los Sistemas Constructivos Prefabricados y el Uso de la Tierra en la Construcción”. Se difundió a través de las redes sociales *Facebook*, *Instagram* y *WhatsApp*, por medio de la siguiente liga: <https://forms.gle/Ug6UfdEm2UwK3ivY6>, en grupos dedicados al diseño y a la construcción, de manera puntual, se extendió la invitación a los miembros del Colegio de Arquitectos de la Ciudad de Hermosillo y la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (región Sonora).

Este modelo permitió la obtención de datos cualitativos que brindan el lineamiento de variables y estándares críticos necesarios para la ejecución técnica y funcional de la propuesta. Mismo que fueron contrastados con especificaciones técnicas, el marco teórico y el estado del arte de esta investigación para hacer una correcta interpolación de los resultados para adaptarse al contexto climático de la región de Hermosillo, Sonora.



Fase 02: Definición (*Design Thinking*).

En esta fase, se busca establecer una relación epistemológica de los conocimientos empíricos y académicos referentes a la construcción con sistemas prefabricados en el contexto de Hermosillo, Sonora.

Una vez analizada y procesada la información obtenida a través de las encuestas, se definieron lineamientos y bases esenciales del sistema a desarrollar apoyadas en el marco teórico y el estado del arte descritos anteriormente. De esta forma, se organizó y analizó la información para obtener una claridad sobre los desafíos que enfrenta la propuesta de acuerdo con los rubros planteados en la Fase 01: Empatía.

Esta información fue organizada en la tabla que se encuentra en **Anexo 2** a partir de una jerarquización de variables, de acuerdo con lo que analiza CRATerre (2022), clasificándola en función de su relevancia para el sistema constructivo. Las variables consideradas son:

1. **Variables críticas:** resistencia estructural, durabilidad
2. **Variables de desempeño:** capacidad térmica, peso
3. **Variables de sostenibilidad:** emisiones de CO₂, uso de materiales locales
4. **Variables operativas:** facilidad de montaje, tipo de mano de obra

Esta jerarquización permite orientar la toma de decisiones durante el proceso de diseño y priorizar aquellos aspectos que inciden directamente en la viabilidad del sistema. Al alinear los hallazgos con el contexto, es posible empatar la propuesta técnica directamente con las necesidades del usuario ejecutor y generar la base teórica para el desarrollo de una propuesta más integral.

Fase 03: Fase de ideación y generación de opciones paramétricas (*Design Thinking* + Prototipado Rápido).

Esta fase corresponde al proceso de ideación y desarrollo del panel, en el cual se materializan los criterios de diseño definidos en la fase anterior. En esta fase se generan las características del diseño enfocadas en: la definición del módulo, el estudio del tipo de entramado, la aplicación de refuerzos en paredes exteriores y el tipo de núcleos utilizados en el sistema.



Definición de módulo.

La determinación de las dimensiones del módulo a trabajar resulta de una triangulación de datos obtenida a partir de dos fuentes:

La primera es del análisis de la consulta a los usuarios ejecutores, fundamentándose en la comparación de las respuestas de la encuesta estructurada aplicada. Estos resultados permiten identificar las dimensiones óptimas para la operatividad en sitio, la facilidad de montaje y la compatibilidad con los procesos constructivos locales de acuerdo con la experiencia empírica que responde a la realidad de la edificación actual.

Esta información se complementa y analiza con un estudio de mercado de sistemas prefabricados, donde se hace un análisis comparativo de módulos existentes ofertantes de sistemas de paneles tipo sándwich o similares en el mercado actual. De esta manera, es posible alinear la propuesta con los estándares comerciales, asegurando que esta sea desarrollada bajo una integración compatible.

El módulo resultante funciona como el marco de referencia para el desarrollo del resto de las características del sistema.

Estudio de entramado.

Se realizó mediante herramientas de diseño paramétrico, con lo cual, se buscó maximizar la funcionalidad y adaptabilidad del sistema a partir de un proceso de iteraciones que permitieron explorar, simular y optimizar configuraciones geométricas del entramado exterior del panel, cuidando el factor de complejidad geométrica vs viabilidad constructiva que Kolaveric (2001) advierte debe cuidarse para mantener la propuesta vinculada a la factibilidad material y constructiva.

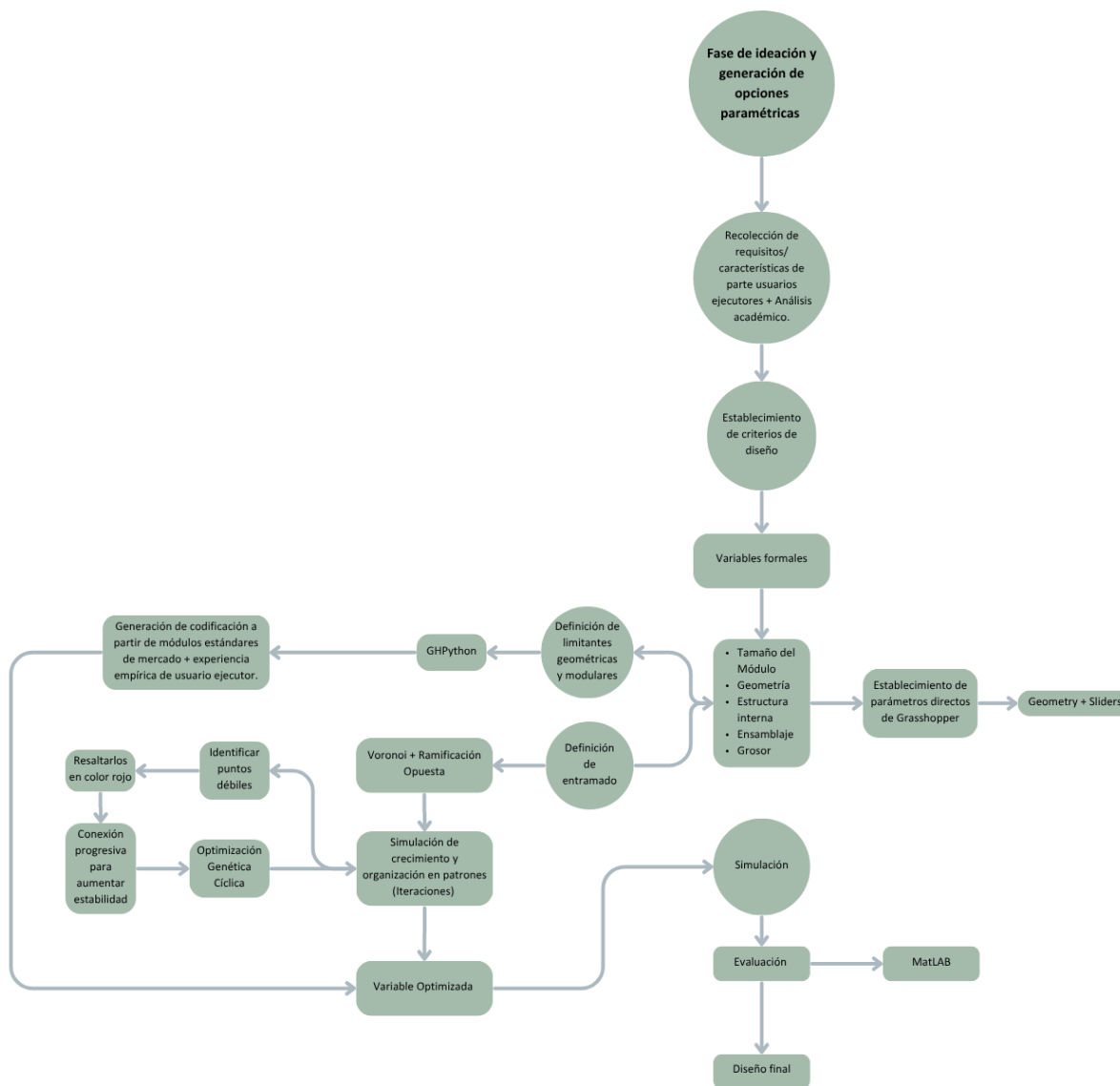
Para ello, se utilizaron software especializados de diseño paramétrico tales como *Rhino 7* con *Grasshopper*. Se desarrollaron *scripts* (codificaciones) que permitieron establecer variables en relación entre las opciones de entramados (caras exteriores) analizados, en este caso, como se establece en el marco teórico, se analizan el sistema voronoi y la ramificación opuesta. El proceso que se siguió se resume en la

Figura 39.



Figura 39.

Diagrama base del proceso de diseño.



Nota: El diagrama presentado describe de manera estructurada el flujo de trabajo correspondiente a la Fase 03: Fase de ideación y generación de opciones paramétricas. El proceso se articula desde la recopilación de datos cualitativos y técnicos hasta la obtención de un diseño final validado mediante simulación.

Como se describe en el diagrama anterior, el proceso de diseño paramétrico se convierte en un proceso iterativo. Tanto la cantidad de iteraciones como de especificaciones se basan en un sistema de interactividad de prototipo de camino fijo (Fernández M. , 2020), estos se desarrollaron de la siguiente manera:



- **Voronoi:** Se generaron 9 iteraciones, variando densidad y distribución de los puntos. Se seleccionaron 3 configuraciones preliminares, de las cuales se toma 1 configuración final basada en el equilibrio entre resistencia potencial y viabilidad constructiva.
- **Ramificación Opuesta:** Se generaron 9 iteraciones, definiendo una red jerárquica de ramificaciones que optimiza la distribución de esfuerzos. Así mismo, se seleccionaron 3 configuraciones preliminares, de las cuales se toma 1 configuración final, basada en la mejor optimización de esfuerzos y viabilidad constructiva.

Evaluación estructural y de viabilidad de entramados.

Para el proceso de evaluación del entramado, de cada una de las iteraciones, se prepara un modelo estructural que pueda ser analizado por medio de MATLAB, este modelo de análisis responde a la Norma Andina para Diseño y Construcción en Bahareque Encementado (INBAR, 2015), donde se estudian las características de integridad estructural y de ductilidad de los entramados para sistemas mixtos de tierra y se estudia la aplicación de refuerzos metálicos en los recubrimientos de estos para mejorar la capacidad estructural, de la misma forma, este análisis se enfoca en cumplir con los estados límite que se exponen en los artículos 34 y 35 de la NTC-PE-2018. (IMPLAN & CIDUE, 2018).

Para el estudio de los entramados se tomaron en cuenta las características granulométricas de la tierra de la muestra M-02 considerada como una arena arcillosa (SC), de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM International, 2017) obtenidas durante la ejecución de la Fase 04 de la presente metodología. Esto es posible de realizar, debido a que la presente metodología, como se mencionó al principio de este capítulo, no responde a un proceso estrictamente secuencial. En este sentido, es posible la implementación del análisis por medio de MATLAB durante esta fase de evaluación y estudio del entramado.

El proceso permitió simular de manera controlada las diferentes configuraciones de entramado; para ello, se siguió el siguiente proceso:

- **1. Definición del modelo estructural:** Se conceptualizó como un elemento compuesto multicapa, conformado por una matriz de tierra (SC) estabilizada con fibra vegetal (trigo + fibra vegetal), un entramado interno (carrizo) donde se embebe la matriz de tierra y un refuerzo superficial opcional de malla pollera hexagonal (la elección de los



materiales se desarrolla más adelante en esta fase). Este enfoque permitió modelar el entramado como parte de una sección compuesta, donde cada material aporta propiedades específicas (rigidez, resistencia y capacidad de deformación), mismas que interactúan mediante mecanismo de adherencia física y transferencia de esfuerzos.

- **2. Caracterización de materiales:** Se definieron las propiedades mecánicas de los materiales a partir de correlaciones teóricas y literatura especializada, revisada en el marco teórico, principalmente se revisa a Gernot Minke (2005), Wilfredo Carazas (2002) y Fabio Gatti (2012), de los cuales se obtienen los parámetros geotécnicos del suelo, el comportamiento del compuesto tierra – fibra mediante modelos de materiales compuestos y las propiedades equivalentes del refuerzo, tanto el carrizo como la malla. Estas variables se integraron como variables de entrada dentro del modelo; esto permitió una evaluación en distintos escenarios sin modificar la lógica estructural.
- **3. Formulación del modelo mecánico:** El comportamiento estructural del panel se evaluó bajo los siguientes escenarios:
 - Teoría de flexión de elementos compuestos, considerando la interacción entre capas.
 - Cálculo de rigidez flexional equivalente a partir de la transformación de secciones.
 - Evaluación de esfuerzos normales (tracción/compresión) y esfuerzos cortantes.
 - Análisis de deflexión fuera del plano bajo cargas distribuidas.
- **4. Simulación de condiciones de carga:** Se definieron escenarios de carga representativos del contexto de Hermosillo, Sonora, basados en la NTC-PE-2018. (IMPLAN & CIDUE, 2018), Incorporando cargas laterales por viento, cargas equivalentes por acción sísmica y peso del propio sistema. Se evalúa el comportamiento del panel bajo condiciones críticas de servicio.
- **5. Evaluación de desempeño estructural:** El modelo permitió analizar múltiples indicadores estructurales, tales como:
 - Rigidez del sistema.
 - Deformaciones máximas.
 - Distribución de esfuerzos en cada componente.
 - Riesgos asociados a modos de falla (flexión, cortante, pandeo, retracción)



De igual manera, se incorporaron criterios de verificación mediante factores de seguridad, permitiendo establecer condiciones de aceptación del sistema, de acuerdo con la NTC-PE-2018 (IMPLAN & CIDUE, 2018).

El análisis en MATLAB se integra dentro del proceso del estudio de entramado como una herramienta de validación previa al prototipado físico desarrollado en la Fase 04. Esto parte desde comparar configuraciones geométricas desarrolladas a partir del Voronoi vs la Ramificación Opuesta, la evaluación del efecto del refuerzo, es decir, con malla y sin malla metálica y por último identificar las configuraciones con mayor eficiencia estructural vs viabilidad constructiva. En este sentido, la simulación numérica funcionó como un filtro de diseño, reduciendo las incertidumbres antes de la fase experimental y optimizando la selección de prototipos a fabricar.

Traducción del modelo digital al sistema constructivo.

Una vez seleccionadas las geometrías y composiciones finales, se realiza su traducción a un sistema físico donde se consideró: adaptación de las geometrías a un entramado de carrizo en lata (tiras de 1 cm de grosor), definición de nodos de unión y simplificación de geometrías complejas para su ejecución manual.

Selección de materiales del sistema.

La selección de materiales del sistema propuesto en esta investigación se desarrolló a partir de un enfoque mixto que integra tanto los criterios definidos en la Fase 02 como la concepción general del proyecto, donde se establece el uso de la tierra cruda como material base del sistema.

Desde esta perspectiva, el uso de la tierra cruda no constituye una variable a evaluar dentro del proceso experimental, sino una premisa que fundamenta la investigación. A partir de esta base, la Fase 02 permitió definir los criterios técnicos de selección de materiales complementarios, tales como (Astillado Cordero & Vacacela Albuja, 2015): reducción de peso del sistema, mejora del comportamiento térmico, incremento de la resistencia mecánica y viabilidad constructiva.

Bajo estos criterios, y respetando lo descrito al comienzo de esta investigación, donde se aborda la innovación en la materialidad de los sistemas mixtos de tierra, se seleccionaron los siguientes componentes:



- Tierra cruda local, obtenida de un banco de tierra ubicado al norponiente de la ciudad de Hermosillo, Sonora.
- Fibra vegetal, como elemento de refuerzo y aligeramiento. Se utilizó paja de trigo cristalino (*Triticum turgidum* subsp), procedente del desecho generado por la producción del trigo en Sonora.
- Carrizo, como estructura interna base de las caras exteriores del sistema, debido a su ligereza y comportamiento mecánico.
- Cal, como estabilizante para mejorar la durabilidad frente a la humedad.
- Núcleos o almas del sistema. A base de poliestireno expandido (EPS) así como de fibra de paja de trigo (misma especie que el empleado como aligerante en la mezcla) definidos como variables comparativas en el desempeño térmico y ambiental. El EPS no se incorpora como material predominante, sino como un componente estratégico que permite mejorar el desempeño térmico y reducir el peso del sistema, contribuyendo indirectamente a la disminución del impacto ambiental global del panel.

De esta forma, los materiales empleados responden a la articulación entre la postura conceptual y criterios técnicos derivados del análisis metodológico, garantizando coherencia entre los objetivos de sostenibilidad, desempeño y viabilidad constructiva del sistema.

El proceso descrito, permite generar soluciones que no solo son innovadoras desde el punto de vista formal, sino también viables, replicables y evaluables experimentalmente, sentando las bases para la fase de prototipado y validación (Kolarevic, 2001).

Fase 04: Prototipado físico inicial (Prototipado rápido).

Una vez seleccionados los modelos paramétricos a desarrollar, se comenzó a estudiar el proceso de fabricación de los prototipos físicos, con el propósito de evaluar la viabilidad de la estructura propuesta en cada una de las opciones, así como la función de su diseño. Estos prototipos físicos fueron efectuados en baja fidelidad para la exploración rápida de las variables paramétricas obtenidas (Fernández M. , 2020).

Pruebas preliminares. (granulometría y límites de Atterberg)

Previo a desarrollar los prototipos, se realizaron pruebas de laboratorio con muestras de tierra obtenidas al norte de la ciudad de Hermosillo, Sonora, así como de un banco de tierra local,



localizado al poniente de la ciudad. Se realizaron pruebas de granulometría, por el método húmedo de acuerdo con el manual M-MMP-1-06-03 (2003), y la obtención del límite plástico y líquido, es decir, los límites de *Atterberg*, siguiendo lo indicado por el manual M-MMP-1-07-07 (2007). Cada una de estas pruebas se realizó bajo la supervisión y apoyo del Ing. Miguel Vergara, así como de su equipo en las instalaciones de “SUA Ingeniería”.

La realización de estos ensayos de laboratorio permitió conocer la composición y clasificación del suelo de las muestras, con ello se vuelve más factible determinar el tipo de estabilizantes necesarios para la ejecución de la técnica de sistema mixto de tierra (bahareque) que se busca innovar en esta investigación.

Proceso de ejecución de las pruebas.

Como se mencionó, las pruebas granulométricas y de límites de *Atterberg* se realizaron bajo la dirección del Ing. Miguel Cervantes, a partir de muestras de 200 g, en la primera etapa, y de 100 g en la segunda etapa de pruebas (ver **Figura 40.**), estas fueron preparadas de la siguiente manera:

Figura 40.

Muestra base para prueba granulométrica



Nota: Bajo la dirección del Ing. Miguel Cervantes, se estableció que la prueba se realizaría con una muestra de 200 g. Fotografía: Abraham Bernal, abril 2025



1) Se humedecieron las muestras hasta llegar al punto de saturación, dejándose reposar por alrededor de 24 hrs, esto con el propósito que el agua pudiese absorber la mayor cantidad de finos posible, posterior a esto la muestra fue lavada en un flujo de agua constante, hasta que se perdiera la mayor cantidad de finos posible (ver **Figura 41**).

Figura 41

Proceso de lavado para la limpieza de finos



Nota: Una vez obtenida la muestra de 200 g, se procedió con el lavado de esta (izquierda), dejándose al flujo de agua de manera constante hasta eliminar la mayor cantidad de finos posible (derecha). Fotografía: Miguel Cervantes, abril 2025

Este procedimiento permitió tener una cuantificación más precisa del porcentaje de finos que contenía las muestras, posterior a este procedimiento, las muestras fueron secadas de manera natural las siguientes 2 h, para posteriormente ser ingresada durante un periodo, de al menos 5 h a un horno a 110 °C para que se perdiera por completo la humedad (ver **Figura 42**).



Figura 42*Proceso de secado de muestra.*

Nota: Se ingresó la muestra a un horno con temperatura constante hasta alcanzar los 110°C, este proceso es denominado como deshumidificador, se sugiere que para tener certeza de la prueba de granulometría la muestra tendrá que estar “horneada” 24 h previas a la ejecución de la prueba. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2003). Fotografía: Abraham Bernal, abril 2025

2) Una vez concluido el proceso de deshumidificación, se procedió con la ejecución de la prueba de granulometría de acuerdo lo indica el Manual M-MMP-1-06-03 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2003) (ver **Figura 43**).

Figura 43*Mallas granulométricas.*

Nota: Se utilizaron las mallas desde la $\frac{3}{4}$ ” hasta la No. 200. Fotografía: Abraham Bernal, abril 2025



3) Posterior al haber realizado las pruebas granulométricas, se comenzó con las pruebas de límites de plasticidad, de acuerdo con el Manual M-MMP-1-07-07, utilizando una copa *casagrande* (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2007) (ver **Figura 44.**) la cual se le suministraba una mezcla de tierra humidificada (ver **Figura 45**) para obtener tanto los límites líquidos como plásticos, siendo este último el resultado de varias iteraciones, alrededor de 15.

Figura 44.

Copa casagrande para pruebas de límites plásticos y líquidos.



Nota: Fotografía: Abraham Bernal, abril 2025



Figura 45

Copa casa grande con preparación para prueba.



Nota: Fotografía: Abraham Bernal, abril 2025

Una vez obtenidos los límites se procedió a obtener y preparar las muestras (ver **Figura 46.**) que permitieron hacer el análisis correspondiente de contracción, así como el peso volumétrico húmedo y posteriormente seco de las muestras por medio de la hoja de cálculo ya codificada.

Figura 46.

Análisis de límites plástico, líquido y de contracción.



Nota: Se toma una muestra una vez alcanzada el límite líquido y límite plástico, para obtener el peso en cada uno de los estados y así obtener el grado de humedad requerido para cada uno de los límites, para el límite de contracción se hace una muestra en una sección metálica de 10 cms., la cual, al perder su humedad esta se contrae, este dato permite comprender su nivel de compresión y capacidad de deformación. Fotografía: Abraham Bernal, abril 2025



Los resultados obtenidos en esta fase de caracterización del suelo proporcionan una base sólida para comprender el comportamiento físico y su potencial aplicación en sistemas constructivos mixtos de tierra.

Con los datos obtenidos fue posible la evaluación técnica de agentes estabilizantes como cal y fibras naturales u otros aditivos con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de la muestra (Minke, 2005).

Desarrollo de Prototipos

El desarrollo de los prototipos físicos se realizó bajo algunas variables ya determinadas, como el diseño de entramados, la aplicación de refuerzo de malla pollera y la elección del núcleo para configurar el sistema de panel tipo sándwich.

Como se menciona en la Fase 03 – “Selección de materiales del sistema”, se determina que los armados elegidos, tanto voronoi como ramificación opuesta, se realizan a base de estacas de carrizo de 1 cm de grosor cortado en lata; cada uno de los armados tendrá un tipo de refuerzo adicional considerando: malla hexagonal de alambre galvanizado cal. 22 con apertura de 25 mm, de la misma manera se harán prototipos sin un refuerzo adicional para realizar una comparación entre las características obtenidas con malla o sin malla.

Se determinó el uso de mezcla de tierra con fibras vegetales (esta fibra es paja de trigo cristalino (*triticum turgidum* subsp), procedente del desecho agrícola de la producción en Sonora), la proporción planteada será de 50% tierra, 40% fibra vegetal (en volumen) y 10% (del peso total de tierra) de agente estabilizante, en este caso cal.

El desarrollo de este proceso experimental fue realizado con la IA ChatGPT v-4. de acuerdo con lo visto en la clase “Metodología experimental en laboratorio. Estadística inferencial” impartida por el Dr. David Vargas del Río, bajo el siguiente prompt: *“Haz un ejemplo de experimento de desarrollo de prototipo de baja fidelidad para determinar la resistencia de paneles de tierra, fibras vegetales y los estabilizantes antes descritos, identificando la dosificación como se desarrolló anteriormente. Desarrolla corridas bajo las siguientes condiciones: 1 panel con armado interno a base de geometría voronoi, en sistema tipo sándwich con bovedilla de poliestireno y otro con colchón de paja,; y 1 panel con armado de estructura de carrizo en tiras con sistema biomimético emulado sistemas de ramificación opuesto; en sistema tipo sándwich con*



bovedilla de poliestireno y otro con colchón de paja, realiza el experimento tomando en cuenta que cada una de estas variables cuente con una versión con malla pollera hexagonal y una versión sin esta, . Define las variables de entrada y sus niveles. También define las variables no controladas más importantes y plantea una estrategia para reducir su influencia. También define la variable de respuesta y presenta una estrategia para evaluarla. Finalmente, dame el tratamiento de las variables y responde a las siguientes preguntas: ¿Cómo van a combinarse las variables o niveles de cada variable de respuesta? ¿Cómo se va a evitar que haya un error aleatorio muy grande? ¿Cómo se comprobará que armado y mezcla de tierra es mejor? Toma en cuenta que las dimensiones del panel de prueba serán de 0.61 x 1.22 x 3/4" a 1" de grosor, también, que toma en cuenta que las mezclas tendrán una dosificación de 50% tierra y 50% de fibra vegetal (paja de trigo) en volumen, para obtener un peso del panel entre 21 a 26 kg solicitando que se simplificaran las corridas de acuerdo con las características óptimas.

1. Definición de variables

A) Variables de entrada (factores y niveles):

- **Condiciones generales:**
 - Dimensiones de cada panel (prototipo): 0.61 m. x 1.22 m. x 3/4" (0.0190 m)
 - Peso estimado del panel terminado: entre 21 y 26 kg
 - Técnica de armado: Panel modelado en bastidor rectangular con estructura interna de carrizo en latas en formatos definidos de manera paramétrica.
 - Condiciones de secado: de 48 a 72 h. a la sombra, más 5 días al sol en espacio ventilado.
- **Proporción de mezcla:**
 - 50% tierra, 40% fibra vegetal (en volumen) y 10% (del peso total de tierra) de agente estabilizante
- **Tipo de armado:**
 - Nivel 1: Armado interno de carrizo en formato *Voronoi*.



- Nivel 2: Armado interno de carrizo en formato biomimético (ramificación opuesta).
- **Tipo de núcleo en sistema sándwich:**
 - Núcleo de bovedilla de EPS de 61x122x13 cm.
 - Núcleo de paja confinado en funda textil (sin compactar, solo se aglomerará).

B) Variables no controladas (fuentes de variabilidad externa):

- **Humedad ambiental y temperatura:** La resistencia de los paneles puede variar según las condiciones climáticas, especialmente la humedad, que afecta la cohesión de la mezcla. Para la ejecución de estos prototipos se considerarán las condiciones de la Zona Metropolitana de Guadalajara; sin embargo, es imperativo que se pueda ejecutar el prototipo bajo las condiciones específicas de la ciudad de Hermosillo para datos más allegados a la realidad de una región con el clima cálido-seco.
- **Condiciones de secado y curado:** Diferencias en la exposición a la luz solar, viento o sombra podrían afectar el tiempo y calidad del secado, y con ello la resistencia de los paneles.

C) Estrategia para reducir la influencia de las variables no controladas:

- Para la humedad y temperatura ambiental, se realizó el secado de los paneles en un ambiente controlado con ventilación y poca exposición al exterior, asegurando condiciones de secado uniforme.
- La calidad de los materiales será estandarizada, utilizando tierra y arena de un mismo proveedor y lote; se tomó la muestra granulométrica más apta para la aplicación en sistemas mixtos de tierra, en este caso M-02.
- Se establecieron condiciones homogéneas de secado, asegurando que todos los paneles se curen en las mismas condiciones (mismo tiempo y temperatura), para minimizar la variabilidad en la resistencia causada por el curado desigual.

2. Variable de respuesta.



- **Variable de Respuesta:** En ambos ensayos se registra la carga máxima soportada. Estos datos se analizaron estadísticamente para comparar el efecto de las diferentes configuraciones geométricas y refuerzos. Además, se documentaron los modos de falla observados, lo que permitió evaluar el comportamiento estructural cualitativo de cada panel.

3. Tratamiento de las variables.

- **Combinación de variables:**
 - Cada combinación de niveles de las variables de entrada se evaluó, resultando en un diseño factorial completo con 8 combinaciones diferentes (2 tipos de armado interno $\times$ 2 tipos de refuerzo estructural adicional $\times$ 2 tipos de sistema alma tipo sándwich). A continuación, se muestran las corridas simplificadas del desarrollo de estas combinaciones (ver **Tabla 7**).



Tabla 7.
Corridas experimentales. Para la generación de prototipos.

Corrida	Código	Mezcla	Geometría Interna	Refuerzo adicional	Alma de armado
1	PV-I	50% tierra, 40% fibra vegetal (en volumen) y 10% (del peso total de tierra) de agente estabilizante cal.	Biomimética (ramificación)/	Sin refuerzo	EPS
2	PV-II	-	Biomimética (ramificación)	Malla hexagonal	EPS
3	PV-III	-	Voronoi	Sin refuerzo	EPS
4	PV-IV	-	Voronoi	Malla hexagonal	EPS
5	PV-V	-	Biomimética (ramificación)/	Sin refuerzo	Paja de trigo
6	PV-VI	-	Biomimética (ramificación)	Malla hexagonal	Paja de trigo
7	PV-VII	-	Voronoi	Sin refuerzo	Paja de trigo
8	PV-VIII	-	Voronoi	Malla hexagonal	Paja de trigo

Nota: Esta tabla muestra las corridas experimentales que se llevarán a cabo para identificar la mejor opción de las propuestas, de acuerdo con las fases previas. La mezcla es la misma en cada una de las corridas, por lo que se omite su repetición en la tabla.

El material base (tierra cruda y paja de trigo) empleado fue obtenido directamente de la región analizada en esta investigación, los materiales complementarios fueron adquiridos en diferentes puntos de la Zona Metropolitana de Guadalajara, en centros de distribución que permitieran ser obtenidos en la región de estudio.



- **Control del error aleatorio:**

- Se utilizará la misma cantidad de material y procedimiento de fabricación en todos los paneles, y los paneles se probarán bajo las mismas condiciones para reducir el efecto de las variaciones en el proceso de prueba.

- **Criterio para determinar la mejor combinación:**

- Para evaluar qué armado y refuerzo presentan mejor desempeño, se compararán las medidas de resistencia a la compresión y flexión obtenidas en cada combinación.

Fase 05: Validación del prototipo mediante pruebas y ensayos experimentales.

Capacidad Térmica (Prueba de Soplete):

La prueba de soplete no es un ensayo normalizado como el de placa caliente que estipula la ISO 8302; sin embargo, es importante enfocar esta prueba bajo el argumento de ensayo de flujo térmico transitorio. Este ensayo de observación preliminar identificó el comportamiento frente a una fuente directa de fuego, no normada. Este método no sustituye en ningún caso los ensayos normalizados NMX-C-307 o equivalentes. En concordancia con los lineamientos sobre métodos no normalizados establecidos por ISO 17025 (2017).

Con esta prueba se pretende analizar el comportamiento del sistema compuesto como envolvente, tal como lo describen las normas NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011) para edificaciones residenciales, mientras que para edificaciones no residenciales, se deberá contrastar con la NOM-008-ENER-2001.

Los materiales que se utilizaron para la ejecución de la prueba son los siguientes (ver **Figura 47**):



Figura 47
Materiales para ejecución de prueba ígnea.



Nota: De izquierda a derecha: cartucho de soplete desechable de gas propano, con soplete con válvula de control de flama; flexómetro de 5 m y termómetro ambiental con lectores termopar tipo “K”.

Para la ejecución del ensayo, se siguieron los siguientes criterios:

- Se identificó un punto específico de aplicación de fuego puntual, se colocó el soplete a una distancia de 10 cm de este punto, esta distancia se aplicó con cada una de las muestras y ensayos, para permitir el contacto directo de la flama con la superficie analizada.
- El tiempo de exposición a la flama fue de 10, 30 y 60 s a flama media y 30 s a flama alta; esta selección de tiempo de exposición permite identificar reacciones inmediatas de la superficie en un modelo transitorio. La prueba no tuvo que ser cancelada por inicio de combustión. Se consideró una potencia media estimada de 2.0 kW para el soplete utilizado.
- Se colocaron los sensores termopar tipo “K” en tres posiciones clave para identificar el cambio de temperatura y analizar la propagación térmica a través del espesor del sistema (ver x):
 - Cara expuesta al soplete (T1). Esta es la zona de máxima exposición a la flama y a la temperatura real de exposición.
 - Centro geométrico del núcleo del panel (T2). Representa la disipación interna de la temperatura en el núcleo,
 - Contracara no expuesta (T3). La lectura obtenida es el indicador del calor transmitido al interior.
- Se tomó el área de la zona de impacto de la flama, identificando consecuencias de la exposición directa al fuego, como carbonización o indicios de fuego.



A partir de las mediciones obtenidas, se estimaron los parámetros térmicos en un régimen transitorio, estos parámetros son: flujo de calor (q), conductividad térmica equivalente (K_{eq}) (Secretaría de Energía, 2011) y resistencia térmica (R) (ONNCCE, 2009).

Para el cálculo de los parámetros anteriores, se consideró el área de impacto y la profundidad térmica efectiva del material, calculada mediante modelos de difusión térmica.

Se incorporaron valores de densidad obtenidos experimentalmente para cada configuración, para una mayor representatividad del análisis.

De esta manera fue posible evaluar la capacidad aislante relativa entre composiciones, estimar la conductividad (valor K), resistencia térmica transitoria (valor R) y evaluar el amortiguamiento térmico bajo carga puntual de alta intensidad en función del espesor y la composición del panel. Estos valores no deberán considerarse como normativos, sino como experimentales equivalentes, tal como lo dicta la norma ISO 17025 (2017).

Durabilidad:

Pruebas de Impacto.

El propósito fue identificar la resistencia del panel frente a impactos de cuerpo blando y duro, así como cuantificar el nivel de daño, la energía absorbida y la integridad estructural del sistema sándwich tierra – entramado vegetal – alma aislante. El equipo empleado fue el siguiente (ver **Figura 48**)

Figura 48

Equipo empleado para la aplicación de prueba de impacto.



Nota: De izquierda a derecha: Disco de $\varnothing 22.0$ cm x 5.00 de altura, peso de 4.45 kg c/u. y Flexómetro de 5 m.



Para la ejecución de la prueba se basó el proceso en la ISO 7892 (ISO, 1988), identificando las características que se proponen en la NTC-PE-2018 (IMPLAN & CIDUE, 2018) del municipio de Hermosillo. El proceso tal como se describe en la ISO 7892 fue adaptado a falta de elementos en el laboratorio para su ejecución. Este se describe a continuación.

- Se colocaron las muestras ensayadas sobre una superficie rígida.
- Para la generación de los impactos se utilizó un sistema de caída libre, dejando caer discos de 4.45 kg, en un máximo de 4 apilamientos, teniendo un peso máximo de 17.80 kg. Se tienen entonces 4 tipos de masas ensayadas: 4.45 kg (1 disco), 8.90 kg (2 discos), 13.35 kg (3 discos) y 17.80 kg (4 discos).
- Cada uno de los pesos fue ensayado a 0.25 m, 0.50 m y 1.00 m. La energía empleada entonces se traduce en un rango de 10.90 J a 174.44 J; este rango se obtuvo a partir de la fórmula $E = m * g * h$. Para llevar un control de esto, se generó la matriz presentada en la

Tabla 8:

Tabla 8

Matriz de cargas ensayadas en prueba de impacto.

Muestra ID	Masa (Kg)	Altura (Mts)	Energía (J)
1	4.45	0.25	10.9025
2	4.45	0.50	21.805
3	4.45	1.00	43.61
4	8.90	0.25	21.805
5	8.90	0.50	43.61
6	8.90	1.00	87.22
7	13.35	0.25	32.7075
8	13.35	0.50	65.415
9	13.35	1.00	130.83
10	17.80	0.25	43.61
11	17.80	0.50	87.22
12	17.80	1.00	174.44

Nota: Se marcan en rojo las muestras que no se realizaron debido a que representan la misma carga energética que otra de las variables desarrolladas en la propuesta de prueba.

Prueba de Karsten.

Bajo el marco normativo expuesto en esta investigación, se determinó que una de las patologías que inciden en los procesos de construcción con tierra cruda es lo frágil que es el sistema al contacto directo con agua.



En este sentido, se aplicaron los fundamentos de la norma NMX C-228-ONNCE-2010 (ONNCE , 2014) para la preservación del material ante escenarios pluviales e identificar las características higroscópicas del sistema.

Para ello, la gestión de la prueba de *Karsten* (Karsten, 1997), permite el análisis de los niveles de absorción bajo la norma, con ello fue posible orientar, con rigor científico la selección de aditivos y recubrimientos finales, aunque estos solo son de carácter conceptual, ya que en la investigación no se desarrolla, la prueba fue realizada en las instalaciones del Laboratorio de Construcción con Tierra, en ITESO Universidad Jesuita de Guadalajara.

El proceso se desarrolló a partir del siguiente proceso:

- Se preparó la superficie de los paneles, asegurando la eliminación de impurezas, y verificando que se encontrara seca y libre de partículas sueltas que podrían entorpecer el proceso.
- Se colocó el panel en posición vertical para simular condiciones reales de exposición.
- Se determinó un área de estudio en el panel, al que se procedió a fijar el tubo Karsten sobre la superficie mediante el uso de masilla epóxica (marca *kola loka*), para garantizar el sellado hermético y evitar fugas laterales de agua durante el ensayo (ver **Figura 49**).



Figura 49

Colocación de tubo de Karsten en panel colocado en vertical.



Nota: El área empleada para hacer la prueba fue delimitada y categorizada visualmente. El sellado del tubo *Karsten* se generó presionando el tubo con masilla epóxica sobre el panel, posteriormente fue moldeada la masilla sobre el borde del tubo para completar el sellado. Imagen propia, febrero de 2026.

- Una vez fijo, se procedió a llenar el tubo Karsten con un gotero para un mejor control del agua agregada.
- Se realizaron lecturas del volumen de agua absorbida en intervalos de 1, 5, 10 y 15 min y se registró la cantidad de agua absorbida; con estos valores se identificó la velocidad de absorción, bajo condiciones higrotérmicas controladas.
- Después de 2 semanas de la aplicación de la prueba, se preparó la superficie para la aplicación de hidrofugante natural a base de nopal (*Opuntia ficus-indica*, el cual es la especie comercial más común encontrada en Guadalajara), en proporción 2:1 (2 unidades de nopal por cada 1 unidad de agua). Esta se dejó secar durante 3 días en condiciones de sombra (ver **Figura 50**).



Figura 50

Aplicación de hidrofugante (mucílago de nopal) sobre el panel.



Nota: La aplicación del mucílago fue en la zona de aplicación de la prueba anterior. A la izquierda se observa la preparación del mucílago de nopal y a la derecha su aplicación. Imagen propia, marzo de 2026.

- Posterior a la aplicación de hidrofugante, se volvieron a tomar lecturas a 1, 5, 10 y 15 min y se registró la cantidad de agua absorbida, para evaluar las nuevas velocidades de absorción.
- Se generó un proceso comparativo de la aplicación de las pruebas para evaluar y comparar el panel con y sin hidrofugante.

Este ensayo permitió no solo caracterizar la permeabilidad superficial de los paneles, sino también identificar variaciones en la cinética de absorción derivadas del tratamiento aplicado.



Resultados.

El presente apartado sistematiza los hallazgos derivados de la aplicación metodológica. La exposición de resultados se realizará en el orden de cada una de las fases aplicadas en la metodología. Los resultados aquí expuestos serán discutidos e interpolados en el apartado de “Conclusiones”; sin embargo, sí se hará una interpretación de estos para clarificar posturas que serán discutidas más adelante.

Fase 01: Empatía (*Design Thinking*)

Como se declara en el apartado de Metodología, en esta fase, se obtuvieron datos cualitativos que brindan lineamientos empíricos tanto técnicos como funcionales que fueron tomados en cuenta para el desarrollo de la propuesta. La encuesta se estructuró en cuatro puntos: 1) Experiencia con Sistemas Prefabricados, 2) Factores que tomar en cuenta (durabilidad), 3) Operatividad de los sistemas (incluyendo mano de obra) y 4) Percepción sobre el uso de la tierra cruda en la construcción.

Para efectos del apartado, se muestran solo las respuestas más relevantes que aportan al estudio de interpolación con especificaciones técnicas, normativa aplicada, marco teórico y casos de estudio analizados en el estado del arte. Se omite el apartado sobre el perfil del usuario ejecutor participante.

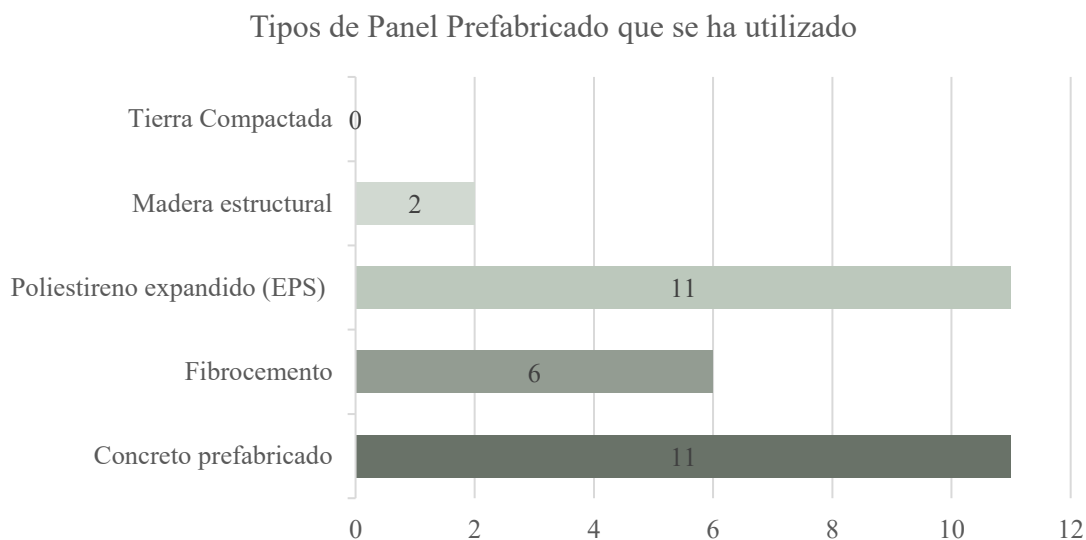
Experiencia con sistemas prefabricados:

En relación con la experiencia de los encuestados en el uso de sistemas de paneles prefabricados (P-05) (ver **Figura 51**), se observa una clara predominancia de materiales industrializados. Los sistemas más utilizados son el concreto prefabricado y el poliestireno expandido (EPS), ambos con la mayor frecuencia de selección (11 menciones cada uno), seguidos por el fibrocemento (6 menciones). En contraste, materiales como la madera estructural presentan una presencia limitada (2 menciones), mientras que la tierra compactada no registra uso entre los participantes.



Figura 51.

Resultado de P-05: ¿Con qué tipo de sistemas de paneles prefabricados ha trabajado? (Seleccione todas las que apliquen)



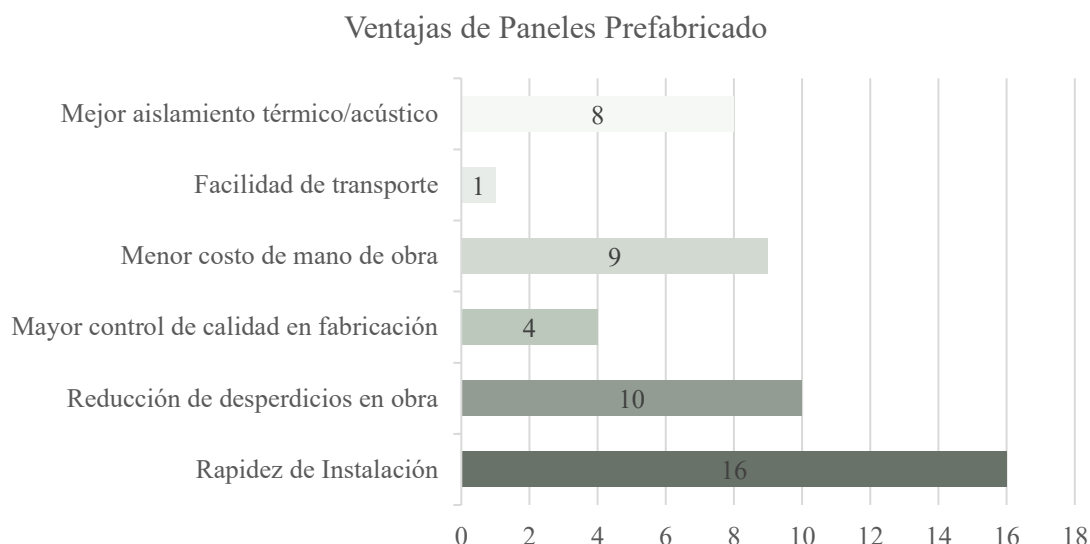
Nota: Elaboración propia. A partir de gráficos obtenidos de la plataforma *Google Forms*.

Por otro lado, en la identificación de las principales ventajas de los paneles prefabricados (P-06) (ver **Figura 52**), los resultados muestran que la rapidez de instalación es el atributo más valorado (16 menciones), seguido de la reducción de desperdicios en obra (10 menciones) y el menor costo de mano de obra (9 menciones). También se reconoce el mejor aislamiento térmico/acústico (8 menciones), aunque con menor peso relativo, y en menor medida el control de calidad en fabricación (4 menciones). La facilidad de transporte resulta poco significativa (1 mención).



Figura 52.

Resultado de P-06: ¿Cuáles considera que son las principales ventajas de los paneles prefabricados? (Seleccione hasta 3 opciones)



Nota: Elaboración propia. A partir de gráficos obtenidos de la plataforma *Google Forms*.

Al entender qué tipo de sistemas son aplicados en el campo de la práctica, permitirá tener una clara idea de los tipos de elementos que deben ser tomados en cuenta para el desarrollo de la propuesta. Estos resultados permiten interpretar que los usuarios valoran principalmente los beneficios asociados a la eficiencia constructiva y optimización de recursos, más que aspectos logísticos o de control técnico.

Esto refuerza la idea de que cualquier propuesta de sistema debe enfatizar su capacidad para competir en términos de tiempo de ejecución, costos y eficiencia en obra, ya que estos son los factores determinantes en la toma de decisiones dentro del sector.

Factores que tomar en cuenta (Durabilidad):

A partir de los resultados presentados en las figuras correspondientes a las preguntas P-07 y P-08, se identifican con claridad los factores críticos que deben considerarse en el diseño y desarrollo de sistemas de paneles prefabricados, particularmente en relación con su desempeño y durabilidad.

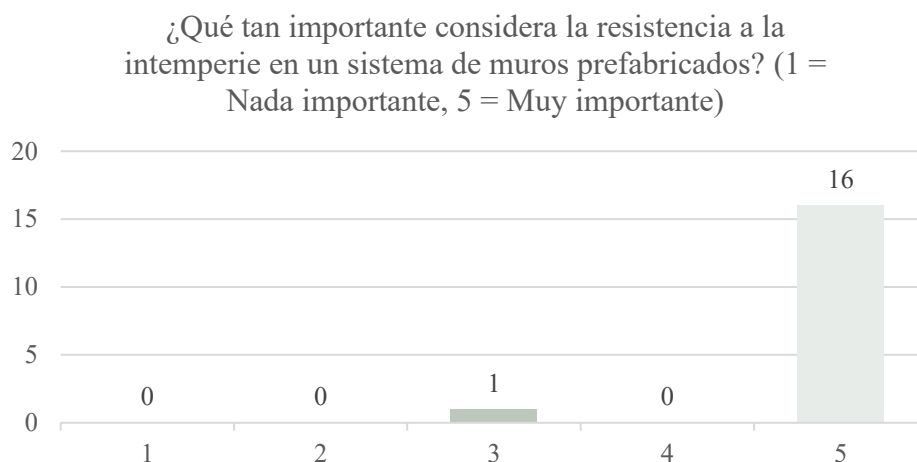
En primer lugar, la gráfica de P-07 (ver **Figura 53**) muestra que la resistencia a la intemperie es un criterio prácticamente determinante, con un promedio de 4.88 sobre 5, donde la



gran mayoría de los encuestados la calificó como “muy importante”. Este resultado indica que, desde la percepción de los actores del sector, cualquier sistema constructivo prefabricado debe garantizar un comportamiento adecuado frente a condiciones ambientales adversas, como exposición prolongada al sol, lluvia o variaciones térmicas. No se trata de un atributo deseable, sino de un requisito indispensable para su aceptación.

Figura 53

Resultado de P-07: ¿Qué tan importante considera la resistencia a la intemperie en un sistema de muros prefabricados? (1= Nada importante, 5= Muy importante) Promedio Actual 4.88



Nota: Elaboración propia. A partir de gráficos obtenidos de la plataforma *Google Forms*.

En complemento, los resultados de P-08 (ver **Figura 54**) permiten profundizar en los factores específicos que inciden en la durabilidad. El principal factor identificado es la humedad y las filtraciones (14 menciones), lo que refuerza directamente la preocupación observada en la gráfica anterior. Esto sugiere que el control de ingreso de agua, la correcta impermeabilización y el diseño de detalles constructivos adecuados son aspectos prioritarios en el desarrollo del sistema. De acuerdo con (Minke, 2005), es justo esta patología uno de los principales desafíos de la construcción con tierra

En segundo nivel de importancia aparece el tipo de material utilizado (7 menciones), lo que indica que la selección de materiales no solo impacta en el desempeño estructural, sino también en la percepción de confiabilidad y vida útil del sistema. Posteriormente, se identifican factores como el diseño y ensamblaje del panel (6 menciones) y el desgaste por uso y mantenimiento (6

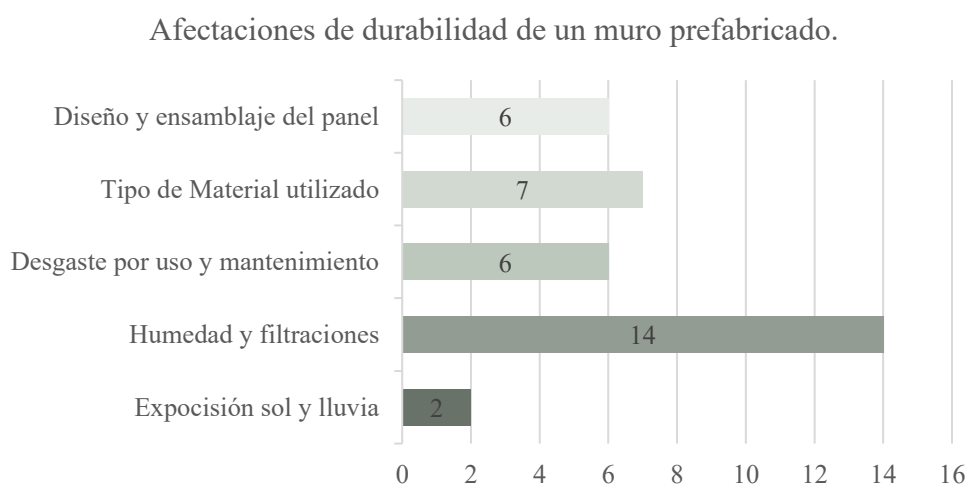


menciones), los cuales evidencian que la durabilidad no depende únicamente del material, sino también de cómo se integran los componentes y de las condiciones de uso a lo largo del tiempo.

Finalmente, la exposición directa al sol y la lluvia presenta una menor cantidad de menciones (2), lo cual puede interpretarse no como un factor irrelevante, sino como un aspecto que los encuestados consideran implícito dentro de problemas más amplios como la humedad o la intemperie.

Figura 54

Resultado de P-08: En su experiencia, ¿cuáles son los principales factores que afectan la durabilidad de un muro prefabricado? (Seleccione hasta 3 opciones)



Nota: Elaboración propia. A partir de gráficos obtenidos de la plataforma *Google Forms*.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que los factores clave a tomar en cuenta en el desarrollo de un sistema de panel prefabricado —particularmente uno basado en tierra— deben centrarse en:

- Control de humedad e impermeabilidad.
- Selección adecuada de materiales.
- Diseño constructivo y sistema de ensamble.
- Estrategias de mantenimiento y durabilidad a largo plazo.

Estos elementos se convierten en lineamientos fundamentales para orientar el diseño del prototipo, mismos que concuerdan con los establecidos con la Guía de construcción parasísmica expuesta por Carazas y Rivero (2002), especialmente considerando que las principales barreras de



adopción están directamente relacionadas con la confianza en su desempeño frente al ambiente (Morel, et al., 2021).

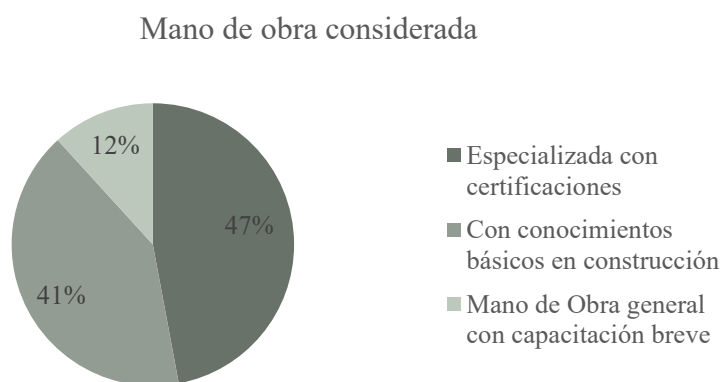
Operatividad de los sistemas (incluyendo mano de obra):

A partir del análisis de los resultados vinculados con la operatividad del sistema de paneles prefabricados (P-10, P-13 y P-14), se pueden identificar criterios clave que orientan tanto el diseño como la implementación del sistema en obra.

En primer lugar, respecto al tipo de mano de obra requerida (P-10) (ver **Figura 55**), los resultados muestran una ligera preferencia por mano de obra especializada con certificaciones (47%), seguida muy de cerca por personal con conocimientos básicos en construcción (41%), mientras que la opción de mano de obra general con capacitación breve (12%) tiene una baja aceptación. Esto indica que, aunque existe apertura hacia cierto nivel de accesibilidad, los usuarios aún perciben estos sistemas como técnicamente exigentes. En términos operativos, esto implica que el sistema debe buscar un equilibrio: simplificar procesos constructivos sin comprometer la confianza técnica, reduciendo la necesidad de alta especialización mediante soluciones intuitivas de ensamblaje.

Figura 55

Respuesta de P-10: ¿Qué tipo de mano de obra considera más adecuada para la instalación de un sistema de paneles prefabricados?



Nota: Elaboración propia. A partir de gráficos obtenidos de la plataforma *Google Forms*

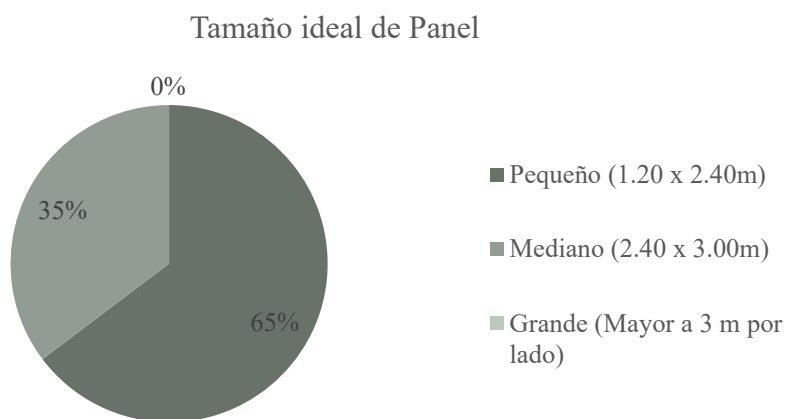
En segundo lugar, en relación con el tamaño ideal del panel (P-13) (ver **Figura 56**), la mayoría de los encuestados (65%) prefiere formatos pequeños (1.22 x 2.44 m), mientras que un



35% opta por tamaños medianos y no hay preferencia por paneles grandes. Este resultado evidencia que la operatividad está fuertemente condicionada por factores como la facilidad de manipulación, transporte e instalación manual en obra. Paneles más pequeños permiten mayor flexibilidad, menor dependencia de maquinaria y mejor adaptación a condiciones reales de construcción.

Figura 56.

Respuesta de P-13: ¿Cuál considera que es el tamaño ideal de un panel prefabricado para facilitar su instalación?



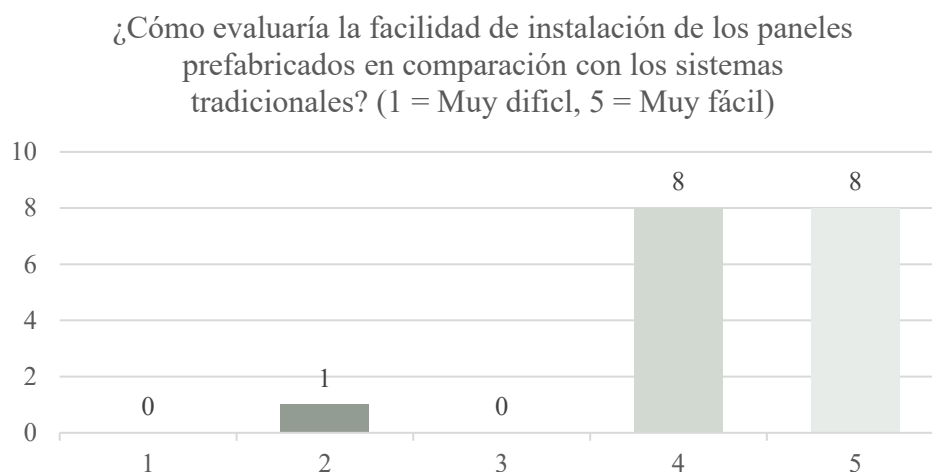
Nota: Elaboración propia. A partir de gráficos obtenidos de la plataforma *Google Forms*.

Finalmente, en cuanto a la facilidad de instalación (P-14) (ver **Figura 57**), los resultados son contundentes: la mayoría de los encuestados evalúa los sistemas prefabricados como fáciles o muy fáciles de instalar (valores 4 y 5 concentran la totalidad de las respuestas, con 8 menciones cada uno), lo que confirma una percepción altamente positiva en términos de eficiencia operativa frente a sistemas tradicionales. Este hallazgo refuerza uno de los principales atributos detectados previamente: la optimización del tiempo y simplificación del proceso constructivo.



Figura 57.

Respuesta a P-14: ¿Cómo evaluaría la facilidad de instalación de los paneles prefabricados en comparación con los sistemas tradicionales? (1 = Mucho más difícil, 5 = Mucho más fácil)



Nota: Elaboración propia. A partir de gráficos obtenidos de la plataforma *Google Forms*.

En conjunto, estos resultados permiten establecer que la operatividad de los sistemas prefabricados empleados en el contexto de edificación en Hermosillo está definida por tres factores principales:

- Nivel de especialización de la mano de obra, donde se busca reducir la dependencia técnica sin perder confiabilidad;
- Dimensión y manejabilidad de los paneles, priorizando formatos que faciliten su manipulación en obra;
- Facilidad y rapidez de instalación, como principal ventaja competitiva frente a sistemas tradicionales.

Con la información ya obtenida, se comenzó a realizar modulaciones preliminares que permitieron integrar las condiciones descritas; estos diseños se desarrollaron específicamente durante la **Fase 03**.

Percepción sobre el uso de tierra cruda en la construcción:

A partir del análisis sobre la pregunta P-16 (ver **Figura 58**), se identificaron con claridad las principales barreras percibidas por el usuario ejecutor para la adopción de paneles prefabricados de tierra en el mercado de la construcción. En términos comparativos, la barrera más significativa



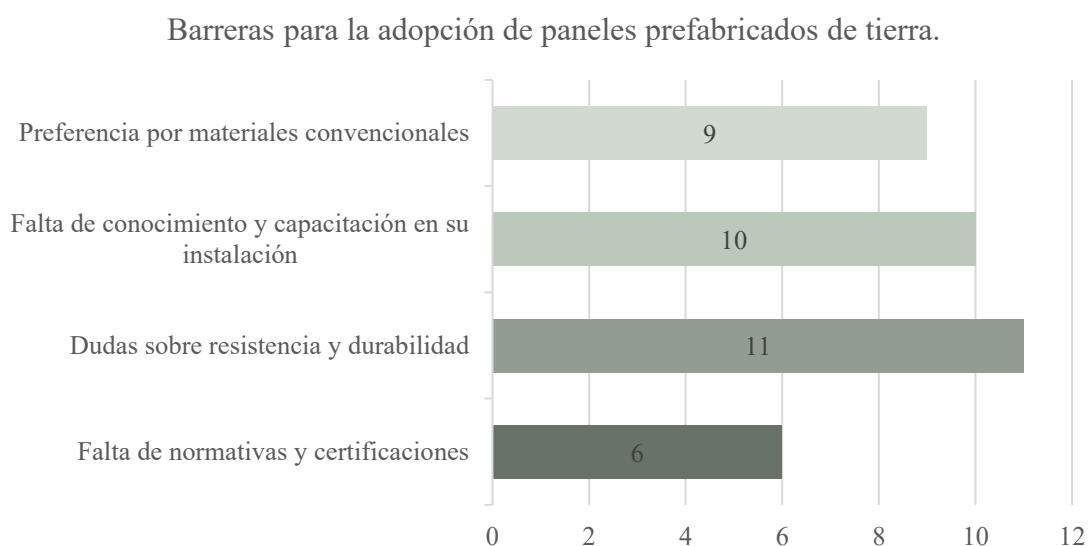
corresponde a las dudas sobre la resistencia y durabilidad (11 menciones), lo que evidencia una preocupación técnica central asociada al desempeño estructural y la vida útil del material. Este resultado sugiere que, más allá de los beneficios ambientales o económicos, la aceptación del sistema depende en gran medida de la validación empírica y normativa de sus propiedades mecánicas.

De acuerdo con Moret et. al, (2021) estas barreras surgen a partir de un puente de transición tecnológica deficiente que no termina de conectar los avances desarrollados de la academia con el sector de la construcción.

Por otro lado, la falta de normativas y certificaciones (6 menciones), aunque con menor frecuencia relativa, constituye una barrera estructural relevante. La ausencia de marcos regulatorios específicos limita la posibilidad de escalamiento y formalización del sistema constructivo, restringiendo su incorporación en proyectos de mayor envergadura o en licitaciones públicas, tal como se desarrolló en el marco normativo de la presente investigación.

Figura 58.

Respuesta a P-16: ¿Qué barreras cree que podrían dificultar la adopción de estos paneles en el mercado? (Seleccione las más relevantes)



Nota: Elaboración propia. A partir de gráficos obtenidos de la plataforma *Google Forms*.

Para la respuesta de la **P-17**: “¿Qué incentivos o mejoras podrían facilitar la adopción de estos paneles en el mercado? (Especifique su respuesta)”, esta respuesta permite ampliar de



manera general qué puntos deberían de tomarse en cuenta para la realización de este prototipo y poder incentivar en la práctica el uso de materiales como la tierra cruda. De acuerdo con esto, se presentan las respuestas con mayor coincidencia expuestas por los participantes:

- Bajo costo, resistencia y durabilidad.
- Propuesta de sistemas con certificaciones.
- Implementación en proyectos promocionales como casos de éxito.
- Capacitaciones gratuitas para instalación.
- Involucración académica.
- Rapidez y facilidad de instalación.
- Costos vs Tiempo vs Efectividad vs Durabilidad.
- Promoción en gremios de construcción.

Como conclusión general de esta fase, es importante destacar el nicho de oportunidad que surge, a partir de los datos obtenidos para el desarrollo de los prototipos, es decir, gracias a este sondeo es factible determinar características técnicas o específicas, de acuerdo con los sistemas prefabricados empleados en la región.

Fase 02: Definición (*Design Thinking*)

En esta etapa se hizo un análisis y organización jerárquica de la información obtenida a través de la encuesta y a su vez, se definieron parámetros a partir de la triangulación realizada con el marco teórico, normativo y casos de estudio en el estado del arte. Dando como resultado la siguiente matriz (ver **Tabla 9**). De esta manera fue posible definir de manera más específica las características base con las que se comenzó el desarrollo de la propuesta.



Tabla 9.

Organización de información a partir de la encuesta realizada en Fase 01 y la triangulación con fuentes bibliográficas.

Categoría	Variable	Origen en triangulación	Hallazgo clave	Parámetro definido (Fase 02)	Tipo de parámetro	Criterio de diseño asociado
Crítica	Resistencia estructural	Literatura (NTC-PE-2018; Norma E.080, ISO 7892) + práctica profesional	Necesidad de sistemas resistentes pero ligeros	Evaluar resistencia mediante ensayos comparativos (carga puntual/flexión)	Cuantificable (a medir en Fase 03 y Fase 05)	Maximizar resistencia con mínimo peso
Crítica	Durabilidad frente a humedad	Literatura (NMX-C-228-ONNCCE-2010, Prueba de Karsten + encuesta	Alta preocupación por exposición a intemperie	Incorporar estabilizante (cal 10%) y evaluar absorción	Cuantificable(a medir en Fase 05)	Minimizar absorción y degradación
Desempeño	Capacidad térmica	Literatura (NONM-020-ENER-2011, NMX-C-460-ONNCCE-2009) + contexto climático	Necesidad de confort térmico pasivo	Incorporar cámara de aire + evaluar diferencial térmico	Cuantificable	Maximizar aislamiento térmico
Desempeño	Inercia térmica	Literatura (NMX-C-460-ONNCCE-2009, Ordoñez, 2013- La tierra, un material de construcción sustentable)	Materiales de tierra presentan buen desfase térmico	Medir retardo térmico en ensayo controlado	Cuantificable	Maximizar retardo térmico
Desempeño	Peso del sistema	Práctica profesional	Problemas de transporte e instalación	Reducir densidad mediante fibra vegetal (40%)	Cuantificable	Minimizar peso total del panel
Sostenibilidad	Emisiones de CO ₂	Literatura (ACV - NMX-SAA-14040-IMNC y NMX-SAA-14044-IMNC)	Interés en sistemas de bajo impacto ambiental	Evaluar huella mediante ACV simplificado	Cuantificable	Minimizar CO ₂ por panel
Sostenibilidad	Uso de materiales naturales	Casos de estudio (Panel Amáco, Hanok, Quincha Prefabricada)	Ventaja comparativa de la tierra y fibras	Mantener alto porcentaje de materiales naturales	Cuantificable	Maximizar contenido natural
Operativa	Facilidad de instalación	Encuesta	Necesidad de sistemas simples y rápidos	Diseñar panel modular (0.61 m × 1.22 m)	Cualitativo - cuantificable	Minimizar complejidad constructiva
Operativa	Tipo de mano de obra	Encuesta	Preferencia por mano de obra no especializada	Evitar sistemas complejos o altamente técnicos	Cualitativo	Adaptación a mano de obra local
Diseño	Tipo de entramado	Diseño paramétrico + biomimética	Exploración de geometrías optimizadas	Definir 3 sistemas: Voronoi, Reaction-Diffusion, Ramificación	Nominal (Fase 03)	Comparación estructural
Diseño	Tipo de refuerzo	Casos de estudio + experimentación	Refuerzos mejoran resistencia	Definir 3 niveles: sin refuerzo, malla, geomalla	Nominal (Fase 03)	Evaluar impacto estructural
Diseño	Dosificación de mezcla	Literatura + pruebas previas	Mezclas tierra-fibra mejoran ligereza	50% tierra + 50% fibra + 10% estabilizante	Cuantificable (Fase 03)	Equilibrio entre resistencia y peso

Nota: Elaboración propia a partir de la triangulación y análisis de las variantes descritas en el apartado de Metodología.

Uno de los hallazgos más relevantes es la convergencia entre fuentes teóricas y empíricas en torno a variables críticas como la resistencia estructural, la durabilidad frente a la humedad y el peso del sistema. Esta coincidencia sugiere que las preocupaciones del sector productivo se encuentran alineadas con los principios técnicos documentados en la literatura, lo cual valida la pertinencia de enfocar el diseño del sistema en estos parámetros.

La matriz permite identificar cómo variables inicialmente cualitativas, particularmente aquellas asociadas a la operatividad, como la facilidad de instalación y el tipo de mano de obra, fueron traducidas en criterios de diseño, tales como la modulación del panel o la simplificación del sistema constructivo. Este proceso de transformación resulta clave, ya que establece un puente



entre la percepción del usuario y la configuración técnica del prototipo (Knaack, Chung-Klatte, & Hasselbach, 2012).

En el ámbito del desempeño físico, se observa que variables como la capacidad y la inercia térmicas emergen principalmente desde la revisión teórica y el análisis del contexto climático, lo que refuerza la necesidad de incorporar estrategias pasivas como el uso de cámaras de aire o materiales con alta capacidad de almacenamiento térmico dentro del sistema propuesto.

En cuanto a las variables de diseño, la matriz evidencia que las decisiones relacionadas con el tipo de entramado, el refuerzo y la dosificación de la mezcla no son arbitrarias, sino que derivan directamente de la triangulación realizada en la fase previa. Esto asegura que el diseño experimental se base en parámetros fundamentados y no únicamente en exploraciones formales. Actúa como un dispositivo de toma de decisiones, que articula la relación entre diagnóstico, diseño y validación.

Fase 03: Ideación y generación de opciones paramétricas (Design Thinking + Prototipado Rápido).

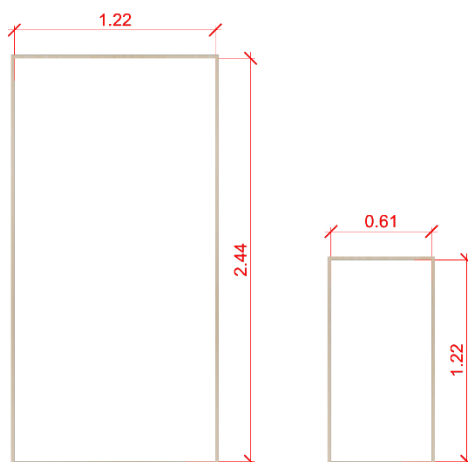
Definición del Módulo

Una vez hecho el análisis de los parámetros técnicos obtenidos mediante la encuesta realizada en la Fase 01 y la generación de la matriz en la Fase 02, se determinó que el módulo base de trabajo fue en formato pequeño (1.20 x 2.40 m o 1.22 x 2.44 m). Para el caso de esta investigación y mejorar la practicidad del manejo de los prototipos se toma un módulo 1:2 (0.61 x 1.22 m) (ver **Figura 59**). En este sentido, el módulo que se estudia es el del prototipo; sin embargo, para su aplicación real, el desarrollo geométrico deberá ser escalado en proporción 2:1.



Figura 59

Definición del módulo a poner en práctica para el desarrollo del prototipo.



Nota: Elaboración propia. A la izquierda el panel original planteado para el desarrollo de la investigación, a la derecha el módulo a escala 1:2 para la ejecución de los prototipos.

Estudio de entramado.

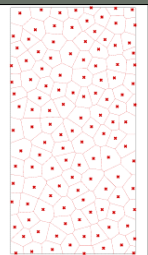
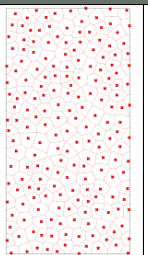
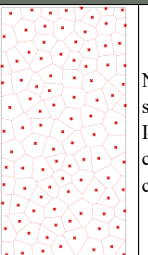
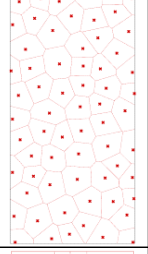
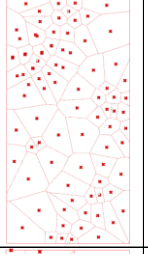
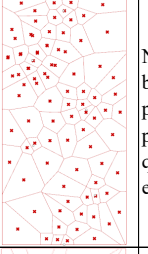
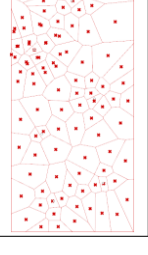
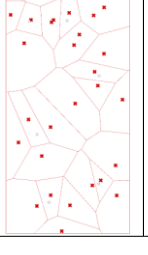
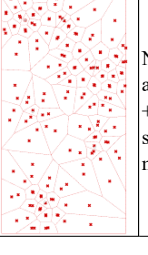
Una vez que se definió el módulo de trabajo, se comenzó a desarrollar el sistema de entramado, basado en las geometrías analizadas en el marco teórico y expuestas en el proceso metodológico: *Voronoi* y *Ramificación Opuesta*. Para tener una lectura más clara sobre el proceso de gestión de los entramados, se han descrito de manera individual a continuación. En este punto de análisis no se define de manera puntual el núcleo del sistema compuesto o tipo sándwich, solo el entramado desarrollado para las caras externas del panel.

Entramado Voronoi.

Para la ejecución del entramado, se siguieron los procesos declarados en la **Figura 39**. Mediante el proceso de iteraciones se generó la siguiente matriz de análisis (ver **Tabla 10**). Estas geometrías fueron ejecutadas a partir del patrón base del sistema voronoi que se encuentra precargado en *Grasshopper*.



Tabla 10*Modulaciones Base Voronoi. Estudio de Iteraciones.*

Modulaciones Bases Voronoi				
Muestra 1-3				Nota: Se estudian puntos de saturación en el sistema. Identificando puntos de continuidad y congruencia constructiva
Muestra 4-6				Nota: Las iteraciones se basan en la saturación de puntos clave, gestionado a partir de códigos genéticos que estudia puntos críticos en sistemas de panelizado.
Muestra 7-9				Nota Iteraciones con alternativas de continuidad + aperturas basadas en baja saturación del sistema en el módulo.

Nota: Elaboración propia. Cada hilera representa un proceso de iteración determinado, con lo cual se prepara el sistema para pasar al estudio de simplificación.

En la primera serie de iteraciones (muestras 1-3), el análisis se enfocó en los puntos de saturación del sistema. Se observa que una distribución densa y homogénea de los centros de control genera una subdivisión celular regular. El objetivo en esta fase es la identificación de puntos de continuidad y congruencia constructiva, asegurando que la transición entre las celdas permita una transmisión de cargas uniforme y una modulación lógica para los procesos de prefabricación.

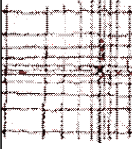
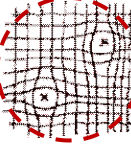
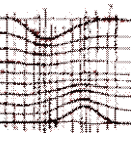
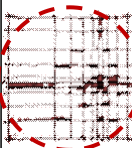
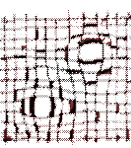
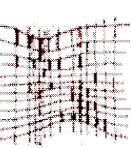
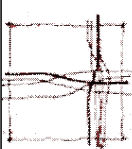
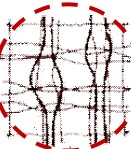
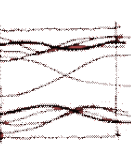
La segunda serie de iteraciones (muestras 4-6) introdujo el uso de códigos genéticos para gestionar la saturación de puntos clave. A diferencia de la primera serie, aquí la modulación responde a un estudio de puntos críticos en sistemas de panelizado. La variación en el tamaño de las celdas sugiere una adaptación algorítmica donde el sistema identifica zonas que requieren mayor refuerzo (celdas más pequeñas y densas) o áreas de transición, optimizando así la cantidad de material necesario para la integridad del panel.



Por último, en la serie de iteraciones finales (muestras 7-9) se exploró la relación entre la continuidad estructural y la generación de aperturas. En estas muestras, se observa una baja saturación del sistema en el módulo, lo que resulta en celdas de mayor dimensión. Esto gestionó alternativas donde el sistema constructivo permite vacíos o vanos sin comprometer la estabilidad del sistema, fundamentándose en la geometría resultante para definir los límites del componente.

Si bien el estudio de estas geometrías aportar al proceso de investigación, es evidente la complejidad geométrica – constructiva que representa, con lo cual, se pierde el principio de la viabilidad constructiva que Kolaveric (2001) explica es necesaria. Por este motivo, se hizo un ajuste de simplificación geométrica, donde se estudiaron formulaciones de entramado basado en el sistema voronoi (correlación entre los centros), bajo los principios del análisis anterior y bibliografía referente al tema (Wieslaw Rokicki, 2016) (ver **Tabla 11**).

Tabla 11
Simplificación de entramados voronoi.

Simplificación del Voronoi				
Muestra 1-3				Nota: Se tomaron en cuenta los centros de saturación, para la generación de una retícula.
Muestra 4-6				Nota: Este proceso de simplificación gestiona zonas densas y concentradas a base de una retícula ortogonal. Brindando un sistema más simplificado
Muestra 7-9				Nota: Se mantienen áreas de apertura y baja densidad en el módulo.

Nota: Elaboración propia. En rojo se seleccionaron las 3 geometrías con mayor aporte. La simplificación es el resultado de la iteración bibliográfica y el modelado digital.

En las muestras 1-3, se mantienen los puntos de saturación; estos se convierten en nodos de control para la generación de una retícula más ortogonal. El análisis muestra una transición de



celdas orgánicas hacia una trama de líneas de flujo que, aunque mantienen una deformación basada en los puntos críticos, comienzan a alinearse con un sistema de coordenadas más regular. Esto facilita la interpretación de los puntos de mayor carga estructural dentro del módulo. La muestra no. 2 se seleccionó bajo este criterio de continuidad.

La segunda serie de muestras (muestras 4-6) evidencia un proceso de simplificación técnica que gestiona las zonas de alta densidad y concentración de esfuerzos, como en el proceso iterativo anterior. A través del uso de una retícula ortogonal adaptativa, se logró concentrar la estructura en los puntos donde el código genético del sistema detecta necesidades críticas de soporte. El resultado es un sistema más simplificado que permitió estandarizar el panel sin perder la capacidad de respuesta a los requerimientos de resistencia e impacto identificados en las fases experimentales (fase 05). En este caso, la muestra seleccionada es la no. 4, debido a que mostró una mayor adaptación a la concentración de puntos.

En las iteraciones finales (muestras 7-9), se observó la persistencia de áreas de apertura y baja densidad en el módulo. La simplificación en esta etapa reduce el número de elementos estructurales, dejando espacios amplios que corresponden a las zonas de menor exigencia mecánica. Se seleccionó la muestra no. 8 para su estudio complementario

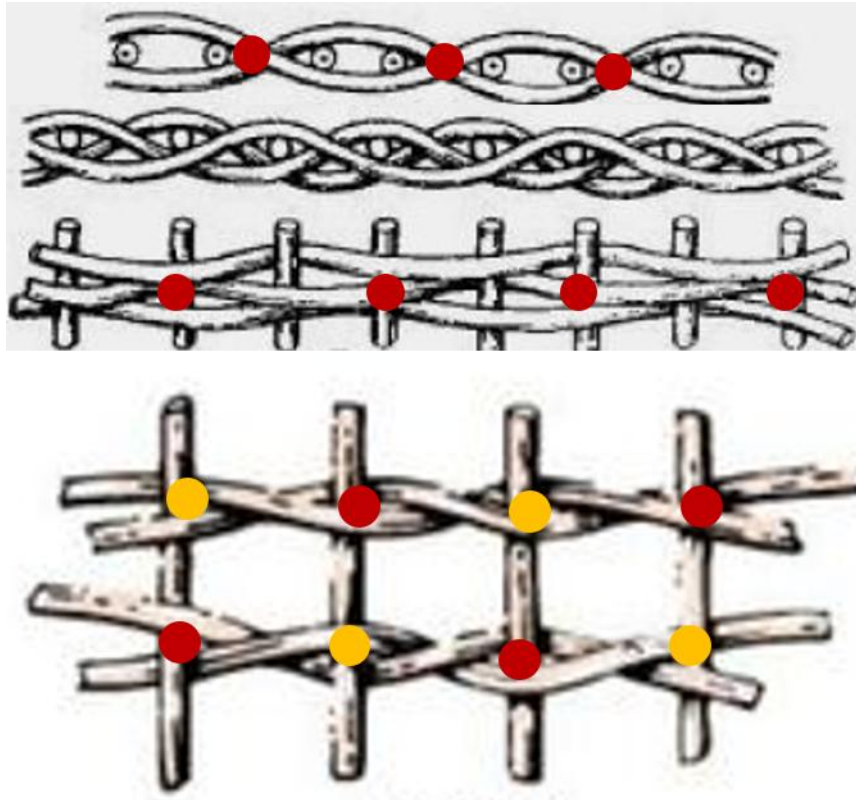
Este proceso de traducción geométrica permite que la complejidad del diagrama de Voronoi se convierta en una guía constructiva ejecutable. La transición hacia retículas ortogonales simplificadas asegura que el sistema de paneles pueda ser producido bajo estándares de calidad, manteniendo una alineación con el marco normativo y facilitando la labor de los operarios mediante un sistema de ensamblaje lógico y repetible (Novas , 2010).

Una nota importante es comprender que la simplificación de la geometría del entramado no representa la pérdida del concepto del uso del voronoi, sino que aporta un fundamento para la optimización del sistema, ya sea en material o en sus características estructurales. En este sentido, se retomaron y analizaron los entramados expuestos por Zazu (2021) en su estudio de innovación dentro de los sistemas mixtos de tierra (ver **Figura 60**).



Figura 60

Entramados para sistemas mixtos de tierra. Aplicación al proceso de simplificación de Voronoi.



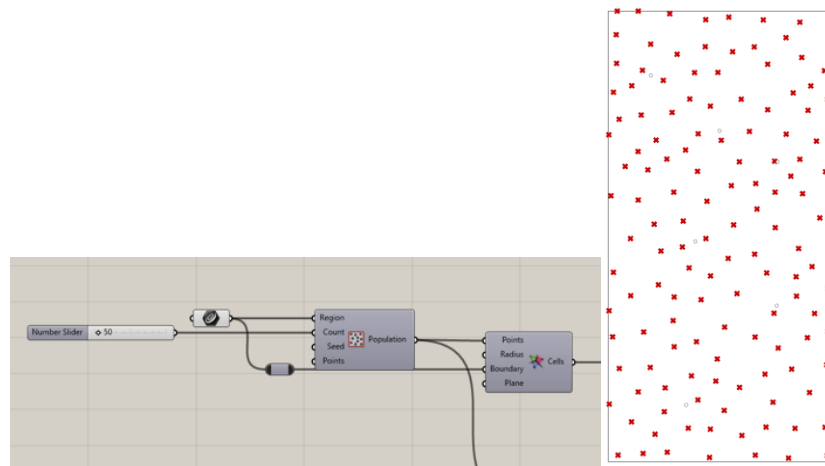
Nota: Esta imagen fue construida a partir de los tejidos de entramado que muestra Zazu (2021) en su investigación. En amarillo y rojo se identifican los puntos centrales que se respetan para la construcción del tejido, siguiendo el principio de interconexión del voronoi.

Al analizarlos, se observó que los entramados propuestos por Zazu (2021) responden a los principios del voronoi al gestionarse bajo una regularización de puntos que interconectan los elementos verticales con horizontales, y estos mismos puntos generan el nodo de la celda geométrica que estabiliza el sistema. Para corroborar esto, se tradujo a un sistema paramétrico basado en una codificación de grasshopper. Este proceso comenzó con la generación de puntos base del módulo (ver **Figura 61**), para después gestionar un filtrado de puntos a partir de la simplificación (ver **Figura 62**) y por último desarrollar el armado del entramado para su análisis (ver **Figura 63**).



Figura 61

Generación de puntos base de la geometría.

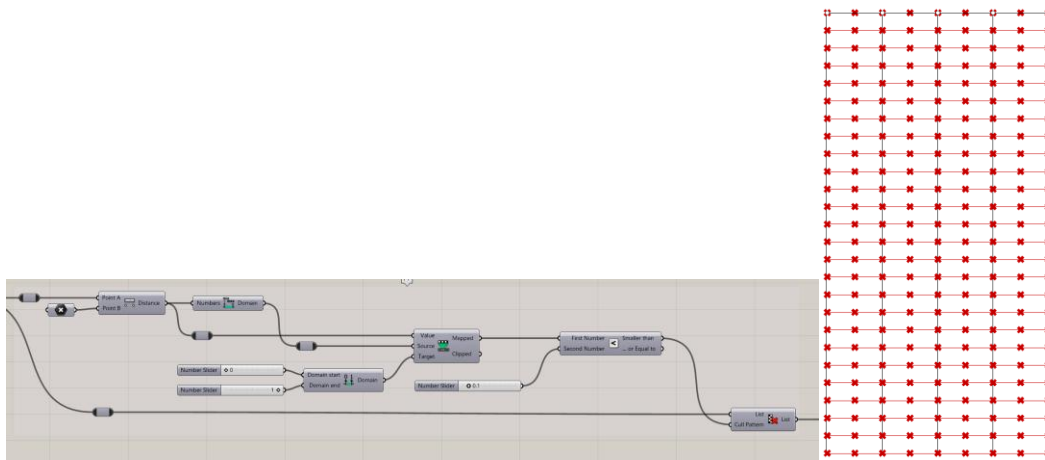


Nota: La imagen de la izquierda representa el código elaborado para obtener los puntos base de la geometría, la imagen de la derecha es el resultado del código.

La generación de puntos en el módulo aplicado permitió delimitar el área de aplicación del código para así tener un mayor control y evitar variables no controladas.

Figura 62

Filtrado y organización de los puntos base.



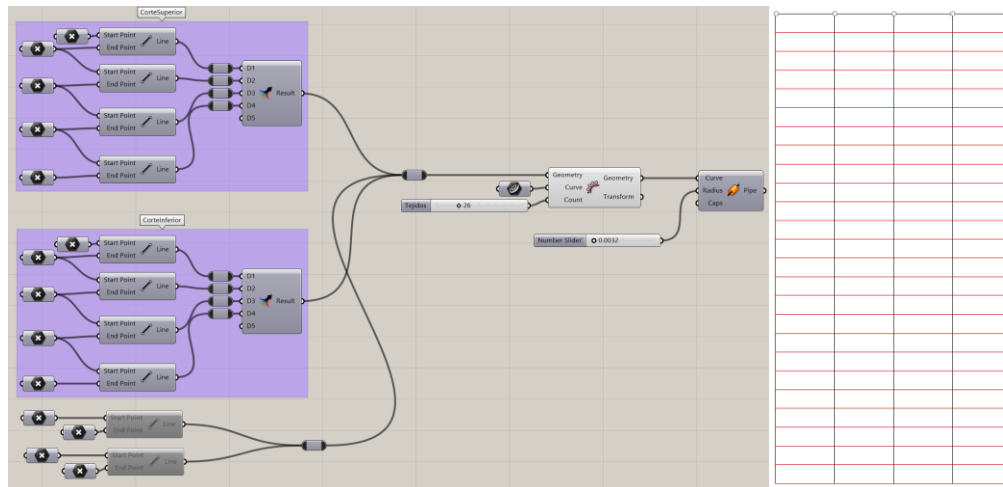
Nota: La imagen de la izquierda representa el código elaborado para obtener los puntos base de la geometría, la imagen de la derecha es el resultado del código.

Una vez generados los puntos, se procedió al filtrado y simplificación de los puntos, para generar un sistema más ortogonal basado en las propuestas que se analizaron.



Figura 63

Armado del panel simplificado de base Voronoi.



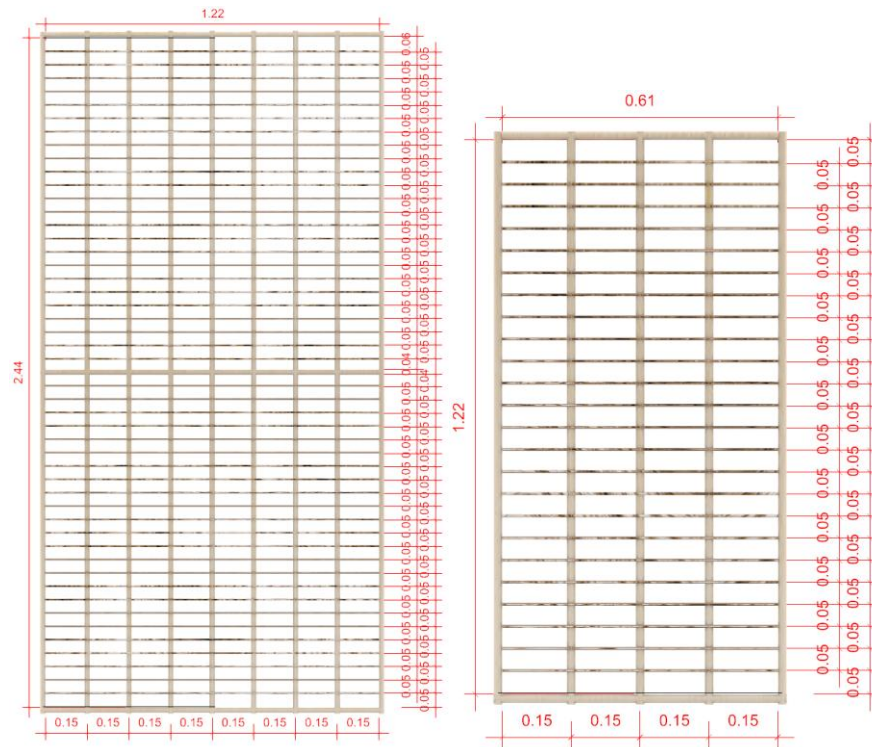
Nota: La imagen de la izquierda representa el código elaborado para obtener los puntos base de la geometría, la imagen de la derecha es el resultado del código

A partir del filtrado de los puntos y su organización simplificada, fue posible comenzar a dimensionar el modelo del módulo a partir de los elementos ya desarrollados. Dando como resultado un módulo de panel simplificado, con una menor complejidad constructiva (ver **Figura 64** y **Figura 65**)



Figura 64

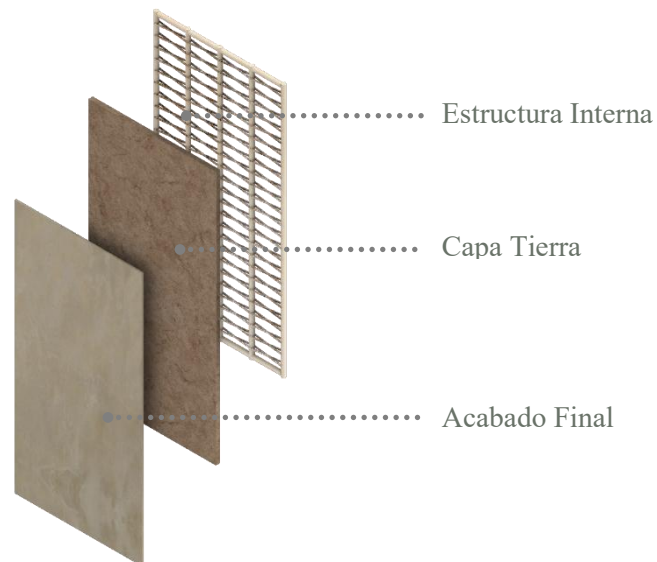
Dimensionamiento de módulo real y módulo de prototipo. Aplicación de entramado base voronoi.



Nota: Elaboración propia. A la izquierda el panel original planteado para el desarrollo de la investigación, a la derecha el módulo a escala 1:2 para ejecución de los prototipos y aplicación de ensayos.

Figura 65

Modelo generado a partir de la simplificación de la geometría tipo voronoi.



Nota: Elaboración propia.

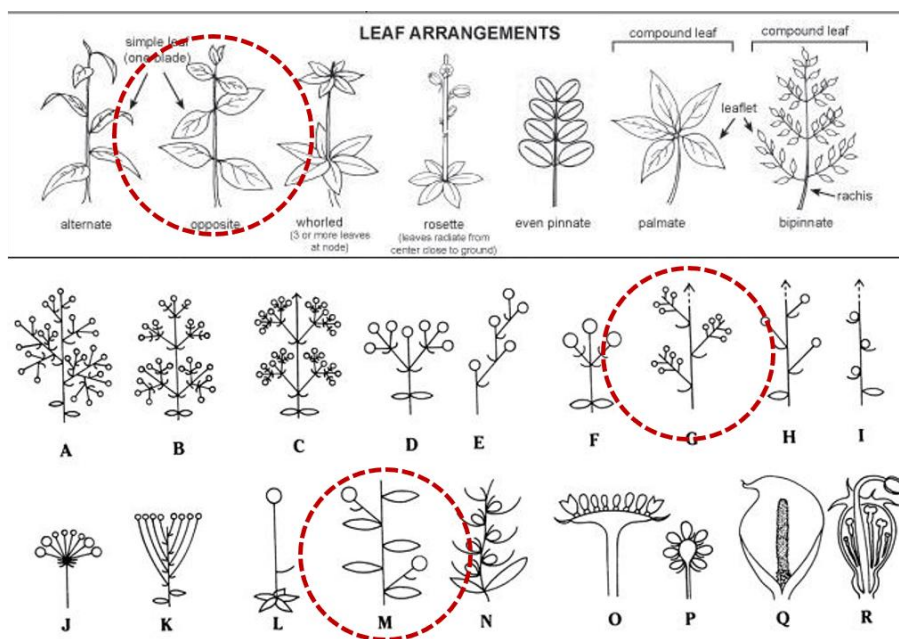


Entramado Ramificación Opuesta.

Para el desarrollo de este entramado, tal como se menciona en el transcurso de la presente investigación, hace referencia a las características de ramificación de vegetación endémica. En este sentido, se realizó un análisis de la composición de las ramificaciones de las plantas estudiadas (palo verde y mezquite) (ver **Figura 66**) con la intención de traducirlas a un sistema paramétrico donde sea posible controlar las variables de este tipo de geometrías.

Figura 66

Estudio de estructuras de ramificaciones.

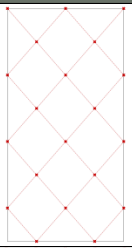
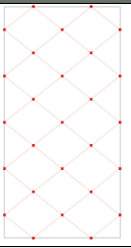
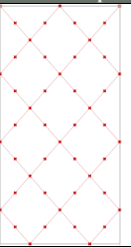
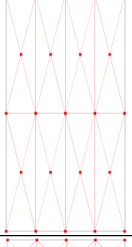
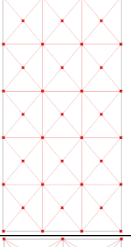
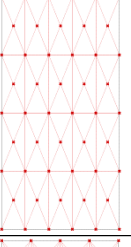
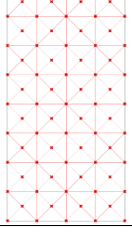
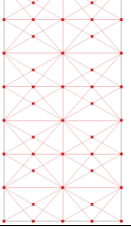
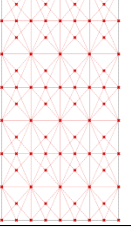


Nota: En la imagen se identifican diferentes estructuras de ramificación vegetal, aquellas dentro del círculo rojo corresponden a las que se hará la traducción paramétrica, pues corresponden a ramificaciones opuestas.

Al igual que en el proceso de gestión del entramado voronoi, para este proceso se siguieron el procedimiento de desarrollo paramétrico expuestos en la **Figura 39**, una vez realizado el procedimiento, se gestionó una matriz de iteraciones para la selección y estudio de cada una de las configuraciones (ver **Tabla 12**) realizadas con apoyo de las herramientas de *Grasshopper*.



Tabla 12
Estudio de iteraciones en modulaciones de ramificación opuesta.

Modulaciones de Ramificación Opuesta.				
Muestra 1-3				Nota: Estudio a partir de sistemas opuestos con saturación y modulación controlada. Premeando estructuras más olgadas y flexibles.
Muestra 4-6				Nota: Las iteraciones en este estudio fueron más densas, identificando capacidades estructurales más rígida.
Muestra 7-9				Nota: Saturación y complejidad del entramado, identificación de características estructurales más rígidas en el sistema.

Nota: Elaboración propia. Cada hilera representa un proceso de iteración determinado, con lo cual se prepara el sistema para pasar al estudio de simplificación.

En las primeras iteraciones (muestras 1-3), se analizaron sistemas opuestos con una saturación y modulación controlada. Esta disposición geométrica en estas muestras generó estructuras más holgadas y flexibles. En este sentido, estos ensayos buscaron una menor concentración de material estructural, permitiendo una mayor ligereza del sistema y facilitando la integración de la tierra cruda como material de relleno sin exceder el peso propio del componente.

Las iteraciones en la segunda serie (muestras 4-6) presentaron una densidad mayor en el entramado. El análisis permite identificar capacidades estructurales más rígidas, derivadas de la reducción en la longitud de los miembros de la ramificación y el aumento de los nodos de conexión.

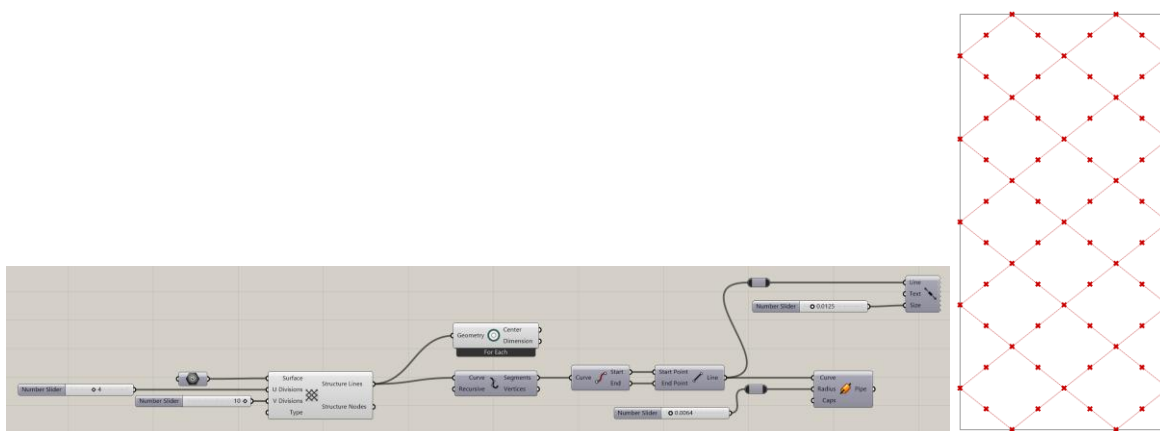
Al incrementar al máximo los puntos de intersección en el sistema de ramificación opuesta (muestras 7-9), se identifican las características estructurales de mayor rigidez disponibles en el modelo. Esta saturación permite una distribución de cargas altamente eficiente (Carazas & Rivero, Bahareque. Guía de construcción parasísmica, 2002), aunque requiere un análisis detallado del nivel de complejidad constructiva.

El desarrollo de estas modulaciones ofrece una gradación técnica que va desde la flexibilidad hasta la rigidez absoluta. Al aplicar estos criterios al diseño del panel tipo sándwich, es posible optimizar el marco estructural de acuerdo con las necesidades de resistencia e impacto (ISO, 1988), manteniendo siempre la compatibilidad con el revestimiento de tierra cruda (Zazu Vives, 2021) y los estándares de calidad ambiental definidos en el marco normativo de la investigación (Secretaría de Economía, 2013).

El desarrollo del entramado de ramificación opuesta se basó en la iteración no.º 2. En el caso de esta propuesta, no se aplicó una simplificación geométrica, pero sí una adaptación dentro del código de generación, para obtener un balance en las características estructurales en cuanto a la distribución de los nodos (ver **Figura 67**).

Figura 67

Codificación corregida para redistribución de nodos en entramado de ramificación opuesta.



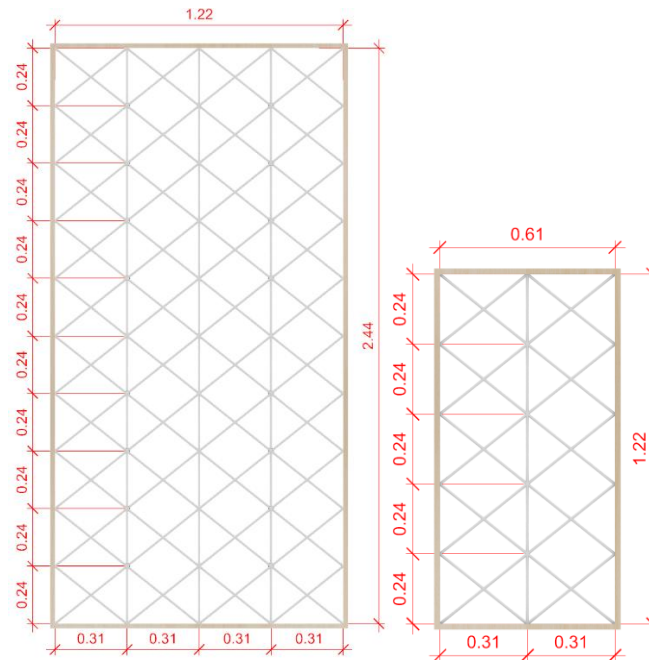
Nota: La imagen de la izquierda representa el código elaborado para obtener los puntos base de la geometría, la imagen de la derecha es el resultado del código de redistribución de nodos.

Al hacer esta redistribución, se estabilizan los puntos de carga, permitiendo que el panel siga funcionando como un elemento flexible y dúctil, pero ganando resistencias (teoría que es estudiada en la Fase 05) ante impactos no controlados. En base esto, se comenzó con el desarrollo de la propuesta del entramado (ver **Figura 68** y **Figura 69**).



Figura 68

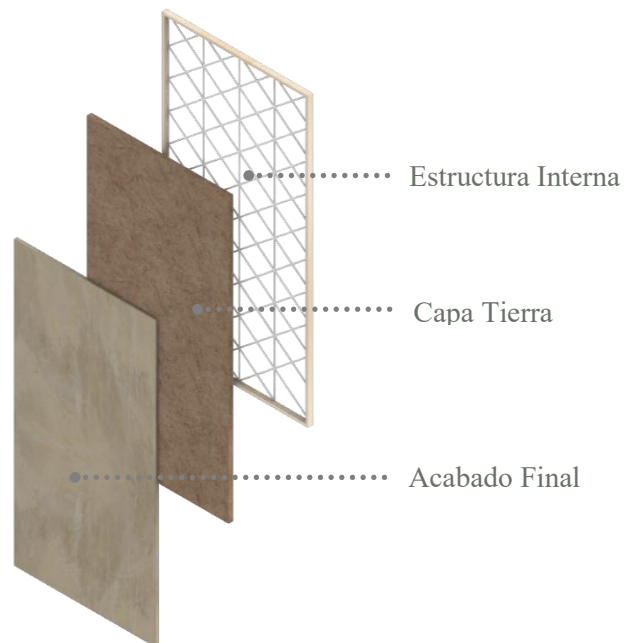
Dimensionamiento de módulo real y módulo de prototipo. Aplicación de entramado de ramificación opuesta.



Nota: Elaboración propia. A la izquierda el panel original planteado para el desarrollo de la investigación, a la derecha el módulo a escala 1:2 para ejecución de los prototipos y aplicación de ensayos.

Figura 69

Vista isométrica de capas de panel.



Nota: Elaboración propia



Evaluación estructural y de viabilidad de entramados.

Tal como se describió en el apartado anterior. El desarrollo de cada uno de los entramados, el propósito de las iteraciones y los ajustes realizados fue obtener una optimización adecuada para el desarrollo del panel, en cuanto a su capacidad estructural. A continuación, se describen los hallazgos empleados en el análisis y evaluación estructural del panel.

Como se describió en la metodología, se hará un sistema comparativo entre el entramado *Voronoi* y la *Ramificación Opuesta* y la evaluación del efecto del refuerzo de malla pollera hexagonal. No se consideran núcleos, solo se considera el entramado desarrollado con la aplicación de refuerzo y el cubrimiento de tierra.

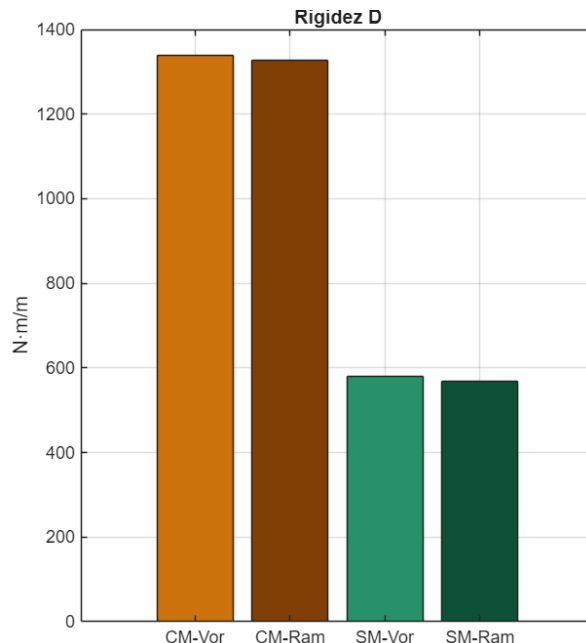
Los resultados obtenidos mediante el modelo computacional implementado en MATLAB (ver **Anexo 3**) permiten comparar el desempeño estructural del panel mixto de tierra cruda bajo cuatro escenarios diferenciados: (A1) CON malla – Voronoi simplificado, (A2) CON malla – Ramificación opuesta, (B1) SIN malla – Voronoi simplificado y (B2) SIN malla – Ramificación opuesta. La evaluación abarca ocho métricas fundamentales que caracterizan la respuesta mecánica del sistema ante las cargas de diseño definidas para Hermosillo, Sonora ($V_d = 130$ km/h, $a_s = 0.40$ g, combinación 1.2D + 1.0W + 1.0S).

El análisis crítico a continuación examina de manera individual cada gráfica producida, identificando las diferencias cuantitativas entre escenarios, los valores que exceden o se aproximan a los límites normativos y las implicaciones de diseño derivadas de cada resultado. La interpretación se realiza en el marco de las referencias teóricas y normativas que fundamentan el modelo aplicado.

Rigidez flexional D (N·m/m)

Los escenarios CON malla (CM-Vor y CM-Ram) presentan valores de D en torno a 1,300 – 1,340 N·m/m, mientras que los escenarios SIN malla (SM-Vor y SM-Ram) registran valores cercanos a 580 – 590 N·m/m (ver **Figura 70**). La diferencia entre geometrías dentro de cada sistema es marginal (inferior al 2%), siendo el Voronoi ligeramente superior en ambos casos.



Figura 70.*Rigidez Flexional. Análisis del modelo matemático.*

Nota: Gráfico desarrollado en MATLAB. A partir de la ejecución del modelo matemático.

Para un análisis más exacto los resultados de la gráfica mostrada son interpretados a través de la **Tabla 13** la cual especifica los valores reales expuestos con anterioridad.

Tabla 13*Interpretación de los valores mostrados en la Rigidez Flexional D.*

Escenario	Valor	Interpretación
CM-Voronoi	~1,340 N·m/m	Mayor rigidez del conjunto. Referencia óptima.
CM-Ramificación	~1,310 N·m/m	Rigidez similar a Voronoi. Diferencia < 2%.
SM-Voronoi	~590 N·m/m	Caída de ~56% respecto a CM-Vor.
SM-Ramificación	~580 N·m/m	Caída de ~57% respecto a CM-Ram.

Nota: Desarrollado a partir de la gráfica obtenida de MATLAB. Se identifican los valores reales de los niveles de rigidez flexional de los módulos de entramados.

El incremento de rigidez que aporta la malla pollera hexagonal es sustancial: al incorporarla, la rigidez flexional D se incrementa aproximadamente en un 125% respecto al sistema sin malla. Este resultado es coherente con la formulación de la Teoría Clásica de Laminados (CLT) utilizada: aunque el espesor de la malla es de tan solo 1 mm, su posición en la



capa exterior, alejada del eje neutro, maximiza su contribución al momento de inercia por el término de Steiner ($A \cdot d^2$), elevando D de manera desproporcionada a su volumen.

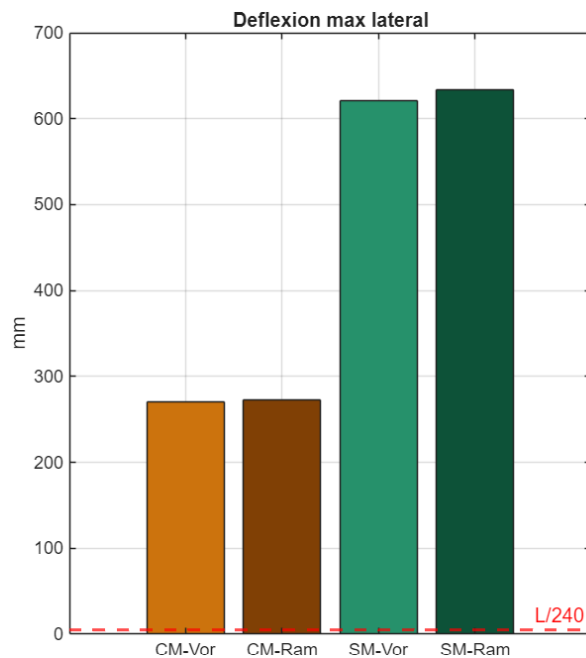
La escasa diferencia entre Voronoi y Ramificación dentro de cada sistema ($< 2\%$) indica que, en términos de rigidez global D, la geometría del tejido de carrizo tiene un efecto secundario frente a la presencia o ausencia de la malla. Esto se explica porque D está dominado por las capas más alejadas del eje neutro, es decir, la malla y el acabado, mientras que el carrizo, siendo una capa delgada posicionada cerca del centroide, contribuye modestamente al término de Steiner. La geometría del tejido sí influye, sin embargo, en la resistencia efectiva del carrizo a flexión (vía el factor η_{flex}), parámetro que se analiza en la sección de factores de seguridad.

En resumen, la malla pollera hexagonal es el componente de mayor impacto sobre la rigidez del sistema. Su inclusión duplica con creces la resistencia a la flexión del panel, siendo este el beneficio mecánico más significativo del refuerzo.

Deflexión máxima lateral (mm).

Los escenarios CON malla registran deflexiones de aproximadamente 270 – 280 mm, mientras que los SIN malla alcanzan 620 – 660 mm. El límite $L/240$ para un panel de 1.22 m de alto equivale a 5.08 mm, representado en la gráfica como línea roja discontinua en la base (ver **Figura 71**)



Figura 71*Deflexión máxima lateral. Análisis del modelo matemático*

Nota: Gráfico desarrollado en MATLAB. A partir de la ejecución del modelo matemático.

De acuerdo con el análisis, todos los escenarios exceden ampliamente el límite de servicio $L/240 = 5.08$ mm. El escenario menos desfavorable (CM-Voronoi, ~270 mm) supera el límite en un factor de aproximadamente 53x. Este resultado requiere una revisión profunda de las condiciones de apoyo y de las hipótesis de carga.

Si bien parece extremo, debe interpretarse en su contexto correcto, principalmente que no se está analizando el sistema con las opciones de núcleo, sino solo el entramado con la tierra cruda y la aplicación del refuerzo de malla (dependiendo del modelo). La magnitud de las deflexiones calculadas, del orden de cientos de milímetros en un panel de 610 mm de ancho, refleja una combinación de tres factores concurrentes:

- Carga lateral muy elevada. La combinación de viento ($V_d = 130$ km/h en Región III) y sismo ($a_s = 0.40g$, Zona C) aplicada sobre un panel esbelto de baja masa genera presiones laterales de diseño significativas. Hermosillo representa una de las condiciones de carga más exigentes del territorio mexicano.
- Rigidez D moderada. Incluso con malla, $D \sim 1,300$ N·m/m es un valor bajo comparado con paneles de mampostería o concreto, lo que es inherente a la



naturaleza del material de tierra cruda y al módulo de elasticidad del compuesto SC+Paja ($E \sim 43 \text{ MPa}$).

- c) Condición de borde conservadora. El modelo asume cuatro bordes simplemente apoyados, que es la condición más desfavorable. En la práctica constructiva, el panel puede estar parcialmente restringido en sus bordes laterales por la estructura portante o por trabas de los paneles adyacentes, lo que reduciría las deflexiones reales.

Desde el punto de vista del diseño, este resultado sugiere que el panel no debería emplearse como elemento de cerramiento libre sometido directamente a las cargas de viento y sismo de Hermosillo sin un sistema de apoyo intermedio. La incorporación de montantes verticales, marcos de madera o carrizo de mayor sección que reduzcan el vano libre de 1.22 m a 0.40 – 0.60 m reduciría la deflexión en un factor del orden de $(b_{largo}/b_{corto})^4$, por la dependencia de cuarta potencia del vano en la fórmula de Timoshenko (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1959).

La relación entre los escenarios con y sin malla es consistente con el coeficiente de rigidez: $DCM/DSM \sim 2.25$, y la deflexión es inversamente proporcional a D , de modo que $\Delta SM/\Delta CM \sim 2.25$, lo que coincide con la razón observada ($\sim 620/275 \sim 2.25$). Este comportamiento valida la coherencia interna del modelo.

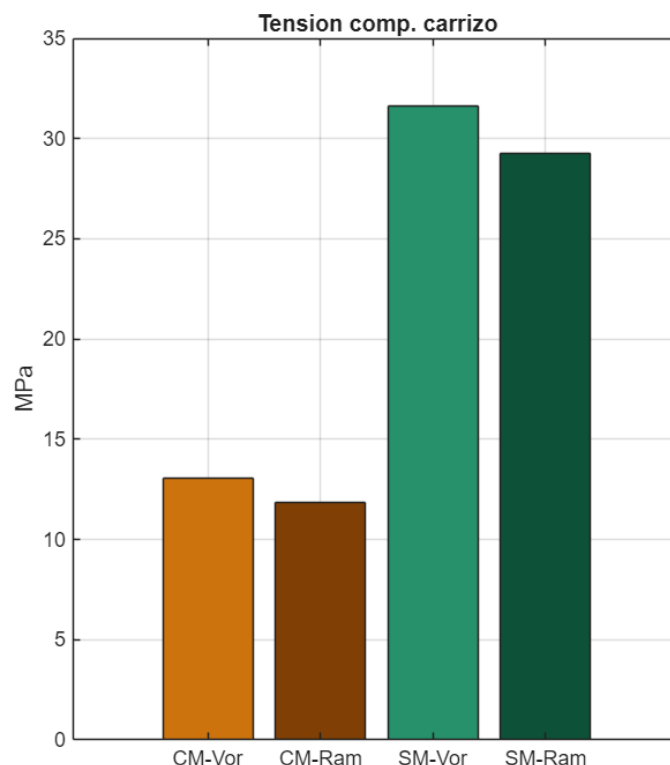
Tensión de compresión en el carrizo (MPa)

Los escenarios CON malla presentan tensiones de compresión en el carrizo de aproximadamente 12 – 13 MPa, mientras que los SIN malla alcanzan 29 – 33 MPa. El Voronoi sin malla ($\sim 33 \text{ MPa}$) supera al de Ramificación ($\sim 29 \text{ MPa}$) porque su menor factor η_{flex} concentra más esfuerzo por unidad de rigidez (ver **Figura 72**).



Figura 72

Tensión de compresión en carrizo. Análisis del modelo matemático.



Nota: Gráfico desarrollado en MATLAB. A partir de la ejecución del modelo matemático.

Para un análisis más exacto los resultados de la gráfica mostrada son interpretados a través de la **Tabla 14** **Tabla 13** la cual especifica los valores reales expuestos con anterioridad.

Tabla 14

Interpretación de los valores mostrados en el gráfico de tensión de compresión en el carrizo.

Escenario	Valor	Interpretación
CM-Voronoi	~12 MPa	Muy por debajo de la resistencia última (60 MPa). FS alto.
CM-Ramificación	~13 MPa	Similar a CM-Vor. Margen de seguridad amplio.
SM-Voronoi	~33 MPa	Tensión alta. Margen reducido respecto a los 60 MPa.
SM-Ramificación	~29 MPa	Menor que SM-Vor por mayor η_{flex} de Ramificación.

Nota: Desarrollado a partir de la gráfica obtenida de MATLAB. Se identifican los valores reales de los niveles de tensión.



La resistencia última a flexión del carrizo (*Arundo donax*) se estableció en 60 MPa (Laborel-Preneron, 2016). Los escenarios CON malla operan a un 20 – 22% de esa resistencia, lo que implica factores de seguridad en torno a $FS \sim 4.5 - 5.0$, condición ampliamente segura. Los escenarios SIN malla elevan la tensión de trabajo al 48 – 55% de la resistencia última, con factores de seguridad de $FS \sim 1.8 - 2.1$, que, aunque superan el umbral mínimo de 1.5, dejan un margen considerablemente más estrecho.

Resulta relevante observar que el entramado de Ramificación opuesta produce menor tensión en el carrizo que el de Voronoi en ambos sistemas. Esto se explica por su mayor factor de eficiencia a flexión ($\eta_{flex} = 0.85$ vs. 0.80): la continuidad de las fibras en la estructura ramificada distribuye mejor las tensiones de compresión a lo largo del elemento, reduciendo los picos locales. Este comportamiento es consistente con los estudios de Laborel-Preneron (2016) sobre la influencia de la geometría del tejido de fibra natural sobre la redistribución de esfuerzos.

En términos de diseño, la malla pollera reduce la tensión en el carrizo en un factor aproximado de 2.5x, lo que constituye un beneficio directo en la durabilidad del elemento de carrizo a largo plazo, reduciendo el riesgo de microfisuración por compresión cíclica bajo cargas de viento repetidas.

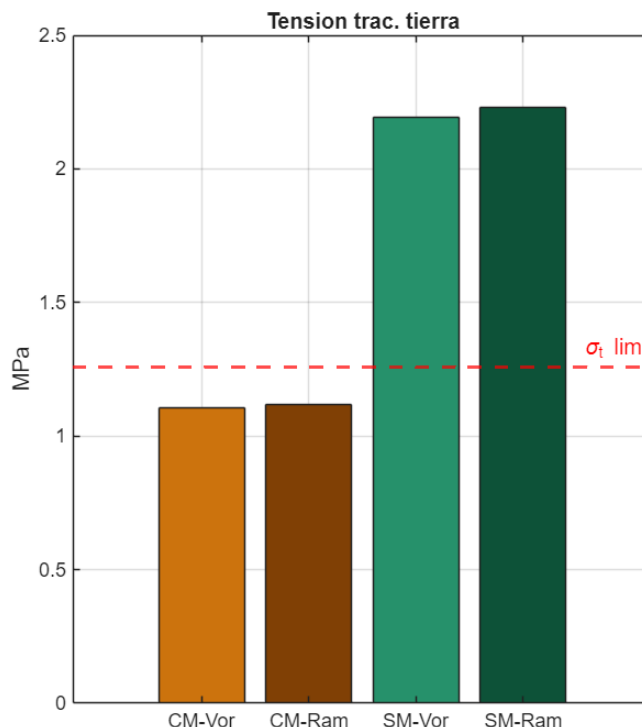
Tensión de tracción en la tierra (MPa)

En este análisis, los escenarios CON malla registran tensiones de tracción de aproximadamente 1.15 MPa, mientras que los SIN malla alcanzan 2.15 – 2.25 MPa. La línea de límite (σ_{lim}) trazada en la gráfica (ver xx) a ~ 1.25 MPa indica que los dos escenarios SIN malla superan claramente el límite, y los escenarios CON malla se sitúan justo por debajo de él. En este sentido, Los escenarios B1 (SM-Voronoi) y B2 (SM-Ramificación) superan la resistencia a tracción del compuesto SC + Paja (~ 1.25 MPa), indicando riesgo real de fisuración en la zona de tracción. Los escenarios CON malla operan en el límite, lo que exige verificación adicional



Figura 73

Tensión de tracción en la Tierra. Análisis del modelo matemático.



Nota: Gráfico desarrollado en MATLAB. A partir de la ejecución del modelo matemático.

La resistencia a tracción del compuesto tierra + paja se calcula en el modelo conforme a Halpin-Tsai como la combinación ponderada de la contribución de la fibra de paja y la resistencia a tracción de la tierra SC. El valor resultante (~1.25 MPa) representa el umbral crítico que no debería superarse para evitar la formación de grietas de tracción en la cara inferior del panel.

Los escenarios SIN malla superan este límite en un factor de ~1.7 – 1.8x, lo que evidencia que el compuesto SC + Paja solo no es suficiente para resistir la tracción generada por las cargas de diseño de Hermosillo. La paja incorporada en proporción 1:1 aporta ductilidad y control de la retracción, conforme a Yetgin et al. (2008) y Binici et al. (2005) pero su resistencia a tracción como fibra corta aleatoria no es suficiente para compensar las elevadas tensiones de flexión generadas por la combinación sísmica de la Zona C.

Los escenarios CON malla presentan tensiones de tracción que se aproximan al límite (~1.15 MPa vs. límite 1.25 MPa), resultando en factores de seguridad del orden de FS ~ 1.1 – 1.2 en la franja de 'límite', requiere revisión. Esto indica que incluso con malla, la zona de tracción merece atención especial en el diseño constructivo. Se recomienda orientar el panel de modo que



la cara de tracción quede hacia el interior del espacio, donde las solicitaciones de viento son menores, y aumentar el recubrimiento de tierra en la zona de tracción para distribuir los esfuerzos.

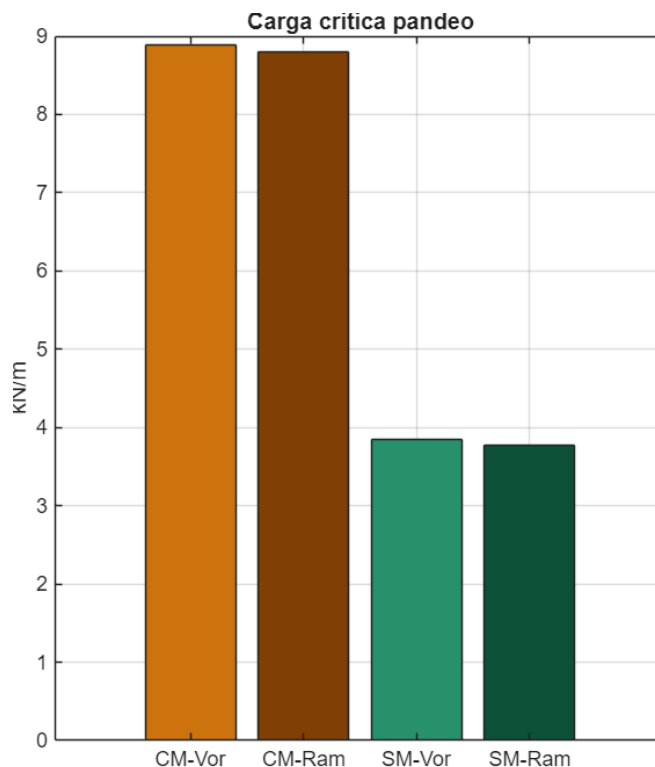
La geometría aplicada en los entramados tiene escasa influencia sobre esta métrica: tanto la basada en Voronoi como la de ramificación opuesta producen tensiones de tracción prácticamente idénticas dentro de cada sistema, dado que la posición de la fibra inferior de tierra respecto al eje neutro es la misma en ambos casos.

Carga crítica de pandeo (kN/m)

En este ejercicio se determinó que los escenarios CON malla registran $N_{cr} \sim 8.6 - 8.7$ kN/m, mientras que los SIN malla presentan valores de $\sim 3.8 - 3.9$ kN/m (ver **Figura 74**). La diferencia entre geometrías es nuevamente marginal dentro de cada sistema.

Figura 74

Carga crítica de pandeo. Análisis del modelo matemático.



Nota: Gráfico desarrollado en MATLAB. A partir de la ejecución del modelo matemático.

Para un análisis más exacto los resultados de la gráfica mostrada son interpretados a través de la **Tabla 15** **Tabla 13** la cual especifica los valores reales expuestos con anterioridad.



Tabla 15
Interpretación de carga crítica de pandeo.

Escenario	Valor	Interpretación
CM-Voronoi	~8.7 kN/m	Alta resistencia al pandeo. Margen amplio vs. carga axial.
CM-Ramificación	~8.6 kN/m	Prácticamente igual a CM-Vor.
SM-Voronoi	~3.9 kN/m	Reducción del 55%. Margen menor pero funcional.
SM-Ramificación	~3.8 kN/m	El escenario más vulnerable al pandeo.

Nota: Desarrollado a partir de la gráfica obtenida de MATLAB. Se identifican los valores reales de cargas críticas de pandeo de acuerdo con el tipo de entramado.

La carga crítica de pandeo se calcula conforme a la teoría de Euler para placas delgadas (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1959) $N_{cr} = \pi^2 D / b^2$. Al ser directamente proporcional a D , la relación $N_{cr,CM} / N_{cr,SM} \sim 2.25$ reproduce exactamente la razón de rigideces, lo que valida la coherencia del modelo.

La carga axial actuante por peso propio ($N_{ax} = q_{PP} \times h$) es del orden de 10 – 15 N/m, varios ordenes de magnitud inferior a la carga crítica calculada, lo que implica factores de seguridad frente a pandeo superiores a 100 en todos los escenarios. Este resultado indica que el pandeo de Euler no es el modo de falla crítico para este panel en ninguna de las configuraciones analizadas, lo cual es esperado para paneles con relaciones de aspecto moderadas ($h/t \sim 35$).

Sin embargo, la reducción del 55% en N_{cr} que introduce la ausencia de malla es relevante en un contexto de carga axial acumulada, por ejemplo, si el panel forma parte de un sistema de piso y recibe cargas de losas superiores. En ese escenario, el sistema SIN malla sería significativamente más vulnerable. Para el uso como elemento de cerramiento autoportante, ambos sistemas presentan capacidad de pandeo suficiente.

Frecuencia propia fundamental (Hz)

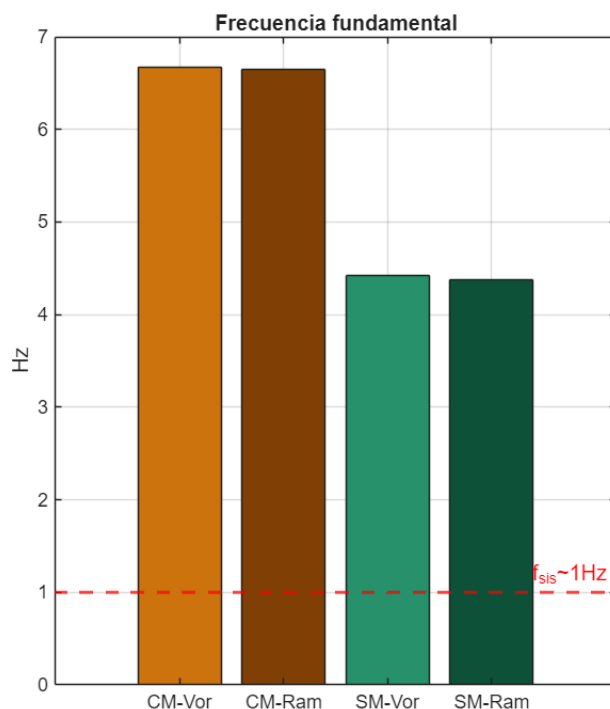
En este escenario, los entramados CON malla presentan frecuencias fundamentales de ~6.5 Hz, mientras que los SIN malla registran ~4.5 Hz. La línea de referencia sísmica ($f \sim 1$ Hz) se traza claramente por debajo de todos los escenarios (ver **Figura 75**). Todos los escenarios presentan



frecuencias fundamentales muy superiores a 1 Hz, lo que elimina el riesgo de resonancia sísmica en todos los casos analizados. Este resultado es favorable para la seguridad dinámica del panel

Figura 75

Frecuencia propia fundamental. Análisis del modelo matemático



Nota: Gráfico desarrollado en MATLAB. A partir de la ejecución del modelo matemático.

La frecuencia propia se calcula como $f_l = (\pi/b)^2 \times \sqrt{(D/m) / (2\pi)}$, donde m es la masa por unidad de área del panel. El resultado de $\sim 4.5 - 6.5$ Hz implica periodos propios de $T \sim 0.15 - 0.22$ s, valores que se ubican en la rama de alta frecuencia del espectro de diseño del NTCDS-2020 para la Zona C, donde la aceleración espectral es menor que la de pico. En consecuencia, no existe riesgo de amplificación dinámica por resonancia en ninguno de los cuatro escenarios.

La diferencia entre sistemas CON y SIN malla (~ 6.5 vs. ~ 4.5 Hz) refleja el incremento de rigidez D sin un aumento proporcional de masa: la malla pollera añade muy poca masa (densidad equivalente ~ 1.8 kg/m², que representa menos del 5% de la masa total del panel), pero incrementa D en $\sim 125\%$. Dado que f_l es proporcional a $\sqrt{(D/m)}$, el incremento de frecuencia es de $\sqrt{(2.25)} \sim 1.5x$, lo que concuerda con la razón observada ($\sim 6.5/4.5 \sim 1.44$).

Desde el punto de vista del diseño sísmico, la mayor frecuencia de los escenarios CON malla es beneficiosa porque aleja aún más al panel del rango de periodos dominantes del suelo en



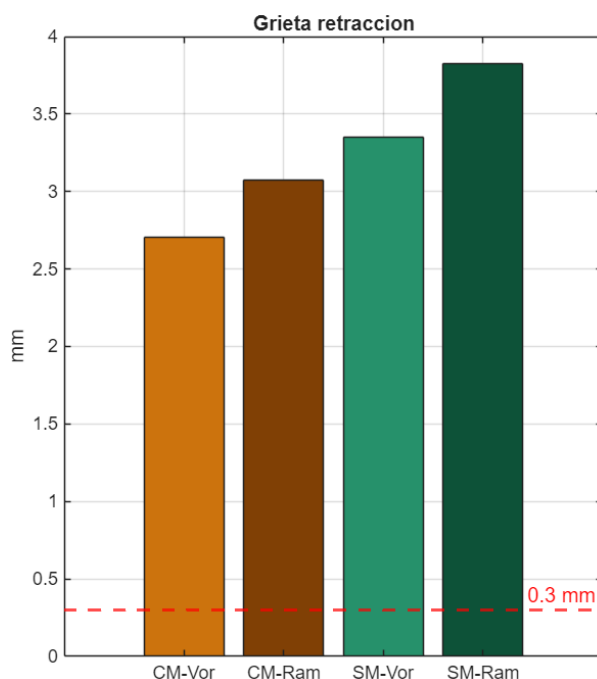
Hermosillo (donde los depósitos de suelo tipo I o II pueden amplificar frecuencias de 0.5 – 2.0 Hz). Ambos sistemas son aceptables dinámicamente, pero el CON malla ofrece un mayor margen de seguridad espectral.

Ancho de grieta por retracción (mm)

Este escenario es uno de los más importantes en cuanto a la gestión del sistema, debido al tipo de material empleado (tierra cruda) y la generación de sus patologías respecto a las condiciones higrotérmicas que pueden afectar. En este sentido, se resume que los entramados CON malla presentan anchos de grieta de $\sim 2.7 - 3.1$ mm, mientras que los SIN malla alcanzan $\sim 3.5 - 3.8$ mm. La línea de límite aceptable (0.3 mm) es claramente superada por todos los escenarios, y el límite tolerable (0.6 mm) también resulta insuficiente para todos los casos (ver **Figura 76**). Los anchos calculados (2.7 – 3.8 mm) indican que la retracción por secado es el modo de daño más crítico del sistema, especialmente en el clima árido de Hermosillo ($T_{\text{max}}=50$ C, $ft=1.48$).

Figura 76

Ancho de grieta por retracción. Análisis del modelo matemático.



Nota: Gráfico desarrollado en MATLAB. A partir de la ejecución del modelo matemático.

La retracción por secado constituye el mecanismo de daño más limitante del panel en el contexto climático de Hermosillo. El modelo incorpora un factor de amplificación térmica $ft = 1.48$ que refleja el efecto de la alta temperatura sobre la cinética de evaporación, conforme a Walker



& Stace (1997). Este factor eleva la deformación de retracción base del suelo SC ($\epsilon_{ret} = 0.132\%$) a un valor de $\epsilon_{ret,total} = 0.195\%$ antes de la reducción por paja.

Los valores calculados de 2.7 – 3.8 mm superan en un orden de magnitud el límite aceptable de 0.3 mm, lo que significa que la fisuración por retracción es prácticamente inevitable durante el proceso de secado del panel en condiciones ambientales de Hermosillo. Houben & Guillaud (1994) y Minke (2005) documentan que este fenómeno es el principal mecanismo de daño temprano en la tierra cruda, especialmente cuando el secado ocurre bajo exposición directa al sol y viento seco.

La malla pollera reduce el ancho de grieta en un ~25 – 30% respecto al sistema sin malla, beneficio cuantificable pero insuficiente para llevar los valores dentro de los límites aceptables. La reducción que aporta la malla opera mediante el mecanismo de restricción de membrana: al limitar la deformación libre del compuesto tierra-paja, la malla actúa como refuerzo distribuido que reduce la amplitud de la grieta, aunque no puede eliminarla completamente.

Este resultado tiene importantes implicaciones constructivas. Las estrategias de mitigación recomendadas son:

- I. Curado húmedo prolongado durante al menos 7 – 14 días, manteniendo el panel protegido de la evaporación directa;
- II. Adición de fibra adicional o incremento de la fracción volumétrica de paja en zonas críticas;
- III. Aplicación del acabado exterior en capas sucesivas una vez que la mayor parte de la retracción primaria ha ocurrido;
- IV. Diseño de juntas de retracción que guíen la fisuración hacia líneas controladas. Estas prácticas son consistentes con las recomendaciones de Minke (2005) y Laborel-Preneron (2016) para construcción con tierra en climas áridos.

Factores de seguridad — síntesis comparativa

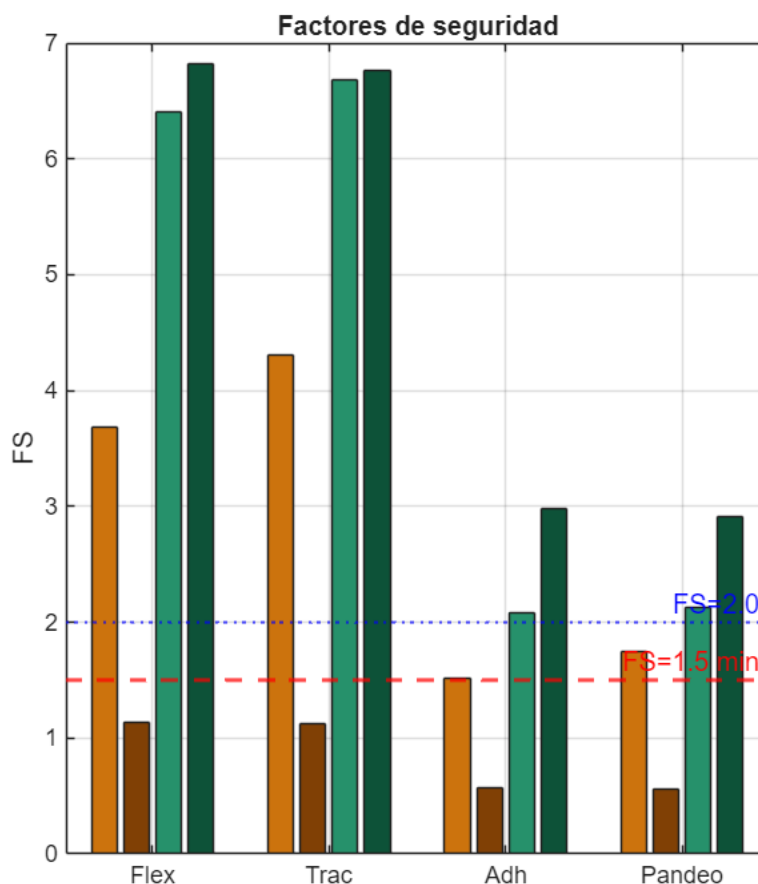
Por último, se analizaron los factores de seguridad (FS) en cuatro verificaciones: Flexión (Flex), Tracción (Trac), Adherencia (Adh) y Pandeo. Las líneas de referencia indican $FS = 1.5$



(mínimo aceptable, línea roja discontinua) y $FS = 2.0$ (condición segura, línea azul punteada) (ver **Figura 77**).

Figura 77

Factores de Seguridad. Análisis del modelo matemático.



Nota: Gráfico desarrollado en MATLAB. A partir de la ejecución del modelo matemático.

FS de flexión del carrizo (Flex). Los entramados CON malla presentan $FS \sim 3.5$ (verde oscuro / ámbar oscuro), claramente por encima de 2.0, condición segura. Los escenarios SIN malla muestran $FS \sim 1.2 - 1.4$ (verde claro / verde oscuro), ubicándose en la franja de 'límite', requiere revisión. Esto confirma que, sin malla, el carrizo trabaja cerca de su capacidad máxima bajo las cargas de Hermosillo.

FS de tracción de la tierra (Trac). Los entramados CON malla alcanzan $FS \sim 4.5 - 6.5$, valores ampliamente seguros. Los SIN malla presentan $FS \sim 6.5 - 6.8$ para la resistencia a tracción del compuesto, valores que parecen contradictorios con la alerta de la **Figura 73**. Esta diferencia se explica porque el FS de tracción en la gráfica de factores de seguridad compara la resistencia a



tracción del compuesto SC + Paja con la tensión de tracción calculada vía el módulo de elasticidad del compuesto, mientras que la alerta en la **Figura 73** refleja la comparación directa con la resistencia característica de la interfaz. Los valores altos de FS en tracción para el sistema SIN malla indican que el compuesto en sí tiene capacidad suficiente, pero la zona de interfaz con el acabado es el punto crítico.

FS de adherencia (Adh). Este es el factor de seguridad más crítico de toda la evaluación. Los cuatro entramados presentan FS de adherencia notoriamente bajos: los CON malla muestran $FS \sim 1.7 - 2.1$, en la franja aceptable; los SIN malla presentan $FS \sim 0.5 - 0.7$, muy por debajo del mínimo de 1.5. Esto indica que, en los escenarios sin malla, la cizalla en la interfaz tierra-acabado supera la resistencia de adherencia ($\tau_{adh} = 50 \text{ kPa}$), lo que implica riesgo real de desprendimiento del acabado bajo las cargas de diseño.

FS de pandeo (Pandeo). Los cuatro entramados presentan FS de pandeo de $2.8 - 3.1$, todos por encima de 2.0, es decir, condición segura. Como se discutió en el apartado de “Carga crítica por pandeo” (p.133), la carga axial actuante es muy pequeña respecto a la carga crítica de Euler, por lo que el pandeo no es el modo de falla gobernante en ninguna configuración.

Recomendaciones de diseño.

- **La malla pollera hexagonal es el componente de mayor impacto positivo.** Su inclusión incrementa la rigidez D en $\sim 125\%$, reduce la deflexión a la mitad, disminuye las tensiones en el carrizo en un factor de $2.5x$ y mejora el FS de adherencia de condición de falla a condición aceptable. Para el contexto climático de Hermosillo, la malla es un elemento indispensable del sistema constructivo.
- **La deflexión máxima excede el límite en todos los escenarios.** Se recomienda no emplear el panel como elemento de cerramiento libre ante viento y sismo sin un sistema de apoyo intermedio. La reducción del vano libre a $0.40 - 0.50 \text{ m}$ mediante montantes de carrizo o madera disminuiría la deflexión en un factor de $10 - 20x$ por la dependencia de cuarta potencia del vano.
- **La retracción por secado es el modo de daño más crítico.** Los anchos de grieta calculados ($2.7 - 3.8 \text{ mm}$) superan ampliamente los límites aceptables. El curado húmedo prolongado (> 14 días), la adición de fibra adicional y el diseño de juntas controladas son medidas obligatorias en el clima árido de Hermosillo.



- **La geometría de ramificación opuesta presenta ventajas en resistencia a la compresión del carrizo.** Aunque la diferencia con Voronoi es moderada ($< 15\%$), la continuidad de fibra de la geometría ramificada reduce los picos de tensión en el carrizo y mejora marginalmente el FS de flexión. Para aplicaciones donde la resistencia del carrizo sea crítica, la ramificación opuesta es la geometría recomendada.
- **El sistema CON malla + Ramificación opuesta (A2) es el escenario de mejor desempeño global.** Combina alta rigidez ($D \sim 1,310 \text{ N}\cdot\text{m/m}$), menor tensión en el carrizo, frecuencia fundamental alejada del rango sísmico crítico y factores de seguridad por encima de los umbrales mínimos en flexión, pandeo y adherencia. La única métrica que requiere atención adicional en este escenario es la retracción por secado.

Traducción del modelo digital al sistema constructivo.

Se realizó una interpretación de los elementos desarrollados paramétricamente, de manera digital al campo constructivo para de esta manera hilar de manera más íntegra todo lo resuelto en esta fase a la elaboración de los prototipos. A diferencia de una simple representación gráfica, esta fase implicó la reinterpretación técnica del modelo digital, con el objetivo de garantizar su viabilidad en términos de materialización, ensamblaje y ejecución en obra.

Desarrollo del sistema del panel.

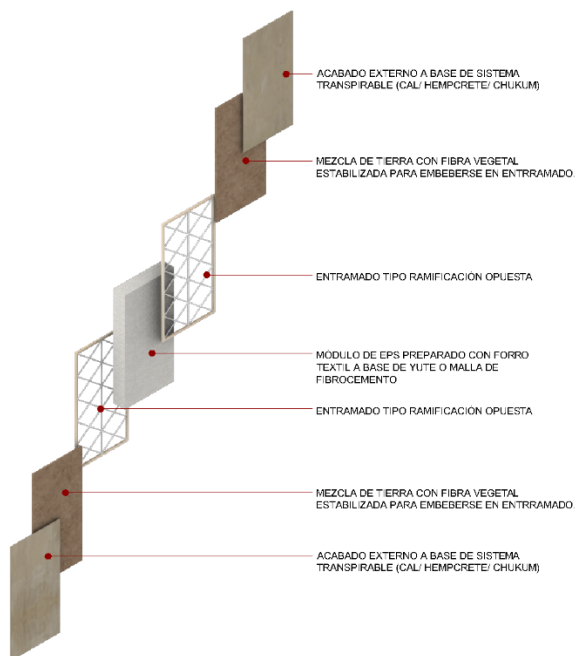
Una vez simplificados los entramados de las caras externas del panel, se procedió con la ejecución del diseño de la composición del sistema integral. En este sentido, se especificaron características reales de los elementos para el desarrollo del sistema constructivo, tales como, composición de la propuesta del sistema, con las opciones de núcleo revisadas (EPS y paja de trigo) y especificación de materiales empleados. Este proceso será complementado con ayuda de dibujos técnicos, así como con registro fotográfico del proceso.

Composición de paneles compuestos tipo sandwich.

A continuación, se presenta la composición de cada uno de los sistemas empleados. De acuerdo con la composición expuesta en la **Tabla 7** y los procesos que se han descrito hasta el momento en la presente investigación. En primer lugar, se expondrán los paneles PV-I (ve **Figura 78**), PV-II (ver **Figura 79**), PV-III (ver **Figura 80**) y PV-IV (ver **Figura 81**).

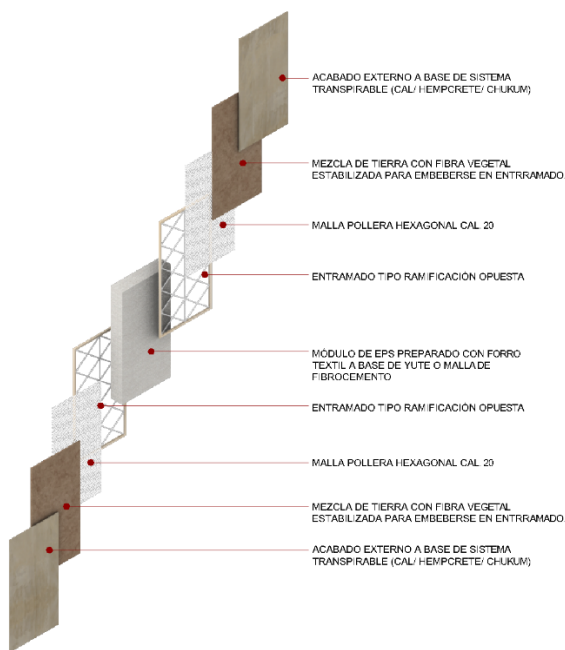


Figura 78
Composición PV-I



Nota: Elaboración propia. Se especifican las capas necesarias para la elaboración del panel.

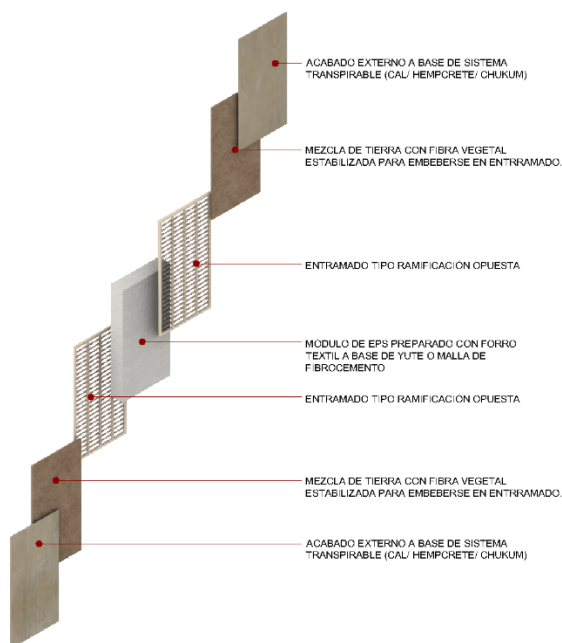
Figura 79
Composición PV-II



Nota: Elaboración propia. Se especifican las capas necesarias para la elaboración del panel.

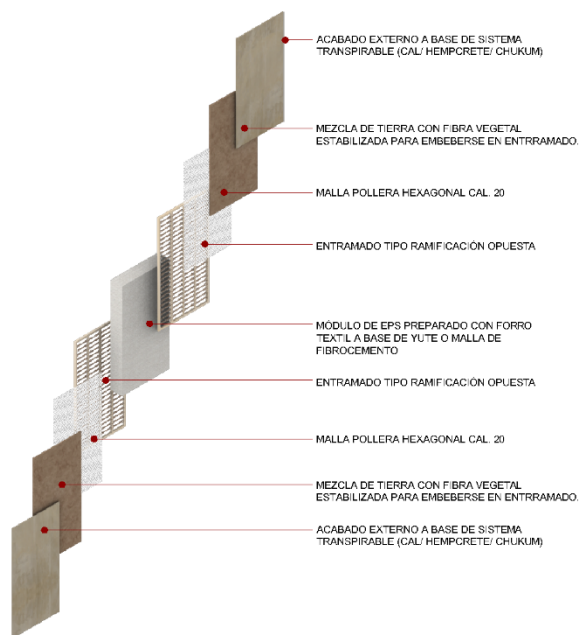


Figura 80
Composición PV-III



Nota: Elaboración propia. Se especifican las capas necesarias para la elaboración del panel.

Figura 81
Composición PV-IV



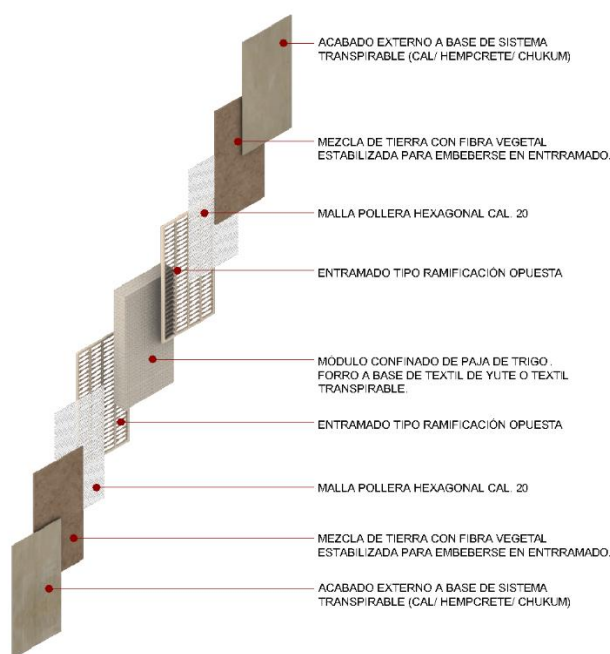
Nota: Elaboración propia. Se especifican las capas necesarias para la elaboración del panel.



El comprender las capas de composición de cada uno de los paneles permitió entender la composición que estos tendrán. Esto permite comprender la relación entre la materialidad elegida y la interacción entre ella para gestionar la lógica constructiva de acuerdo con el sistema que se propone. Este tipo de desglose funciona como un puente entre la concepción digital de los prototipos y su materialización constructiva.

A continuación, se muestran los gráficos axonométricos de PV-V (ver **Figura 82**), PV-VI (ver **Figura 83**), PV-VII (ver **Figura 84**) y PV-VIII (ver **Figura 85**).

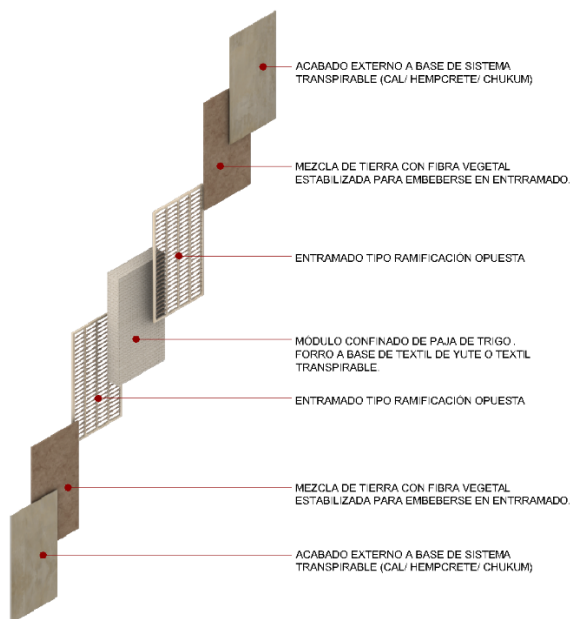
Figura 82
Composición PV-V



Nota: Elaboración propia. Se especifican las capas necesarias para la elaboración del panel.

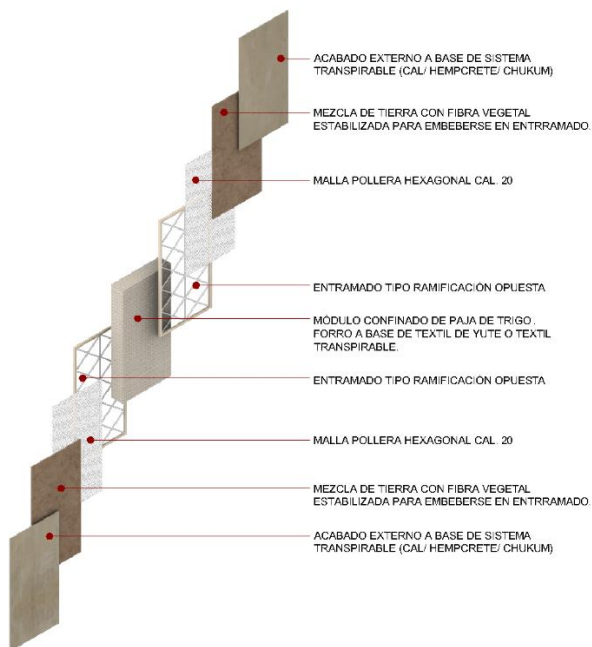


Figura 83
Composición PV-VI



Nota: Elaboración propia. Se especifican las capas necesarias para la elaboración del panel.

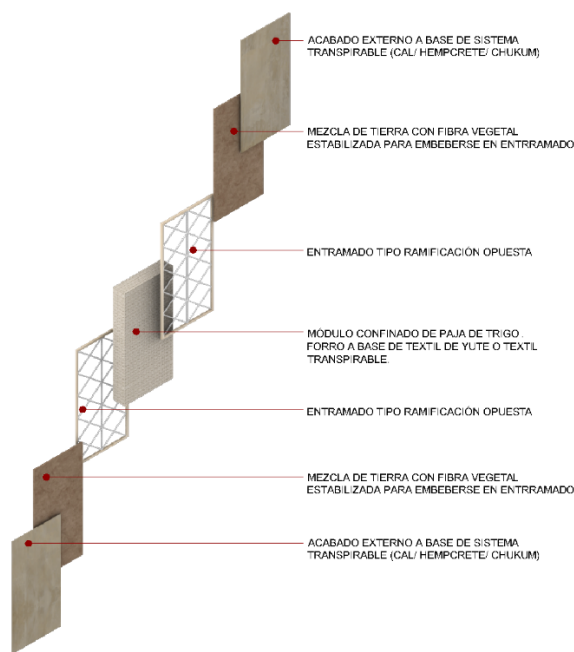
Figura 84
Composición PV-VII



Nota: Elaboración propia. Se especifican las capas necesarias para la elaboración del panel.



Figura 85
Composición PV-VIII



Nota: Elaboración propia. Se especifican las capas necesarias para la elaboración del panel.

Materialidad del sistema.

A partir del desglose por capas representado mediante la axonometría, fue posible identificar y analizar la función específica de cada uno de los materiales que componen el sistema de panel prefabricado. Esta lectura permitió comprender el panel no como un elemento monolítico, sino como un sistema compuesto, en el cual cada componente contribuye de manera diferenciada al desempeño estructural, térmico y constructivo.

En este sentido, la configuración del panel responde a una lógica tipo sándwich, donde los materiales se organizan en capas con funciones complementarias, descritas a continuación:

Núcleo del Sistema (EPS/ Paja de Trigo).

El núcleo del sistema se plantea como una capa central cuya función principal es la reducción de peso y la mejora del desempeño térmico del panel. En este sentido se plantea la aplicación de bovedilla de poliestireno expandido (EPS) como opción híbrida y paja de trigo cristalino (*triticum turgidum* subsp) confinada en forro de textil de yute.

En el caso del núcleo de EPS, se observa un comportamiento homogéneo, con alta capacidad de aislamiento térmico y baja absorción de humedad, lo que favorece la estabilidad del



sistema (FANOSA, 2020). Por otro lado, la paja de trigo se incorpora como una alternativa de origen natural, destacando por su bajo impacto ambiental y su capacidad de generar aislamiento térmico a partir del aire contenido en su estructura fibrosa (Gutiérrez & Arteaga, 2021).

Ambas soluciones permiten evaluar dos enfoques: uno de carácter híbrido y otro basado en materiales naturales, manteniendo en ambos casos la función de material ligero y aislante dentro del sistema.

Entramados (estacas de carrizo).

El entramado de carrizo constituye el esqueleto estructural interno del panel, encargado de distribuir esfuerzos y controlar la fisuración de la matriz de tierra. La razón de su aplicación es derivada de la disponibilidad en la zona, si bien no directamente en la región de Hermosillo, es posible localizarlo gracias a su alta demanda comercial en esta. La producción de carrizo en la región de Sonora se ubica en la zona sur del estado, principalmente en el valle Yaqui.

La configuración del entramado fue generada a partir de geometrías paramétricas (Voronoi y ramificación opuesta), como se ha descrito en este apartado, la aplicación de estos entramados permite generar una red de refuerzo que mejora la integridad del sistema, actuando como un elemento de confinamiento y soporte para la mezcla. Asimismo, su ligereza y flexibilidad facilitan su adaptación a diferentes configuraciones geométricas, manteniendo la continuidad estructural del panel.

Refuerzo de adherencia (Malla pollera hexagonal).

La malla hexagonal aplicada es de 1" - 2 x 50' hexagonal cal. 20, esta se incorpora como un refuerzo adicional superficial, cuya función principal es mejorar la adherencia entre capas y aumentar la resistencia del sistema frente a esfuerzos de tracción y desprendimiento (Zamora, 2024). Nota importa, se aplica como elemento complementario, no es un elemento base del sistema

Su presencia permite contener la mezcla de tierra durante su aplicación y secado, reduciendo la aparición de fisuras y contribuyendo a la estabilidad del recubrimiento, tal como fue expuesto en el estudio estructural, bajo el modelo matemático desarrollado en MATLAB en este apartado. Este elemento actúa entonces como una interfaz entre el entramado interno y las capas exteriores, reforzando el comportamiento integral del panel.



Tierra cruda + Fibra vegetal (Tierra SC + Paja de trigo).

La mezcla de tierra cruda con fibra vegetal constituye el cuerpo principal del panel, responsable de aportar masa, rigidez y capacidad de regulación térmica (Minke, 2005).

La incorporación de fibra vegetal cumple una doble función: por un lado, reduce la densidad del material, contribuyendo a la disminución del peso total del sistema; por otro, mejora su comportamiento mecánico al actuar como refuerzo disperso, limitando la propagación de fisuras (Laborel-Preneron, 2016).

Esta capa representa el componente fundamental del sistema, donde se materializa la premisa de uso de tierra cruda como base constructiva.

Aplanado transpirable (Aplicación de cal/ Chukum/ Hempcrete/ etc.).

El recubrimiento final, en este ejercicio no pudo ser aplicado, pero este siempre debe de considerarse para la conservación del panel, debe ser de un material transpirable, principalmente, a base de cal. La función principal de este acabado es proteger la superficie del panel frente a agentes externos, particularmente la humedad.

Además de su función protectora, el aplanado contribuye a mejorar la cohesión superficial del sistema y permite una mejor terminación estética. Su compatibilidad con la tierra cruda favorece la transpirabilidad del panel, evitando la acumulación de humedad interna y contribuyendo a su durabilidad.

Síntesis de la materialidad del sistema.

En síntesis, el sistema de panel desarrollado se configura como un elemento constructivo multicapa cuya eficacia no radica en un material aislado, sino en la interacción complementaria de todos sus componentes. El núcleo, ya sea de EPS o paja, contribuye a la reducción de peso y al mejoramiento térmico; el entramado de carrizo actúa como soporte estructural distribuyendo esfuerzos; la malla hexagonal refuerza la estabilidad superficial; la matriz de tierra cruda con fibra vegetal conforma el cuerpo resistente y regulador térmico; y el aplanado a base de cal protege el sistema frente a agentes externos, manteniendo su transpirabilidad.

Esta articulación material evidencia una coherencia entre diseño, técnica y desempeño, consolidando al panel como una solución constructiva que integra criterios estructurales,



ambientales y operativos dentro de un mismo sistema, de acuerdo con los principios de la bioconstrucción (Rubio Picazo, 2019).

Detalles constructivos.

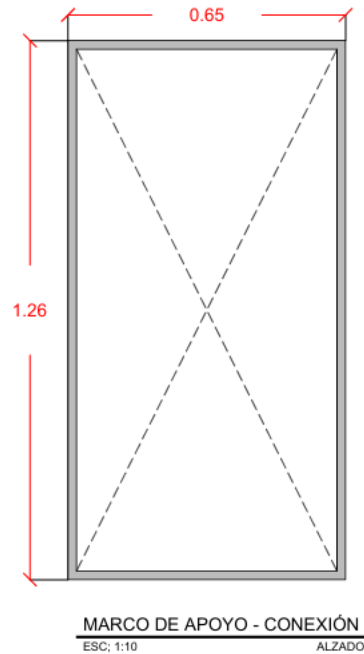
Como parte de la traducción del modelo digital al constructivo, se desarrolló un conjunto de detalles constructivos respecto a la propuesta; esto ha permitido definir con precisión la configuración física del panel, así como sus componentes y sistemas posibles de unión (este punto no se desarrolla en la investigación; sin embargo, se plantea la base para futuras líneas de estudio).

Estos detalles representan una herramienta de validación técnica previa a la fabricación de los prototipos, permitieron identificar posibles problemáticas constructivas, así como optimizar las modulaciones planteadas y asegurar una coherencia entre lo desarrollado de manera digital y el contexto constructivo real. Los detalles que se plantean en esta sección corresponden a los necesarios para la ejecución del prototipo (0.61 x 1.22 m), pero son escalables a la propuesta de tamaño real (1.22 x 2.44 m).

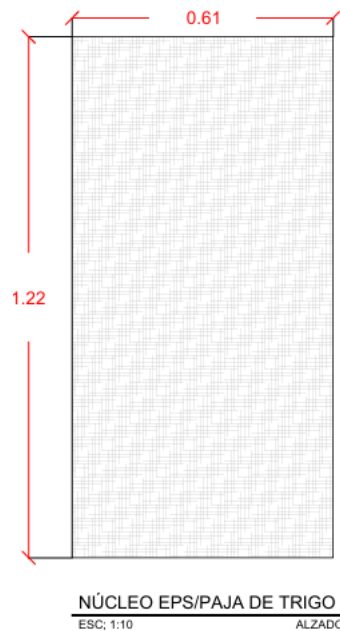
Dimensionamiento de elementos constructivos de módulos.

Uno de los pasos previos a la construcción de los prototipos es identificar los dimensionamientos de cada uno de sus elementos. A continuación, se presentan las dimensiones base guía para su construcción. Se define el marco guía (ver **Figura 86**) que contendrá el panel y funciona como unión entre módulos y estructura, de igual manera el dimensionamiento prototipal del núcleo empleado (ver **Figura 87**), también se define de manera detallada el dimensionamiento de ambos entramados (ver **Figura 88** para ramificación opuesta y **Figura 89** para voronoi simplificado), así como el área que debe ser rellena por la mezcla de tierra y fibra (ver **Figura 90**) y el acabado final (ver **Figura 91**), de igual manera, se definieron las dimensiones necesarias de la aplicación del refuerzo de malla pollera, según sea el caso (ver **Figura 92**).



Figura 86*Dimensionamiento de Marco guía de panel.*

Nota: Elaboración propia a partir del modelo obtenido del diseño paramétrico. Este marco representa el elemento guía que contendrá el panel. Las cotas internas son 0.61 x 1.22 m.

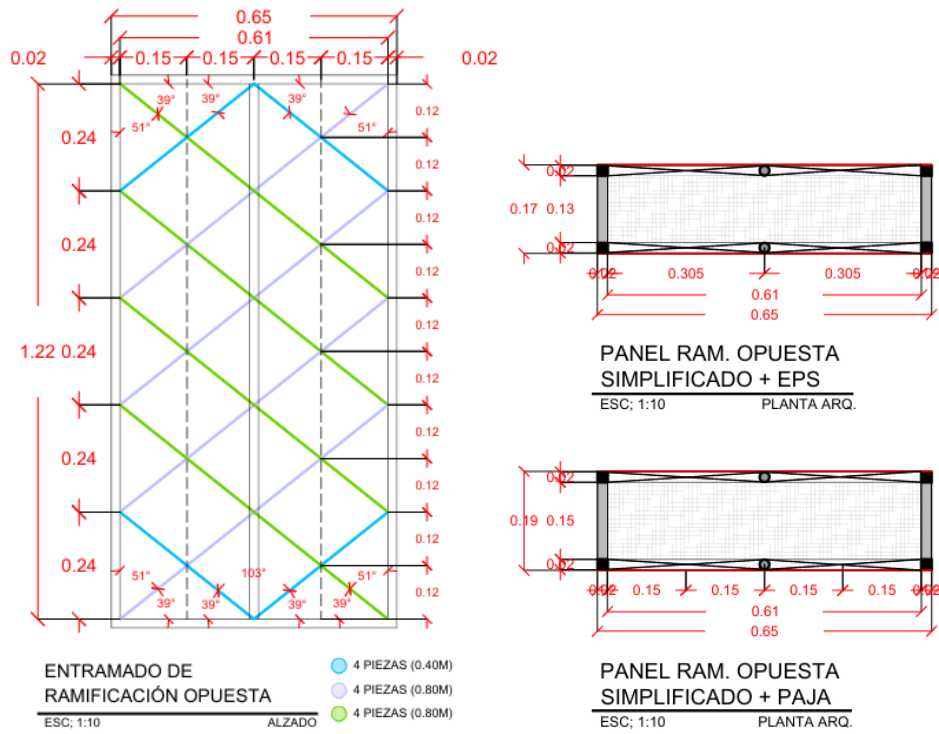
Figura 87*Dimensionamiento del núcleo.*

Nota: Elaboración propia a partir del modelo obtenido del diseño paramétrico. La variable que se deberá de ajustar es el ancho, en EPS en ancho es de 0.13 m, mientras que en el de paja es de 0.15 m. (ver detalles de planta de módulos de núcleo de paja).



Figura 88

Dimensionamiento y despiece del entramado de Ramificación Opuesta (Vista en alzado y planta).

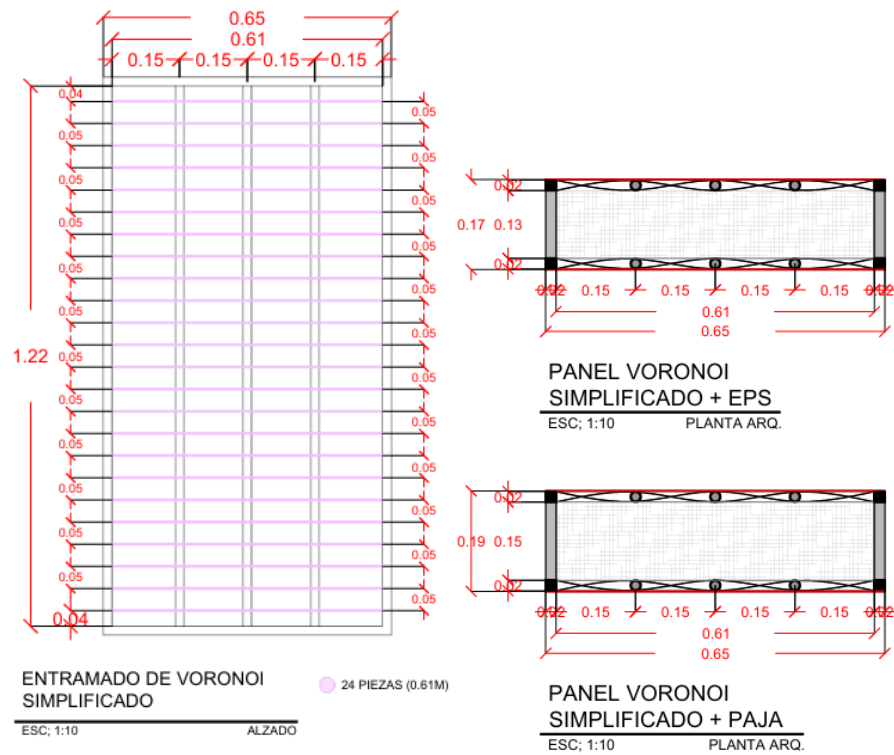


Nota: Elaboración propia a partir del modelo obtenido del diseño paramétrico. El dimensionamiento se considera la guía específica para el desarrollo del prototipo; el material fue cuantificado a partir de estas dimensiones.



Figura 89

Dimensionamiento y despiece del entramado de Voronoi Simplificado (Vista en alzado y planta).

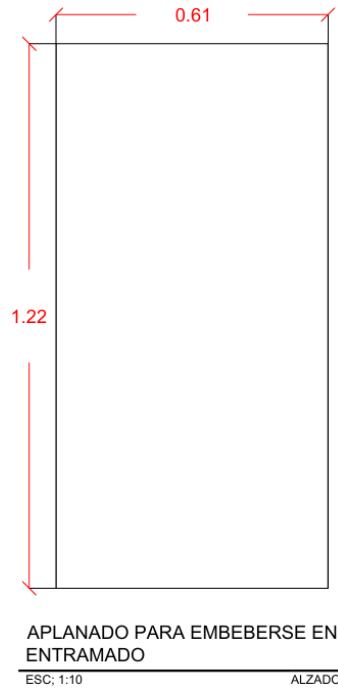


Nota: Elaboración propia a partir del modelo obtenido del diseño paramétrico. El dimensionamiento se considera la guía específica para el desarrollo del prototipo; el material fue cuantificado a partir de estas dimensiones.



Figura 90

Dimensionamiento de mezcla embebida en entramado.



Nota: Elaboración propia a partir del modelo obtenido del diseño paramétrico.

Figura 91

Dimensionamiento de área de aplicación del acabado transpirable.

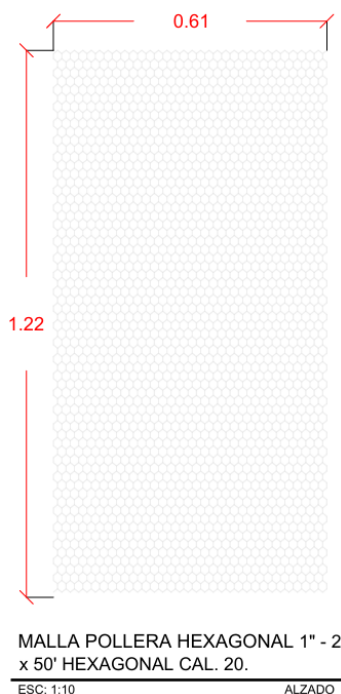


Nota: Elaboración propia a partir del modelo obtenido del diseño paramétrico. Sus dimensiones deben incluir el marco guía.



Figura 92

Dimensionamiento de aplicación de malla de refuerzo.



Nota: Elaboración propia a partir del modelo obtenido del diseño paramétrico. No se aplica en todos los módulos.

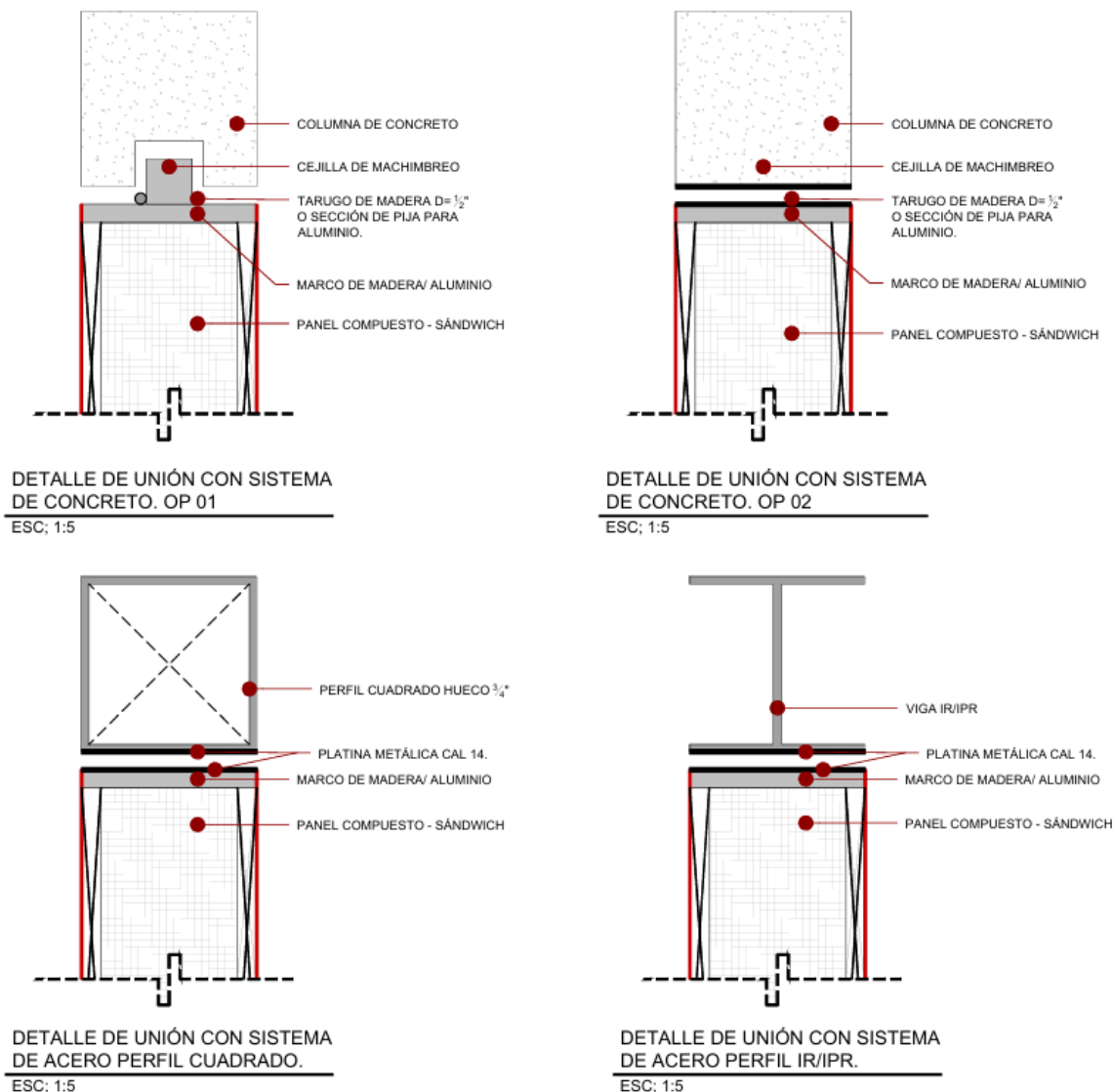
Al analizar los dimensionamientos de cada una de las capas, fue posible consolidar la transición del modelo paramétrico a un sistema viable de materializar. Se logró establecer una relación clara entre la lógica digital y su ejecución física a través de la elaboración de detalles constructivos claros que funcionaron como un instrumento clave para la elaboración de los prototipos.

Propuesta de Anclajes.

A través del análisis geométrico y material que produjo esta traducción tecnológica y con revisión de propuestas de innovación en sistemas mixtos de tierra como la de Zazu (2021) y también la colaboración de Astilludo y Vacacela (2015), fue posible desarrollar las bases de un sistema de anclaje (ver **Figura 93**) entre los módulos de paneles desarrollados y sistemas estructurales convencionales de acero o concreto que son parte del contexto de edificación en Hermosillo.



Figura 93
Detalles de posibles anclajes.



Nota: Elaboración propia a partir del modelo obtenido del diseño paramétrico. Basado en los prototipos diseñados por Zazu (2021) y también en la colaboración de Astilludo y Vacacela (2015).

Este ejercicio, si bien no fue posible consolidarlo durante la elaboración de esta investigación, se pudo identificar que, al colocar un marco de confinamiento al módulo compuesto, es posible integrarlo prácticamente a cualquier sistema constructivo empleado, lo cual otorga una ventaja de ligereza a la estructura base de cualquier edificación. Tal como se declara en el estudio del entramado, en su evaluación estructural (p. 125), este sistema carece de características individuales para ser autoportante o funcionar como un elemento estructural integral.



Registro fotográfico del proceso de construcción de prototipos

Uno de los principales desafíos que se enfrentaron al momento de la elaboración de los prototipos fue el trabajar con las estacas de carrizo; estas fueron adquiridas en estado blando, por lo que se tuvieron que someter a un sistema de secado y esterilización con sal de borax. Durante este proceso, las estacas, al estar blandas, sufrieron algunas deformaciones que comprometieron la elaboración del marco base para la elaboración del entramado. Como se aprecia en **Figura 94**, los marcos bases no presentan una horizontalidad perfecta.

Figura 94

Marcos base para construcción de entramados a base de estacas de carrizo.



Nota: Se tomaron estacas que presentaron condiciones de horizontalidad aceptables. A la izquierda marco base para ramificación opuesta, a la derecha marco base para voronoi simplificado. Fotografía: Abraham Bernal, septiembre 2025.

A partir de la elaboración de los marcos base, se comenzó a trabajar con los entramados desarrollados en esta investigación; se presentó el mismo desafío de la horizontalidad. Al no tener una horizontalidad perfecta en el material, la unión de nodos tuvo que adaptarse, en este sentido, se optó por amarres manuales de henequén de 1/4”, el utilizar henequén permitió tener amarres sólidos evitando el desplazamiento de los componentes del entramado (ver **Figura 95**).

Figura 95

Unión de nodos con cuerda de henequén.



Nota: Unión en nodos laterales y centrales con cuerda. Fotografía: Abraham Bernal, septiembre 2025.



Uno de los retos del desarrollo de los prototipos fue la adherencia de la mezcla de tierra con la bovedilla de EPS, para lograr una mejor adherencia, se creó un puente entre las caras de la bovedilla, a través de pequeñas perforaciones en ella de no más de 2 cms de diámetro, de igual manera, se colocó un textil a base de yute entre el entramado y el núcleo, esto para permitir una mayor adherencia entre la mezcla de tierra y el núcleo (ver **Figura 96**).

Figura 96

Entramados colocados en núcleos de EPS con textil como unión.



Nota: Fotografía: Abraham Bernal, septiembre 2025.

En el caso del núcleo de paja, se elaboró una funda de yute, la cual fue rellena con paja de trigo, así se evitó una compacto permitiendo que en el confinamiento se almacenen espacios vacíos con aire (ver **Figura 97**), aportando al desempeño térmico del sistema, esto se evaluó en la Fase 05 (p. 179) de la presente investigación.



Figura 97*Elaboración de núcleo de paja.*

Nota: El relleno de la funda de yute fue manual, no se aplicó ningún tipo de compactación. Fotografía: Abraham Bernal, octubre 2025.

Con los módulos ya elaborados, se procedió a preparar la mezcla y comenzar a aplicarse en los prototipos. Uno de los puntos a resaltar es que, a pesar de que las mezclas fueron elaboradas a partir de la dosificación planteada al comienzo de este apartado, al momento de aplicarse en los módulos con malla pollera, esta formó vacíos que desestabilizaban el sistema, por lo que se tuvo que aplicar con una mayor fuerza. Para su estabilización, y para evitar vacíos en el panel, se agregó una medida de agua más a la mezcla, después fue resguardada durante 3 días, para permitir que las arcillas se activaran y la mezcla se suavizara, incluyendo la fibra, esto permitió que, al aplicar la tierra, esta se distribuyera de manera más uniforme en el panel (ver **Figura 98**).



Figura 98*Aplicación de mezcla a módulo.*

Nota: Mezcla suavizada aplicada al módulo, al humedecerse la fibra, esta se integró mejor entre las celdas de la malla. Fotografía: Abraham Bernal, octubre 2025.

Importancia de una correcta traducción.

En conclusión, la traducción del modelo digital a un sistema constructivo representa una etapa fundamental dentro del desarrollo de propuestas basadas en diseño paramétrico, particularmente en proyectos que incorporan materiales no convencionales. Este procedimiento permitió transformar una lógica geométrica generada de manera paramétrica en una solución material viable, evidenciando que la innovación formal solo adquiere valor cuando puede ser ejecutada bajo condiciones reales de construcción (Fernández M. , 2020).

La importancia de este proceso radica en su capacidad para articular el diseño con la técnica, obligando a resolver aspectos clave como la modulación, la simplificación geométrica, la definición de uniones y la compatibilidad entre materiales (Kolarevic, 2001).

Dentro de la investigación, este procedimiento adquiere una relevancia particular, ya que funciona como un punto de validación intermedio entre la ideación y la experimentación. Gracias a este proceso, fue posible reducir la incertidumbre antes de la fabricación de los prototipos, optimizar el uso de materiales y asegurar la coherencia del sistema propuesto. Asimismo, permitió evidenciar las limitaciones y oportunidades del diseño paramétrico cuando se traslada a contextos de producción real, fortaleciendo el carácter aplicado del estudio.



En este sentido, la traducción del modelo digital al constructivo no solo constituye un paso técnico, sino un componente metodológico clave que garantiza la viabilidad, replicabilidad y pertinencia de la propuesta, consolidando el vínculo entre exploración digital, materialidad y desempeño constructivo.



Fase 04: Prototipado físico inicial (Prototipado Rápido).

Pruebas preliminares (Granulometría y Límites de Atterberg)

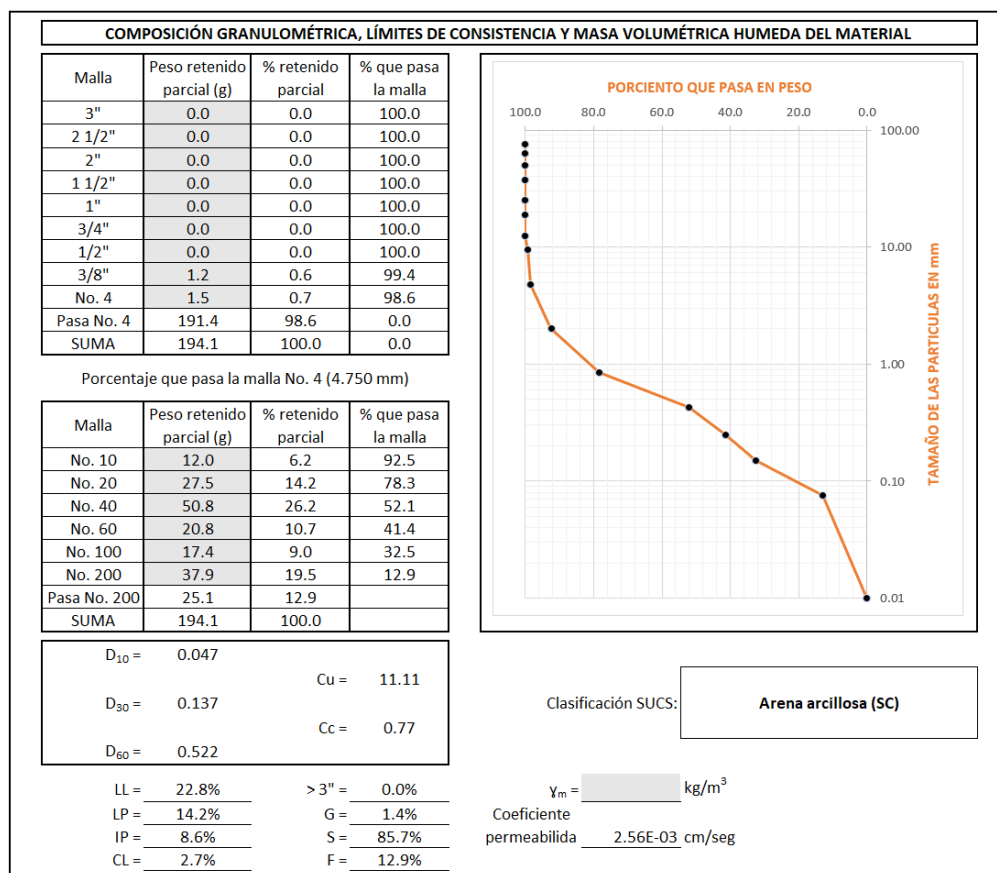
Pruebas granulométricas.

Como se menciona al comienzo de la Fase 04, uno de los primeros pasos del desarrollo de la propuesta es la generación del análisis granulométrico de las muestras de tierras obtenidas desde Hermosillo, Sonora. La obtención de estos parámetros permitió establecer la clasificación del suelo de acuerdo con su distribución granulométrica y comportamiento plástico, lo cual constituye una base fundamental para la selección de técnicas constructivas en tierra cruda y la posible incorporación de estabilizantes. Esta información fue clave para orientar el diseño y la ejecución de los prototipos desarrollados en el marco de la presente investigación.

Prueba granulométrica a M-00

Figura 99.

Composición granulométrica, límites de consistencia y masa volumétrica, humedad del material.



Nota: Elaboración por el Ing. Miguel Cervantes a través de la hoja de cálculo de SUA Ingeniería. Este gráfico permite determinar la composición de arenas, gravas y finos de la muestra.



La muestra analizada fue recolectada en la zona norte de la ciudad de Hermosillo, Sonora. Los resultados indican que el 98,6% del material pasa por la malla No. 4 (4.75 mm), lo que refleja una matriz arenosa con ausencia de grava y partículas gruesas.

La curva granulométrica obtenida presenta una pendiente continua y bien definida, lo cual sugiere una distribución de tamaños moderadamente uniforme. Los parámetros característicos de la curva, determinados a partir de los diámetros efectivos, son: $D_{10} = 0.047$ mm, $D_{30} = 0.137$ mm y $D_{60} = 0.522$ mm. Con estos valores se calcularon el coeficiente de uniformidad ($C_u = 11.11$) y el coeficiente de curvatura ($C_c = 0.77$). El valor de C_u indica que se trata de un suelo bien graduado ($C_u > 6$ para suelos arenosos), mientras que el valor de C_c se encuentra dentro del rango aceptable ($0.5 < C_c < 3$), lo que evidencia una distribución favorable de partículas finas, medias y gruesas (ASTM International, 2017).

Adicionalmente, se llevaron a cabo ensayos de límites de consistencia (límites de Atterberg), conforme al Manual M-MMP-1-07-07 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2007). El suelo presenta un límite líquido (LL) de 22.8%, un límite plástico (LP) de 14.2% y un índice plástico (IP) de 8.6%, lo que corresponde a un material con plasticidad baja. Esta característica es deseable en la construcción con tierra cruda, ya que favorece la trabajabilidad sin generar retracciones excesivas durante el secado. El contenido de limo (2.7%) y arcilla plástica (según el IP) confirma la presencia de finos que contribuyen a la cohesión del material, sin comprometer su estabilidad dimensional.

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM International, 2017), el material se clasifica como arena arcillosa (SC), lo que implica una fracción predominante de arena con un contenido significativo de finos plásticos. Esta clasificación es técnicamente favorable para su empleo en técnicas de construcción con tierra cruda, tales como bloques comprimidos, adobes estabilizados o paneles compactados, particularmente si se combina con estabilizantes adecuados (cal, cemento, fibras naturales, entre otros).

Finalmente, el suelo presenta un coeficiente de permeabilidad de 2.56×10^{-3} cm/s, valor que sugiere una permeabilidad baja a moderada. Esta condición favorece el comportamiento higrotérmico del material y contribuye a su durabilidad, siempre que se apliquen estrategias complementarias de protección superficial o estabilización.



En conjunto, las características físicas, granulométricas y de plasticidad del suelo analizado lo posicionan como un material viable para su aplicación en sistemas constructivos sostenibles a base de tierra cruda, adaptables a condiciones climáticas extremas como las presentes en la región de Hermosillo, Sonora.

Para corroborar la calidad y el tipo de suelos que pueden ser encontrados en la región de Hermosillo, Sonora. Estas muestras analizadas fueron tomadas de un banco de tierra localizado al poniente de la ciudad, el cual funciona como fuente de materia prima para la elaboración de ladrillos recocidos y adobes en la región. A estas, se les fueron realizadas pruebas granulométricas y límites de Atterberg, siguiendo lo indicado por el manual M-MMP-1-07-07 (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2007). La finalidad de repetir estas pruebas es obtener más información para la elección de la base material del panel que se está proponiendo.

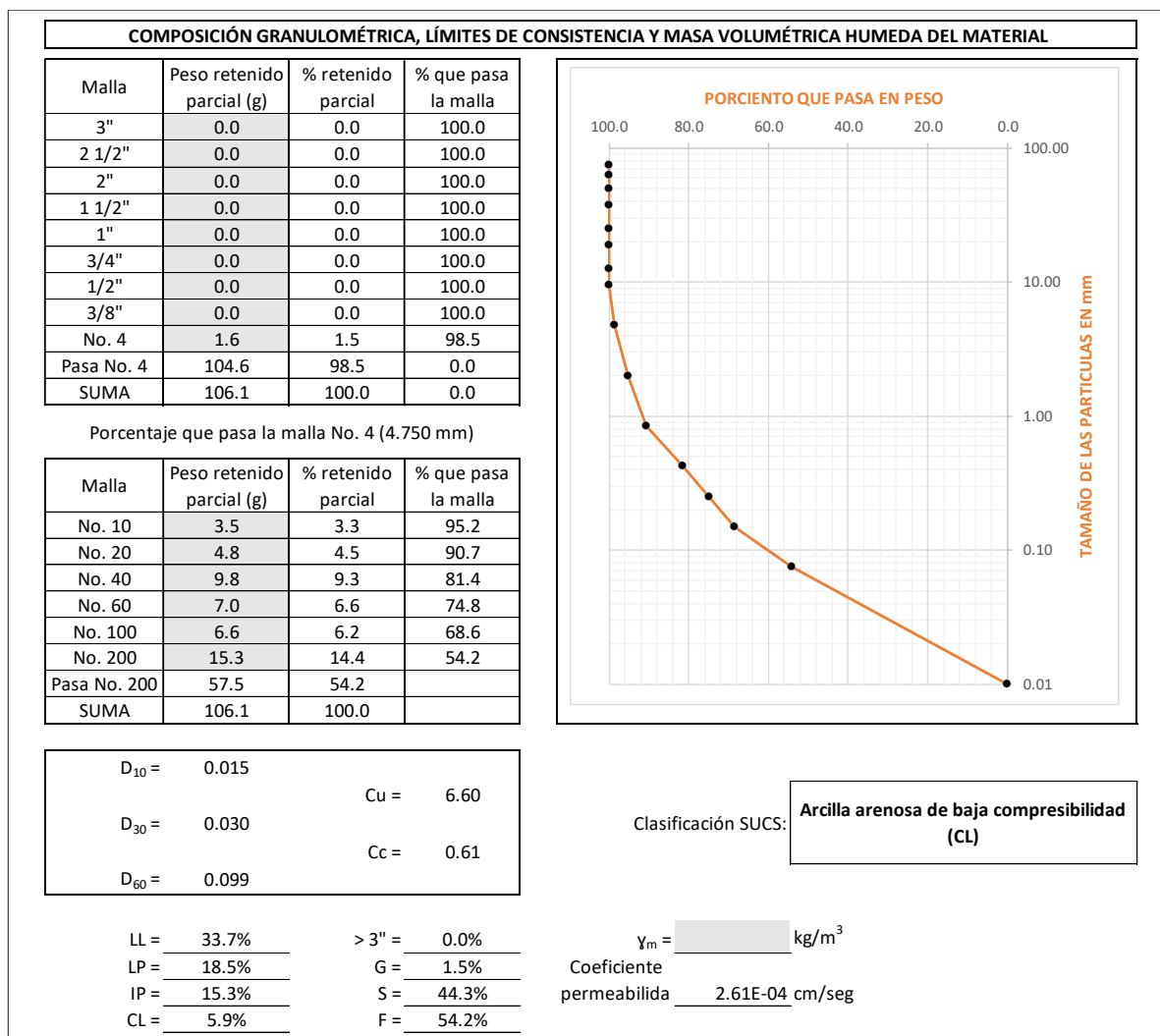
A continuación, se desarrolla el análisis de las pruebas realizadas; estas se realizaron a dos muestras, que para fines de esta investigación se determinarán como M-01 y M-02, mientras que la prueba realizada en primera instancia será determinada como M-00.



Prueba granulométrica a M-01

Figura 100.

Composición granulométrica, límites de consistencia y masa volumétrica, humedad del material. Muestra M-01



Nota: Elaboración por el Ing. Miguel Cervantes a través de la hoja de cálculo de SUA Ingeniería. Este gráfico permite determinar la composición de arenas, gravas y finos de la muestra.

Al analizar esta muestra, es fácil identificar que la composición de ésta difiere de manera significativa en comparación con la M-00, principalmente por el porcentaje de material que pasa la malla no. 200, indicando un valor del 54.2%, en comparación del apenas 12.9% de la M-00, confirmando que más de la mitad de la composición del suelo contiene finos (arcillas y limos).

Los parámetros granulométricos que se obtuvieron indican un Cu = 6.60 y un Cc = 0.61. Estos valores sugieren un suelo con una gradación no uniforme, ya que, aunque Cu > 4 indica una



distribución de tamaños, el valor de $C_c < 1$ implica una curva granulométrica que presenta tramos con baja diversidad de tamaños de partículas, esto influye directamente en el comportamiento mecánico y en la permeabilidad del material, ya que la ausencia de ciertos tamaños de partículas pueden crear rutas `referenciales para el flujo de agua, o, por el contrario, generar una estructura menos densa que, en conjunto con el contenido elevado de finos, puede resultar en una baja permeabilidad en general. (ASTM International, 2017).

Con base a los límites de consistencia obtenidos: $LL = 33.7\%$, $LP = 18.5\%$ e $IP = 15.3\%$, se define que el suelo presenta una plasticidad media, compatible con la presencia de arcillas inorgánicas (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2007). Bajo estos estándares, y de acuerdo con la clasificación SUCS (ASTM International, 2017), el material se clasifica como una arcilla arenosa de baja compresibilidad (CL), teniendo una distribución en su composición del 1.5% de gravas, 44.3% de arenas y un 54.2% de finos.

Finalmente, el suelo presenta un coeficiente de permeabilidad de 2.61×10^{-4} cm/s, valor que sugiere una permeabilidad baja. Esta condición favorece la retención de humedad, pero al mismo tiempo, limita su drenaje. Este punto es clave para identificar su aplicación en sistemas estructurales y la durabilidad del panel frente a ciclos húmedo – seco.

De acuerdo con Houben y Guillaud (1994), frente a este tipo de características propias de la tierra es importante integrar agentes estabilizantes para obtener un mayor aprovechamiento del recurso. Algunos de los estabilizantes pueden ser:

- Fibras vegetales: para la reducción de fisuras por retracción y mejorar la resistencia a la tracción.
- Arenas gruesas: si bien posee un alto porcentaje de arenas, el agregar arenas limpias permitirá corregir la curva granulométrica y así mejorar las características mecánicas en general.
- Estabilizantes químicos: principalmente el uso de cal, debido a las características de este elemento, permitirá elevar los niveles de resistencia a largo plazo, especialmente ante la exposición a humedad.

En resumen, la muestra M-01 muestra características importantes y aprovechables para la elaboración de la propuesta; sin embargo, es importante hacer ajustes granulométricos, así como

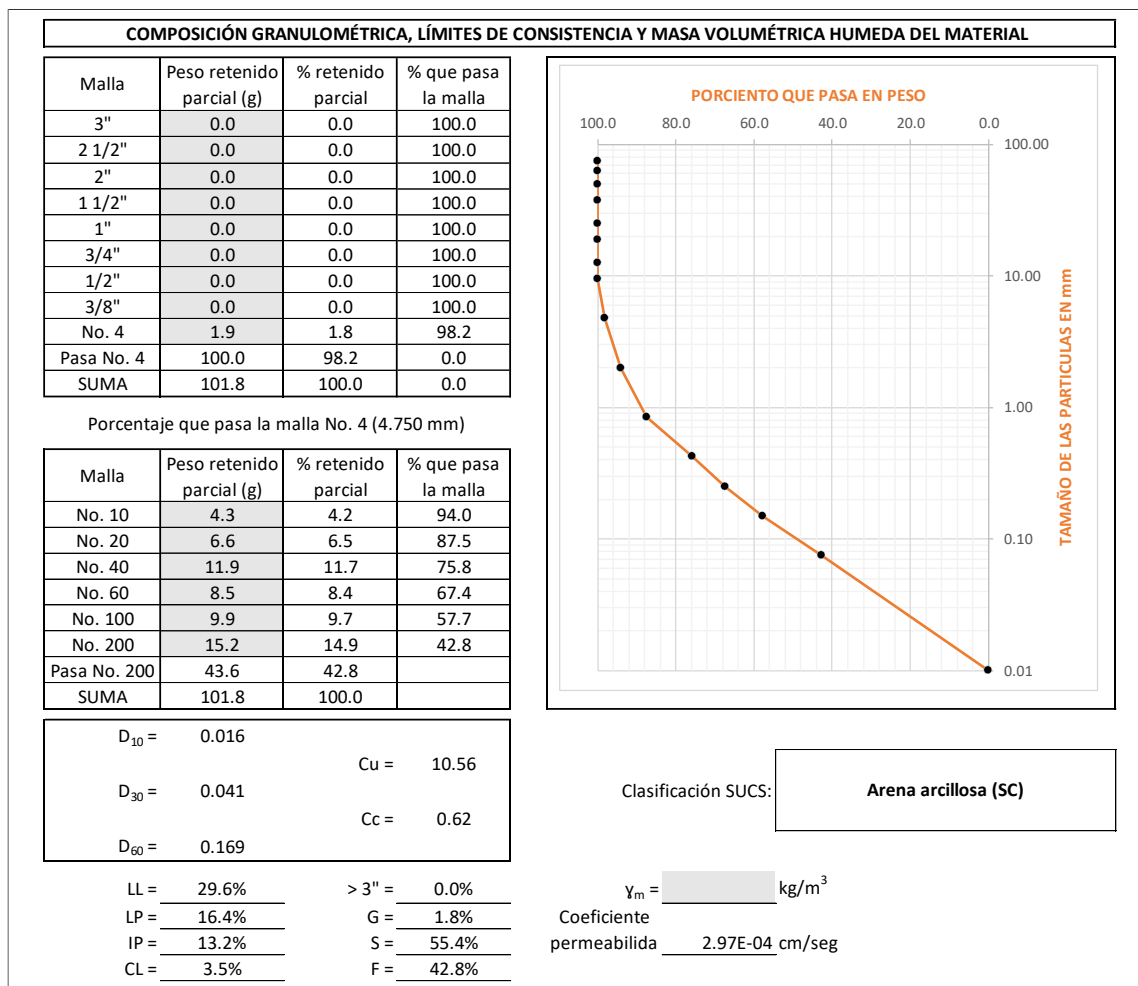


la aplicación de agentes estabilizantes, con el fin de optimizar su desempeño tanto mecánico como constructivo.

Prueba granulométrica a M-02

Figura 101.

Composición granulométrica, límites de consistencia y masa volumétrica, humedad del material. Muestra M-02



Nota: Elaboración por el Ing. Miguel Cervantes a través de la hoja de cálculo de SUA Ingeniería. Este gráfico permite determinar la composición de arenas, gravas y finos de la muestra.

Las pruebas realizadas a la muestra M-02 indican valores que difieren de las muestras analizadas anteriormente, si bien la cantidad que para la malla no. 4 es del 98.2%, lo que indica que la cantidad de grava es prácticamente nula; esta muestra una cantidad más elevada de arenas en su composición. La cantidad de materia que pasa la malla no. 200 es del 42.8%, indicando una cantidad menor de finos respecto a M-01, pero superior a M-00. Esta proporción sugiere un suelo



transicional, donde las partículas finas aportan cohesión, pero se conserva una estructura granular dominante.

En este caso, los parámetros granulométricos que se obtuvieron indican un $C_u = 10.56$ y un $C_c = 0.62$. El elevado valor de C_u siendo >6 indica un suelo bien graduado, con una distribución relativamente amplificada de tamaños de partículas. No obstante, al contar con un $C_c < 1$ implica que ésta no es equilibrada, es decir, que cuenta con algunos vacíos de gradación (ASTM International, 2017).

En cuanto a los límites de consistencia obtenidos, los valores son: $LL = 29.6\%$, $LP = 16.4\%$ e $IP = 13.2\%$, lo cual indica una plasticidad media – baja, la cual es característica propia de suelos con presencia de partículas finas cohesivas, pero en proporciones moderadas (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2007). De acuerdo con estos valores obtenidos y bajo los estándares de clasificación SUCS (ASTM International, 2017), el material se clasifica como una Arena Arcillosa (SC), tal como M-00. Esta clasificación representa un suelo granular con finos plásticos, donde la cohesión está asociada a una menor fracción de arcilla dentro de la composición.

Mientras tanto, el coeficiente de permeabilidad es de 2.97×10^{-4} cm/s, un poco más elevado que M-01 y M-00. Este valor indica una permeabilidad baja-media, la cual se considera aceptable para usos constructivos, siempre y cuando se sigan las recomendaciones dentro del uso de estabilizantes como los mencionados en la M-01.

En resumen, la muestra M-02 muestra características importantes y aprovechables para la elaboración de la propuesta, al tener una estructura granular dominante como la arena, ya que mejora el comportamiento mecánico a compresión y contiene una plasticidad moderada sin poner en riesgo de retracción.

Resumen de pruebas granulométricas.

Con base en los resultados obtenidos a partir de las pruebas granulométricas a las diferentes muestras se puede concluir que cada una de estas tiene un valor estratégico que la diferencia para su aplicación en el desarrollo de la propuesta. Donde:

- **M-00:** Cuenta con características estructurales granulares más estables y resistentes gracias a su composición.

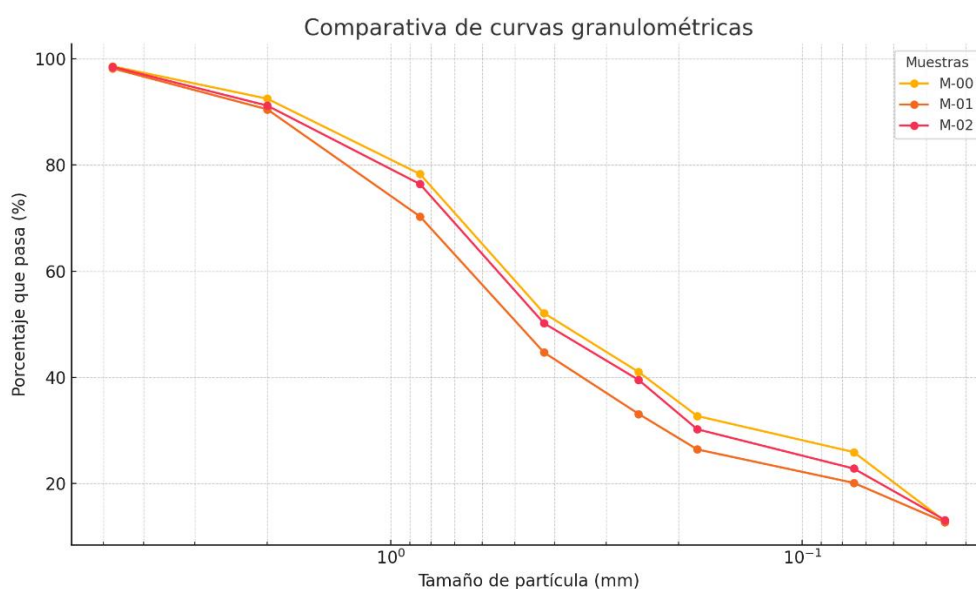


- **M-01:** Tiene un alto nivel de plasticidad y capacidad de retención de humedad; estas características son ideales como agente aislante y acabados finales.
- **M-02:** Al ser un material de transición, permite vincular los diferentes componentes del panel, mejorando el comportamiento mecánico global del panel.

A continuación, se muestra un gráfico comparativo (ver **Figura 102**) entre las curvas granulométricas de las muestras analizadas, de esta manera, es posible identificar con claridad las diferentes distribuciones de tamaños de partículas entre cada una de ellas.

Figura 102.

Comparativa de curvas granulométricas de M-00, M-01 y M-02



Nota: Elaboración a partir de las curvas obtenidas en el documento compartido por el Ing. Miguel Vergara. Este gráfico fue realizado con el apoyo de ChatGPT, bajo el prompt: “Realiza una tabla comparativa de las curvas granulométricas, donde se identifique cada una de ellas de manera individual, a partir de los gráficos cargados”

Se entiende entonces que M-00 (Arena arcillosa - SC): Presenta una curva más alta en porcentaje de finos, lo cual sugiere mayor contenido de partículas pequeñas (arcillas y limos). Esta condición puede conferirle mejor cohesión y retención de agua, lo cual es favorable para la elaboración de paneles si se estabiliza adecuadamente con fibras o aglutinantes que compensen la plasticidad.

M-01: Tiene una distribución más inclinada, lo que indica una granulometría más gruesa que M-00. Su menor contenido de finos puede ofrecer mayor resistencia al agrietamiento por



retracción, pero también menor cohesión, por lo que podría requerir estabilización con algún tipo de arcilla plástica o adición de cal.

M-02: Se comporta de forma intermedia entre M-00 y M-01. Tiene una curva con paso gradual y contenido medio de finos. Esto sugiere un equilibrio relativo entre cohesión y permeabilidad. Puede ser una buena candidata para ser usada directamente con estabilizantes naturales como fibras vegetales o emulsiones ligeras.

Si se toman estos resultados y se hace la comparativa con lo que indican los diferentes autores como Houben y Guillaud (1994), Gernot (2005) y Gatti (2012) es posible identificar características o criterios específicos para cada una de las muestras analizadas. Para entender este proceso de mejor manera, se realizó este análisis apoyado de las IA: *Notebooklm*, *ChatGPT* y *Consensus*, obteniendo la siguiente tabla (ver **Tabla 16**):

Tabla 16.

Comparativa cualitativa de cada una de las muestras analizadas en el proceso de estudios de laboratorio.

Criterio	M-00	M-01	M-02
Resistencia estructural potencial	★★★★☆	★★☆☆☆	★★★★☆
Capacidad aislante (térmica/acústica)	★★☆☆☆	★★★★☆	★★★★☆
Compatibilidad con aditivos naturales	★★★★☆	★★★★★	★★★★☆
Estabilidad volumétrica (retracción/expansión)	★★★★☆	★★☆☆☆	★★★★☆
Facilidad de compactación sin aglutinante	★★★★★	★★☆☆☆	★★★★☆

Nota: Elaboración propia, apoyada en cada una de las muestras analizadas. La ejecución de la tabla fue apoyada por el uso de IA: *Notebooklm*, *ChatGPT* y *Consensus* en correlación a lo estipulado por los autores Houben y Guillaud (1994), Gernot (2005) y Gatti (2012).

De acuerdo con lo obtenido, se puede identificar que la muestra M-00, clasificada como una arena arcillosa (SC), presentó una granulometría bien graduada con proporciones equilibradas de arena y finos. Este comportamiento indica una alta capacidad de compactación y una resistencia estructural considerable, lo que la posiciona como una opción favorable para paneles estructurales o de cerramiento. Sin embargo, su capacidad de aislamiento térmico es limitada, por lo que se sugiere el uso de fibras vegetales y estabilizantes como cal para mejorar su desempeño higratérmico (Houben & Guillaud, 1994).



Por otro lado, la muestra M-01, correspondiente a un suelo fino con alta plasticidad, muestra una granulometría dominada por finos, lo que se traduce en el material una excelente capacidad aislante, pero baja resistencia estructural y alta susceptibilidad a agrietamientos por retracción. En este caso, se recomienda una estabilización intensiva con cal hidráulica y fibras vegetales largas (Houben & Guillaud, 1994), así como la posible corrección de su granulometría mediante la incorporación de arenas gruesas. Este tipo de suelo es idóneo como material de relleno o núcleo en paneles.

Por último, la muestra M-02 presentó un comportamiento intermedio, con una distribución granulométrica más equilibrada entre arenas y finos. Esta condición sugiere una versatilidad favorable, ya que puede alcanzar niveles aceptables tanto de resistencia estructural como de aislamiento térmico con una estabilización moderada. Es compatible con el uso de fibras vegetales cortas y aditivos naturales. (Houben & Guillaud, 1994).

En síntesis, cada suelo posee propiedades específicas que pueden ser aprovechadas de forma estratégica en función de los requerimientos del panel. La selección del tipo de estabilizante y del sistema de ensamblaje dependerá de si se prioriza la capacidad portante, el aislamiento o el equilibrio entre ambos. Esta diferenciación resulta esencial para el desarrollo eficiente y sustentable de sistemas constructivos con tierra en climas cálidos-secos

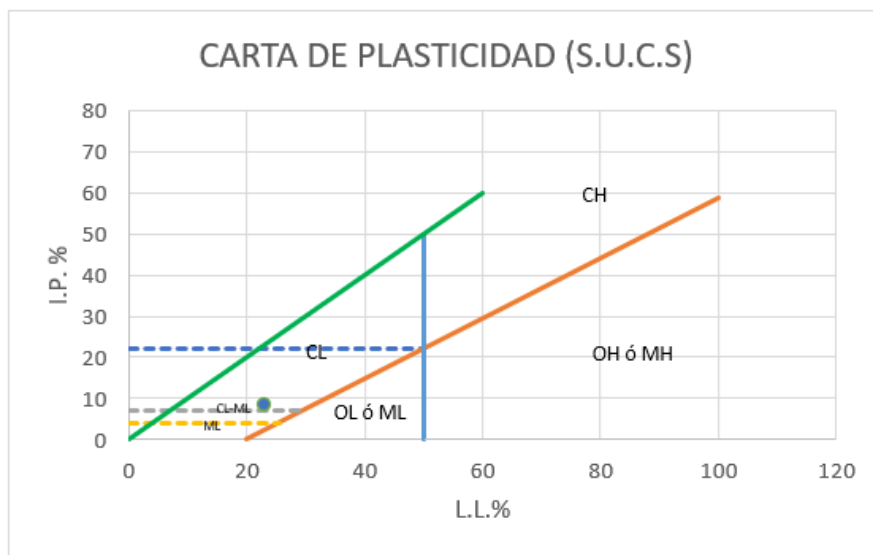
Cartas de plasticidad (Límites de Atterberg).

Carta de plasticidad M-00.

En el caso de M-00, se obtuvo un límite líquido (LL) de 22.8% y un índice plástico (IP) de 8.6%, valores que fueron representados gráficamente mediante un punto dentro del diagrama. La ubicación del punto correspondiente se encuentra por debajo de la línea A, la cual separa los suelos de comportamiento predominantemente arcilloso (por encima) de aquellos con comportamiento limoide (por debajo). Asimismo, se sitúa por encima del límite inferior de plasticidad ($IP \approx 4\%$), lo que confirma que el material posee una plasticidad baja, esto se traduce como menores niveles de retracción debido a la poca pérdida de volumen al momento de secar, mismo que es más uniforme y estable evitando deformaciones y tensiones internas en un sistema mixto tipo panel, por último, la baja plasticidad refiere a un comportamiento con mayor compatibilidad con fibras vegetales (ver **Figura 103**).



Figura 103
Carta de Plasticidad M-00



Nota: Elaboración por el Ing. Miguel Cervantes a través de la hoja de cálculo de SUA Ingeniería. Este gráfico permite identificar la clasificación de la muestra a partir de las pruebas de plasticidad realizadas.

Esta clasificación tiene implicaciones relevantes para su aplicación en la construcción con tierra cruda. Por un lado, la baja plasticidad indica una expansión limitada ante cambios de humedad, lo cual favorece la estabilidad dimensional del material. Por otro lado, su baja cohesión natural puede requerir la incorporación de estabilizantes o refuerzos, tales como cal, cemento o fibras naturales, especialmente si se busca mejorar su resistencia estructural o su durabilidad a largo plazo (Minke, 2005).

Cabe señalar que, en combinación con la fracción arenosa dominante (según el análisis granulométrico y la clasificación SUCS como arena arcillosa - SC) (ASTM International, 2017), este tipo de suelo resulta adecuado para la elaboración de elementos constructivos prefabricados, como paneles compactados o bloques estabilizados, particularmente en zonas de clima cálido-seco como Hermosillo, donde las condiciones ambientales requieren materiales con buena inercia térmica y mínima retracción.

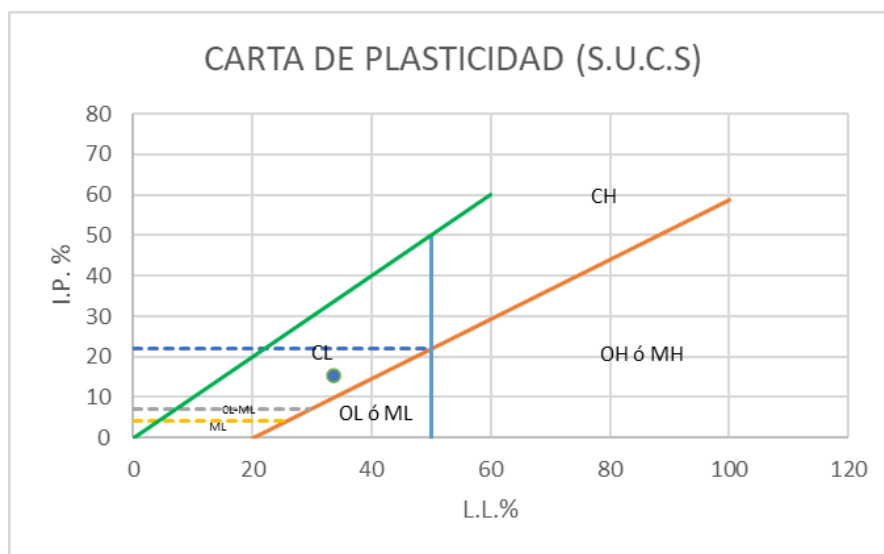
Carta de plasticidad M-01.

Las pruebas de M-01 muestran que la ubicación del punto se sitúa en la región que corresponde aun Limo de baja plasticidad (ML) o un Limo orgánico de baja plasticidad (OL), siendo el límite líquido (LL) de 33.73% y un índice de plasticidad (IP) de 15.3%, este valor indica una estabilidad



para el sistema que se busca desarrollar, pues, existen niveles de cohesión interna estables, con lo que se permite una compatibilidad con tejido vegetal importante y así evita niveles altos de fragilidad (ver **Figura 104**).

Figura 104.
Carta de Plasticidad M-01.



Nota: Elaboración por el Ing. Miguel Cervantes a través de la hoja de cálculo de SUA Ingeniería. Este gráfico permite identificar la clasificación de la muestra a partir de las pruebas de plasticidad realizadas.

No obstante, en conjunto con el análisis granulométrico es posible identificar características, que combinadas, ofrecen una clasificación más precisa, es decir, tal como se indicó en el análisis granulométrico de M-01 (ver **Figura 100**), es posible clasificar la muestra como una arcilla arenosa de baja compresibilidad (CL), tal como se desarrolla en la clasificación SUCS (ASTM International, 2017, p. 4). Esta clasificación surge al identificar que el 54.2% del material de la muestra pasa de la malla no. 200, así como la presencia de un 44.3% de arena. La presencia de arcilla (con un $IP > 7$) y un $LL. < 50\%$ justifica la designación de "arcilla de baja compresibilidad", mientras que el componente arenoso justifica la adición del término "arenosa".

La clasificación CL proporciona características que benefician el desarrollo de la propuesta descrita en el presente documento. La fracción arcillosa del suelo (el componente que le da su plasticidad y cohesión, representado por un $IP = 15.3\%$) actúa como el aglutinante natural del panel. Por su parte, la presencia de arena (44.3%) en la composición del suelo es fundamental; esta proporciona mayor cuerpo "estructural" al panel. La clasificación de "baja compresibilidad" (LL



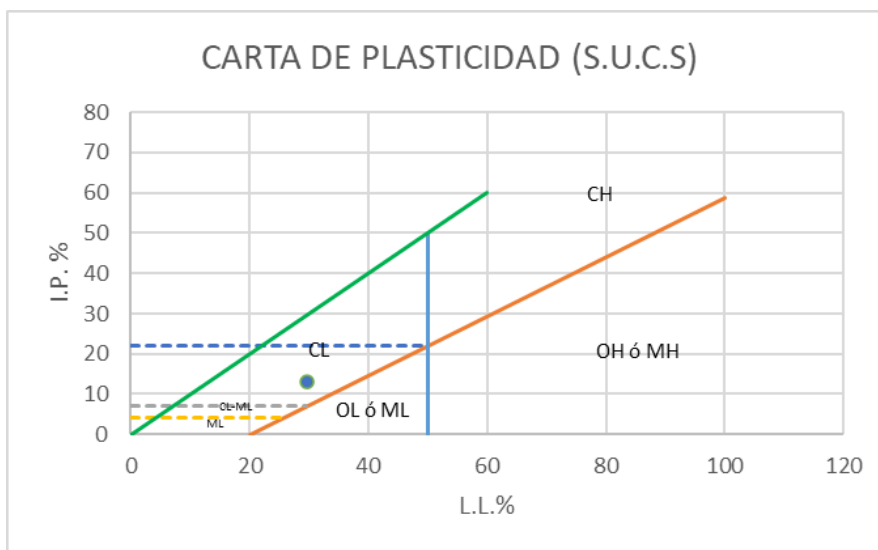
< 50%) y el valor moderado del IP = 15.3% son indicadores de un suelo que no se expande ni se contrae de forma excesiva con los cambios de humedad. Esto es particularmente ventajoso para la fabricación de paneles prefabricados, ya que la retracción durante el proceso de secado puede controlarse de manera más predecible.

La clasificación de "baja compresibilidad" ($LL < 50\%$) y el valor moderado del Índice de Plasticidad ($I.P. = 15.3\%$) son indicadores de un suelo que no se expande ni se contrae de forma excesiva con los cambios de humedad. Esto es particularmente ventajoso para la fabricación de paneles prefabricados, ya que la retracción durante el proceso de secado puede controlarse de manera más predecible, minimizando la aparición de fisuras que comprometerían la integridad estructural del panel.

Carta de plasticidad M-02.

En el caso de las pruebas realizadas en M-02, muestran que con un LL de 29.57% y un IP de 13.18%, el punto se sitúa por encima de la línea "A", lo cual califica a la fracción fina como arcilla. La posición del punto a la izquierda de la línea vertical del 50% de LL indica que es una arcilla de baja compresibilidad. (ver **Figura 105**).

Figura 105.
Carta de Plasticidad M-02.



Nota: Elaboración por el Ing. Miguel Cervantes a través de la hoja de cálculo de SUA Ingeniería. Este gráfico permite identificar la clasificación de la muestra a partir de las pruebas de plasticidad realizadas.



En conjunto con el análisis granulométrico de M-02 (ver **Figura 101**), y de acuerdo con el sistema de clasificación SUCS (ASTM International, 2017, p. 6) se clasifica la muestra como una arena arcillosa (SC), esto surge a partir de los porcentajes de la composición de la muestra, es decir, 1.8% de gravas, 55.4% de arenas y un 42.8% de finos. Se puede identificar entonces que tanto M-00 como M-02 comparten clasificación; sin embargo, su composición es diferente, siendo que M-02 tiene una cantidad más elevada de finos.

La idoneidad de un suelo SC para la fabricación de paneles prefabricados de tierra cruda se basa en la sinergia de sus componentes principales: la arena y la arcilla. Estos elementos, al trabajar en conjunto, permiten obtener características y establecer de manera más efectiva puentes de cohesión que benefician el desarrollo de la propuesta. Al entender que la fracción arcillosa del suelo SC (cuyo comportamiento se verifica por el $IP > 7\%$) actúa como el aglutinante natural, mientras que la arena, al no ser plástica, reduce los efectos de contracción de la arcilla, otorgándole una mayor estabilidad.

La clasificación de los finos como una arcilla de baja compresibilidad ($LL < 50\%$) es una propiedad que comparten las muestras analizadas, lo cual es idónea para la propuesta de algunos sistemas constructivos a base de tierra cruda (Gatti, 2012). Esto indica que la muestra, al ser aplicada en la propuesta, no experimentará cambios volumétricos severos.

En resumen, ambas clasificaciones de las muestras, tanto CL como SC, son de alto beneficio como materia prima para paneles de tierra cruda (Carazas, Construir con bajareque cerén. Experiencias en el contexto de Oaxaca, México, 2021). La diferencia fundamental radica en su composición: el suelo CL es una matriz de arcilla reforzada con arena, mientras que el suelo SC es un esqueleto de arena cementado con arcilla (ASTM International, 2017). Sin embargo, ambos casos demuestran que un equilibrio entre los componentes granulares (arena) y cohesivos (arcilla) es la clave para obtener un material de construcción de tierra cruda que sea resistente, estable y adecuado para procesos de prefabricación (Gomma, Jabi, Soebarto, & Xie, 2022).

La correcta identificación y clasificación del suelo no solo optimiza la selección de la materia prima, sino que también permite la implementación de procesos de estabilización y el diseño de paneles que cumplen con estándares de calidad y durabilidad, impulsando la innovación en la construcción sustentable.



Desarrollo de prototipos de baja fidelidad.

A partir de los datos obtenidos durante las pruebas granulométricas y siguiendo las características de las corridas de prototipos propuestas en la **Tabla 7**. Se realizaron prototipos de baja fidelidad atendiendo a las características definidas en la **Fase 03**, en el apartado: “Traducción del modelo digital al Sistema Constructivo” (p. 140) de la metodología. Se realizaron 8 paneles distribuidos en 4 módulos: 2 con alma de bovedilla de poliestireno (EPS) y 2 con alma de fibras vegetales (paja de trigo) de acuerdo con el modelo generado en el mismo apartado. A partir de esto, se obtuvieron los siguientes prototipos ver **Figura 106**:

Figura 106
Prototipos de paneles.



Nota: De izquierda a derecha: Panel con ramificación opuesta y panel con sistema tipo voronoi simplificado y alma de EPS; panel con sistema tipo voronoi con refuerzo de malla pollera hexagonal y panel con ramificación opuesta con alma de fibras vegetales. Fuente: Fotografía propia, capturada el 22 de octubre de 2025.

Con las pruebas granulométricas se obtuvo una caracterización propia para el desarrollo de la mezcla, misma que fue colocada de manera manual en cada uno de los paneles, aplicando un aplanado a base de la misma mezcla para dar un terminado final. Una nota importante que hay que tomar en cuenta, es que el aplanado no fue realizado con fines estéticos, sino para compactación y contención de la mezcla dentro del marco estructural, tal como se muestra en la



Figura 107

Ejemplo de panel con mezcla y aplanado de contención.



Nota: Panel PV-III con aplanado de tierra a manera de contención. Fuente: Fotografía propia, capturada el 22 de octubre de 2025.

Una vez realizados los paneles, estos fueron colocados dentro de una bodega, para ser secados a la sombra, de manera controlada, esto permitió tener un curado y fraguado del material más estable, sin cambios bruscos de temperatura que afectaran a su composición. A continuación, se muestran los resultados finales de cada uno de los paneles, en el caso de PV-I a PV-IV (ver **Figura 108**) el tiempo de curado fue de 4 semanas, mientras que PV-V a PV-VIII (ver **Figura 109**) tuvieron un tiempo de 3 semanas de curado al momento de tomar las fotografías. Nota. A los paneles PV-I y PV-III no se les hizo aplanado, esto con el propósito de identificar el comportamiento de la mezcla al no compactarse de manera manual.



Figura 108
Paneles PV-I a PV-IV



Nota: De izquierda a derecha: PV-I, PV-II, PV-III y PV-IV con aplanado de tierra a manera de contención en PV-II y PV-IV. No se hizo el aplanado de contención. Fuente: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025.

Figura 109
Paneles PV-V a PV-VIII



Nota: De izquierda a derecha: PV-V, PV-VI, PV-VII y PV-VIII con aplanado de tierra a manera de contención. Fuente: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025.

El proceso de ejecución de cada uno de los paneles fue una oportunidad de ir mejorando técnicas para el siguiente a ejecutar, por ejemplo, si bien cada una de las mezclas fue idéntica en cuanto a proporción de insumos, para el desarrollo de los paneles con alma de fibras vegetales fue necesario dejar secar la mezcla por 30 min. a sol directo, esto para que perdiera una cantidad moderada de humedad y su capacidad plástica fuera mayor para su manejo, esto permitió que el



panel pudiese ser más estable, y no se hundiera tan fácil la mezcla dentro del armado al no contar con un elemento rigidizante entre el armado y panel.

El proceso de fabricación de los paneles se desarrolló mediante procedimientos eminentes artesanales, propios de una fase exploratoria orientada a validar la viabilidad material y constructiva del sistema propuesto. Para la conformación de cada prototipo se empleó una mezcla en la que la fibra vegetal se incorporó en proporción equivalente al volumen de tierra; esto permitió generar una matriz interna más ligera y potencialmente más resistente a esfuerzos de tracción.

Las características granulométricas de la tierra utilizada, particularmente su proporción equilibrada entre arenas y finos, facilitaron su aplicación y cohesión, evitando la necesidad de adicionar un agente estabilizante mineral u orgánico. No obstante, reconoce que la incorporación de estos pueda ser aplicada en futuras líneas de investigación, orientadas al desempeño estructural y la durabilidad a largo plazo.

Una vez “colados”, los paneles permanecieron en un proceso de curado durante cuatro semanas, periodo en el cual fueron monitoreados de manera constante para registrar cambios volumétricos, pérdida de humedad y posibles deformaciones. Al término de esta fase, los especímenes mostraron una consistencia aparente sólida y estable. Sin embargo, al ser expuestos directamente a la radiación solar, algunos presentaron agrietamientos superficiales asociados principalmente a procesos de contracción en la capa externa del aplanado. Este fenómeno fue más notorio en los paneles que carecían de malla pollera hexagonal de refuerzo y en aquellos cuyo núcleo estaba compuesto íntegramente por fibras vegetales. Una explicación plausible es que estas fibras, al encontrarse en grandes proporciones dentro del alma, absorbieron parte del agua de la mezcla, generando un secado diferencial que impidió un asentamiento homogéneo del material.

Adicionalmente, en casos específicos como en el prototipo PV-I, se registró una protuberancia en la estructura interna derivada de la compresión excesiva durante el armado del tejido, lo que evidencia la necesidad de optimizar los procesos de tensado, colocación y configuración del entramado en futuras iteraciones del prototipo.

Los resultados indican que, si bien los paneles alcanzaron una solidez inicial adecuada, su desempeño posterior reveló áreas críticas que requieren optimización, particularmente en lo relativo a la distribución de humedad, el uso de fibras en el alma y la integración de elementos de



refuerzo como la malla pollera. Estas observaciones constituyen insumos esenciales para el perfeccionamiento del sistema propuesto y orientan futuras investigaciones hacia el establecimiento de protocolos de mezcla, control de humedad y técnicas de armado más precisas, consolidando así las bases para avanzar hacia paneles prefabricados con mayor estabilidad, durabilidad y pertinencia estructural.

Fase 05: Validación del prototipo mediante pruebas y ensayos experimentales.

Capacidad Térmica (prueba de soplete).

Los resultados obtenidos a partir del ensayo térmico permiten identificar el comportamiento de los paneles compuestos desarrollados bajo condiciones de calentamiento puntual (ver **Figura 110**) y en régimen transitorio.

Figura 110

Proceso de aplicación de la prueba de soplete. Con exposición directa de flama en área puntual



Nota: La prueba se realizó en el campo de pruebas del Laboratorio de Construcción con Tierra, en ITESO, Universidad Jesuita de Guadalajara. Fotografía: Abraham Bernal, enero 2026

A partir del registro de temperaturas en la superficie expuesta, el núcleo y la contracara de los paneles, así como del cálculo de parámetros derivados como el flujo de calor (q), la conductividad térmica equivalente (k_{eq}) y la resistencia térmica (R), se establecen los siguientes hallazgos relevantes. Los resultados obtenidos se exponen a continuación en la **Tabla 17**:



Tabla 17*Resultados procesados de prueba de soplete.*

Panel	Tiempo exp. (s)	T sup. @10s (°C)	T sup. @30s (°C)	T sup. @60s (°C)	T cen. @10s (°C)	T cen. @30s (°C)	T cen. @60s (°C)	T contracara (°C)	L: Profundidad térmica afectada (m)	Área efectiva de Impacto (m²)	Volumen Afectado Térmicamente (m³)	Q: Flujo de Calor (W/m²) *	ΔT: Cambio de Temperatura (°C)	Keq: Conductividad Térmica Equivalente Transitorio (W/m·K) * (ValorK)	Rtotal: Resistencia Térmica Total (m²·K/W) (ValorR)
PV- II	10	22.8			23.5			23.00	0.0046	0.0028	0.000013	83.83	0.70	20.06	0.00835064
	30		22.9			23.7		23.00	0.0079	0.0050	0.0000	55.31	0.80	11.58	0.01446374
	60			62.7			24.2	22.90	0.0112	0.0201	0.0002	1,945.75	39.80	8.19	0.02045481
	30		70.5			25.3		22.80	0.0079	0.0254	0.0002	3,297.90	47.70	11.58	0.01446374
PV- IV	10	21.3			21.8			20.70	0.0046	0.0028	0.0000	140.02	1.10	21.32	0.00785579
	30		23.4			21.7		20.60	0.0079	0.0177	0.0001	205.78	2.80	12.31	0.01360663
	60			35.5			24.8	20.90	0.0112	0.0284	0.0003	2,031.94	39.10	8.70	0.01924268
	30		43.4			28.8		21.00	0.0079	0.0290	0.0002	1,646.26	22.40	12.31	0.01360663
PV- VI	10	20.9			20.5			21.40	0.0046	0.0113	0.0001	107.50	0.90	22.40	0.00837221
	30		62.8			20.3		21.20	0.0079	0.0314	0.0002	2,930.81	42.50	12.93	0.01450110
	60			72			26.8	20.90	0.0112	0.0380	0.0004	2,491.75	51.10	9.14	0.02050765
	30		99.8			40		21.00	0.0079	0.0380	0.0003	5,434.07	78.80	12.93	0.01450110
PV- VIII	10	20.5			20			20.70	0.0046	0.0079	0.0000	88.33	0.70	23.66	0.00792509
	30		30			20		20.80	0.0079	0.0201	0.0002	728.51	10.00	13.66	0.01372666
	60			85			22.9	20.30	0.0112	0.0254	0.0003	3,332.92	64.70	9.66	0.01941243
	30		116.5			20.9		20.20	0.0079	0.0254	0.0002	7,015.54	96.30	13.66	0.01372666

Nota: Elaboración propia a partir del procesamiento de la información obtenida del ensayo. Las formulaciones para el cálculo de cada una de las variantes se encuentran desarrolladas en el proceso metodológico de la prueba (p.94).

Comportamiento térmico durante la exposición.

Panel PV-II.

Durante las fases de exposición a flama media, el panel PV-II registró temperaturas en la superficie de impacto de 22.8 °C a los 10 s, 22.9 °C a los 30 s y 62.7 °C a los 60 s, evidenciando un incremento progresivo y moderado que refleja la inercia térmica de la capa superficial de tierra.

La temperatura del núcleo EPS siguió una tendencia paralela, con lecturas de 23.5, 23.7 y 24.2 °C respectivamente, mientras que la contracara se mantuvo estable en torno a 23.0 °C durante toda la fase de flama media, lo que indica que el frente térmico no logró penetrar significativamente el espesor del panel en tiempos cortos de exposición.

Durante la fase de flama alta (30 s), la temperatura superficial escaló a 70.5 °C y la del núcleo a 25.3 °C, con la contracara manteniéndose en 22.80 °C, lo que confirma que la masa térmica del sistema actuó como barrera efectiva. El flujo de calor calculado para esta fase fue de 3,297.90 W/m², el más elevado registrado para PV-II, con un cambio de temperatura (ΔT) de 47.70 °C.

La conductividad térmica equivalente transitoria (Keq) calculada fue de 11.58 W/m·K en las fases de 30 s y de 20.06 W/m·K a los 10 s; la resistencia térmica total (R total) osciló entre 0.00835 y 0.02045 m²·K/W, siendo el valor máximo correspondiente a la fase de 60 s de flama media, lo que sugiere mayor eficiencia aislante ante exposiciones prolongadas de intensidad moderada.



Panel PV-IV

El panel PV-IV presentó un comportamiento térmico con mayor reactividad que PV-II. En la fase de 10 s a flama media, la superficie alcanzó 21.3 °C y el núcleo 21.8 °C, con una contracara de 20.70 °C. A los 30 s, la temperatura superficial subió a 23.4 °C y el núcleo a 21.7 °C, mientras que a los 60 s se registró la lectura más significativa de flama media: 35.5 °C en superficie y 24.8 °C en núcleo. El flujo de calor en esta fase fue de 2,031.94 W/m², con un ΔT de 39.10 °C.

La fase de flama alta (30 s adicionales) elevó la temperatura superficial a 43.4 °C y la del núcleo a 28.8 °C, con la contracara estable en 21.0 °C, registrándose un flujo de calor de 1,646.26 W/m² y un ΔT de 22.40 °C. Los valores de K_{eq} para PV-IV oscilaron entre 8.70 y 21.32 W/m·K, y la resistencia térmica total entre 0.00786 y 0.01924 m²·K/W.

Comparativamente, PV-IV muestra un desempeño térmico ligeramente inferior al de PV-II durante las etapas de mayor intensidad, lo que puede asociarse con su mayor densidad (310.12 kg/m³) y su distribución de masa en la sección transversal.

Panel PV-VI

El panel de núcleo de paja PV-VI exhibió el comportamiento más crítico en la fase de flama alta. Durante la exposición de 10 s a flama media, la superficie registró 20.9 °C y el núcleo 20.5 °C, con la contracara a 21.40 °C, valor ligeramente superior a la temperatura superficial, posiblemente atribuible a variaciones ambientales locales durante la medición. A los 30 s la superficie ascendió a 62.8 °C y el núcleo a 20.3 °C, y a los 60 s alcanzaron 72.0 °C y 26.8 °C respectivamente; en este último caso el flujo de calor fue de 2,491.75 W/m² con un ΔT de 51.10 °C.

En la fase de flama alta (30 s), el panel PV-VI registró la temperatura superficial más elevada de toda la batería de ensayo: 99.8 °C, próxima al umbral de ebullición del agua libre en los poros de la tierra. El núcleo alcanzó 40.0 °C y la contracara se mantuvo en 21.00 °C. El flujo de calor asociado a esta condición fue de 5,434.07 W/m², el mayor de todos los especímenes evaluados, con un ΔT de 78.80 °C.

No obstante, la contracara permaneció sin variación apreciable, lo que demuestra la capacidad de la capa de paja y tierra para disipar el gradiente térmico a lo largo del espesor de 0.1875 m. Los valores de K_{eq} y R total para PV-VI son comparables a los de PV-VIII en



condiciones similares, con K_{eq} entre 9.14 y 22.40 W/m·K y R total entre 0.00837 y 0.02051 m²·K/W.

Panel PV- VII

El panel PV-VIII siguió una tendencia de calentamiento gradual durante las fases de flama media. A los 10 s, la superficie registró 20.5 °C y el núcleo 20.0 °C, con contracara de 20.70 °C. A los 30 s, la superficie subió a 30.0 °C y el núcleo a 20.0 °C. La lectura más significativa de flama media se presentó a los 60 s, con 85.0 °C en superficie y 22.9 °C en núcleo, con una contracara de 20.30 °C y un flujo de calor de 3,332.92 W/m² ($\Delta T = 64.70$ °C).

La fase de flama alta produjo la temperatura superficial más elevada de todos los especímenes: 116.5 °C, superando el umbral de 100 °C y sugiriendo la posible deshidratación acelerada de la capa superficial de tierra. El núcleo registró 20.9 °C y la contracara 20.20 °C — ambos sin variación significativa respecto a condiciones basales—, lo que es indicativo de la elevada resistencia térmica del núcleo de paja. El flujo de calor correspondiente fue de 7,015.54 W/m² ($\Delta T = 96.30$ °C), el valor más alto de toda la campaña experimental, con una K_{eq} de 13.66 W/m·K y una R total de 0.01373 m²·K/W.

Análisis de los parámetros de transferencia de calor.

Profundidad térmica afectada y volumen de impacto.

Este parámetro se considera como una constante en cada uno de los ensayos, esto es debido a que la profundidad de afectación térmica transitoria (L) fue calculada a partir de la difusividad térmica adoptada ($\alpha = 5 \times 10^{-7}$ m²/s) en función del tiempo de exposición. Los valores correspondientes fueron: 0.0046 m a los 10 s, 0.0079 m a los 30 s y 0.0112 m a los 60 s, siendo constantes para todos los paneles al depender exclusivamente del tiempo y la difusividad.

Se concluye que, independientemente de la tipología del panel, el frente térmico transitorio no penetró más allá de los primeros 11.2 mm de la sección, lo que corrobora la eficacia de la capa superficial de tierra como barrera de primera línea ante la acción ígnea.

Respecto al volumen afectado térmicamente, este valor sí mostró variación entre paneles en función del área efectiva de impacto. Los valores de mayor relevancia correspondieron a PV-VI y PV-VIII en la fase de flama alta, con volúmenes de 0.0003 m³, consistentes con áreas de impacto de hasta 0.0380 m² para PV-VI y 0.0254 m² para PV-VIII en las condiciones más severas.



Flujo de calor y diferencial de temperatura.

El flujo de calor (Q) mostró una correlación directa con la intensidad de la exposición y la naturaleza del núcleo.

Los paneles de paja (PV-VI y PV-VIII) experimentaron los flujos de calor más elevados en la fase de flama alta, con $5,434.07 \text{ W/m}^2$ y $7,015.54 \text{ W/m}^2$ respectivamente, en comparación con los paneles de EPS (PV-II y PV-IV), que registraron $3,297.90 \text{ W/m}^2$ y $1,646.26 \text{ W/m}^2$ en la misma condición. Esta diferencia puede explicarse por la mayor respuesta de la superficie de tierra sin refuerzo sintético al impacto de flama prolongada, así como por el efecto de la masa térmica diferencial entre ambos tipos de núcleo (Gutiérrez & Arteaga, 2021).

Los diferenciales de temperatura (ΔT) entre la superficie de impacto y la contracara confirmaron la elevada capacidad de disipación térmica de los cuatro paneles. En todos los casos, la contracara permaneció a temperaturas inferiores a 24°C , incluso cuando la superficie superó los 100°C , lo que representa gradientes de hasta 96.3°C a través del espesor del panel en el caso de PV-VIII.

Conductividad térmica equivalente (K_{eq}) y resistencia térmica total (R_{total}).

Los valores de K_{eq} obtenidos, comprendidos entre 8.19 y $23.66 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, representan valores de conductividad transitoria bajo condición extrema de exposición ígnea y no son directamente equivalentes a la conductividad estacionaria expuestas por la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011); sin embargo, el análisis comparativo entre paneles, del valor K_{eq} , permite establecer jerarquías de desempeño térmico ante fuego.

De la misma forma, este valor permite inferir que la transmisión efectiva de calor a través del espesor total del panel es reducida en los intervalos analizados, lo cual sugiere un potencial favorable en términos de control de ganancias térmicas bajo condiciones dinámicas.

La resistencia térmica total (R_{total}), evaluada conforme a los criterios de la NMMX-C-460-ONNCCE-2009 (ONNCCE, 2009) para el valor R de sistemas constructivos, osciló entre $0.00786 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ (PV-IV, fase de 10 s) y $0.02051 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ (PV-VI, fase de 60 s). Estos valores de R reflejan el comportamiento dinámico del sistema bajo exposición ígnea y no las condiciones de régimen permanente, por lo que su interpretación debe realizarse como indicadores de la respuesta térmica transitoria del panel ante solicitaciones de fuego directo. Estos valores deben interpretarse



como resistencias térmicas equivalentes en régimen transitorio y no como resistencias normativas del sistema constructivo.

Análisis de afectación ígnea en zonas de exposición

El análisis visual de las superficies expuestas tras la conclusión del protocolo de ensayo ígneo permite identificar patrones morfológicos diferenciados en función de la composición del núcleo y la densidad de cada panel. En todos los especímenes se observa una zona de carbonización central bien delimitada, rodeada por un halo de fisuración radial y pérdida de cohesión superficial de la capa de tierra, cuya extensión y geometría varían entre tipologías.

Los paneles de núcleo EPS (PV-II y PV-IV), si bien presentan fisuración radial característica de la contracción térmica de la arcilla, muestran zonas de carbonización de menor intensidad cromática y menor extensión, consistentes con sus temperaturas superficiales más moderadas (ver **Figura 111**)

Figura 111

Zonas afectadas tras exposición a flama directa durante el ensayo. Núcleo EPS.



Nota: Áreas de aplicación en PV-II (izquierda) y PV-IV (derecha). La imagen muestra las zonas de carbonización y el impacto que tuvo la prueba sobre la superficie del panel. Fotografía: Abraham Bernal, enero 2026.

Por su parte, los paneles de núcleo de paja (PV-VI y PV-VIII) exhiben mayor extensión e intensidad de la zona carbonizada, mayor afloramiento de material combustible degradado y patrones de fisuración más complejos, atribuibles tanto a su mayor respuesta térmica superficial como a la contribución de los procesos de pirólisis de la fibra vegetal al agrietamiento de la matriz de tierra (ver **Figura 112**).



Figura 112

Zonas afectadas tras exposición a flama directa durante el ensayo. Núcleo Paja



Nota: Áreas de aplicación en PV-VI (izquierda) y PV-VIII (derecha). La imagen muestra las zonas de carbonización y el impacto que tuvo la prueba sobre la superficie del panel. Fotografía: Abraham Bernal, enero 2026.

En todos los casos, el daño se circunscribió exclusivamente a la capa superficial de tierra, sin afectación estructural del núcleo ni de la contracara, lo que valida el principio de diseño adoptado en los paneles PV: la envoltura de tierra actúa como escudo térmico sacrificial capaz de contener el impacto ígnea de corta y media duración dentro de los límites del ensayo realizado, protegiendo la integridad del núcleo y garantizando la continuidad de la función de aislamiento térmico del sistema constructivo.

Conclusiones y consideraciones de la prueba.

Se observó en todas las configuraciones un gradiente térmico significativo entre la cara expuesta y la contracara del panel, destacando el caso del panel PV-VIII, en el que la temperatura superficial supera los 100 °C, mientras que la contracara permanece cercana a la temperatura ambiente. Este comportamiento evidencia que la transferencia térmica se desarrolla bajo un régimen transitorio, donde el calor se concentra en la capa superficial y su propagación hacia el interior es limitada durante los tiempos de exposición evaluados.

En el caso de los paneles con núcleo de EPS (PV-II y PV-IV), estos presentaron temperaturas superficiales máximas más moderadas en la fase de flama alta (70.5 °C y 43.4 °C respectivamente), lo que puede asociarse con el efecto de la capa de tierra como amortiguador térmico sobre un núcleo de baja conductividad. No se observó fusión ni deformación del EPS



durante el tiempo de ensayo, dado que la profundidad de penetración térmica no alcanzó el núcleo sintético en ninguna de las fases evaluadas.

Mientras que los paneles con núcleo de paja (PV-VI y PV-VIII), exhibieron temperaturas superficiales significativamente más elevadas en la fase de flama alta (99.8 °C y 116.5 °C respectivamente), con flujos de calor considerablemente mayores. Esto sugiere que la interfaz tierra-paja facilita una mayor concentración del gradiente térmico en la zona superficial, actuando la paja como un aislante de alta resistencia que retarda la transmisión hacia la contracara. La elevada temperatura superficial en PV-VIII (116.5 °C) indicaría el inicio de procesos de deshidratación de la arcilla en la zona de impacto, fenómeno que, paradójicamente, puede contribuir a la formación de una capa cerámica superficial con propiedades refractarias incipientes.

Si bien los resultados obtenidos no son directamente comparables con los valores establecidos en la normativa descrita, debido a la naturaleza transitoria del ensayo, estos aportan información relevante sobre el comportamiento térmico dinámico de los paneles. En particular, evidencian su capacidad para retardar la transferencia de calor y amortiguar los picos térmicos, lo cual constituye un atributo clave para su aplicación en envolventes en climas extremos.

Pruebas de Impacto.

La evaluación del desempeño mecánico de los paneles prefabricados a base de tierra requiere incluir ensayos que permitan determinar su capacidad para resistir acciones accidentales o cargas de uso cotidiano. Entre estos ensayos, la prueba de impacto resulta fundamental, ya que simula esfuerzos localizados producidos por golpes, colisiones o manipulaciones propias del ciclo de vida de un elemento constructivo.

Su aplicación, basada en metodologías reconocidas como *ASTM E695*, *ASTM C1629* e *ISO 7892*, permite identificar la resistencia del panel frente a impactos de cuerpo blando y duro, así como cuantificar el nivel de daño, la energía absorbida y la integridad estructural del sistema sándwich tierra–entramado vegetal–alma aislante.

A partir de las normas antes planteadas, se decidió utilizar un sistema de caída libre, desde la cual se dejaron caer discos de 4.45 kg, en un máximo de 4 apilamientos de estos, dando como peso máximo 17.80 kg, en cada uno de los pesos se realizó a 3 diferentes alturas, posterior a eso, se calculó la energía del impacto a través de la fórmula $E = m \times g \times h$, Donde: E= Energía (Joules)



; m= Masa (Kilogramo); g= Gravedad (m/s^2); h= Altura (metros) , tal como se muestra en la **Tabla 18**:

Tabla 18

Tabla de muestras tomadas para ejecución de la prueba de impacto.

Muestra ID	Masa (Kg)	Altura (Mts)	Energía (J)
1	4.45	0.25	10.9025
2	4.45	0.50	21.805
3	4.45	1.00	43.61
4	8.90	0.25	21.805
5	8.90	0.50	43.61
6	8.90	1.00	87.22
7	13.35	0.25	32.7075
8	13.35	0.50	65.415
9	13.35	1.00	130.83
10	17.80	0.25	43.61
11	17.80	0.50	87.22
12	17.80	1.00	174.44

Nota: Se marcan en rojo las muestras que no se realizarán debido a que representan la misma carga energética que otra de las variables desarrolladas en la propuesta de prueba. Tabla elaborada propia a partir de lo mostrado en las normativas presentadas.

Tomando en cuenta estas muestras, se determinó realizar las pruebas a cada uno de los paneles, para evaluar la resistencia a impactos locales, de esta manera, fue posible evaluar el desempeño de los paneles en función del espesor del revestimiento y el armado interno. A continuación, se presenta un tabulador con la ejecución de las pruebas por panel, donde se hacen algunas observaciones relevantes de manera cualitativa sobre el estado de los paneles:

Tabla 19

Resultado de prueba de impacto en PV-I

Prototipo	Panel EPS + Ramificación Opuesta + no malla pollera hexagonal (PV - I)	
# Muestra	Energía aplicada	Observaciones
1	10.9025	Sin afectaciones
2	21.805	Sin afectaciones
3	43.61	Sin afectaciones
6	87.22	Sin afectaciones
7	32.7075	Pequeña fisura de 1 cm
8	65.415	Sin afectaciones mayores a la anterior muestra.
9	130.83	Rozamiento en capa externa, fisura sin incremento.
12	174.44	Pequeño rozamiento en zona de impacto

Nota: Elaboración propia a partir de registro de prueba. Ver **Figura 113** para identificación del proceso.



Figura 113
Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (derecha) en PV-I



Nota: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025. No se aprecian deformaciones que afecten de manera significativa. (ver **Tabla 19** para identificaciones de cargas)

Tabla 20.
Resultado de prueba de impacto en PV-II

Prototipo	Panel EPS + Ramificación Opuesta + malla pollera hexagonal (PV - II)	
# Muestra	Energía aplicada	Observaciones
1	10.9025	Sin afectaciones
2	21.805	Sin afectaciones
3	43.61	Sin afectaciones
6	87.22	Sin afectaciones
7	32.7075	Pequeña fisura, no significativa, 0.4 cm
8	65.415	Sin afectaciones mayores a la anterior muestra.
9	130.83	Pequeño desprendimiento de capa sin afectaciones estructurales
12	174.44	Sin afectaciones mayores a la anterior muestra.

Nota: Elaboración propia a partir de registro de prueba. Ver **Figura 114** para identificación del proceso

Figura 114
Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (derecha) en PV-II



Nota: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025. No se aprecian deformaciones que afecten de manera significativa. (ver **Tabla 20** para identificaciones de cargas)

Tabla 21
Resultado de prueba de impacto en PV-III

Prototipo	Panel EPS + Voronoi Simplificado + no malla pollera hexagonal (PV - III)	
# Muestra	Energía aplicada	Observaciones
1	10.9025	Sin afectaciones
2	21.805	Sin afectaciones
3	43.61	Pequeña fisura de .2 cm
6	87.22	Sin afectaciones mayores a la anterior muestra.
7	32.7075	Sin afectaciones mayores a la anterior muestra.
8	65.415	Se extiende pequeña fisura .65 cm
9	130.83	Sin afectaciones mayores a la anterior muestra.
12	174.44	Fisura se extiende .55 cm

Nota: Elaboración propia a partir de registro de prueba. Ver **Figura 115** para identificación del proceso



Figura 115

Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (derecha) en PV-III



Nota: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025. No se aprecian deformaciones que afecten de manera significativa. (ver **Tabla 21** para identificaciones de cargas)

Tabla 22

Resultado de prueba de impacto en PV-IV

Prototipo	Panel EPS + Voronoi Simplificado + malla pollera hexagonal (PV - IV)	
# Muestra	Energía aplicada	Observaciones
1	10.9025	Sin afectaciones
2	21.805	Sin afectaciones
3	43.61	Sin afectaciones
6	87.22	Sin afectaciones
7	32.7075	Sin afectaciones
8	65.415	Rozadura en área de impacto
9	130.83	Incremento de área afectada
12	174.44	Sin afectaciones mayores a la anterior muestra.

Nota: Elaboración propia a partir de registro de prueba. Ver **Figura 116** para identificación del proceso



Figura 116

Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (derecha) en PV-IV



Nota: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025. No se aprecian deformaciones que afecten de manera significativa. (ver **Tabla 22** para identificaciones de cargas)

Tabla 23

Resultado de prueba de impacto en PV-V

Prototipo	Panel Paja + Ramificación Opuesta + no malla pollera hexagonal (PV - V)	
# Muestra	Energía aplicada	Observaciones
1	10.9025	Pequeño desprendimiento de polvo, sin afectaciones.
2	21.805	Leve hundimiento en zona de impacto del disco (Profundidad = 2.5 cm)
3	43.61	Sin afectaciones generales a las anteriores
6	87.22	Pequeño desprendimiento de polvo, sin afectaciones.
7	32.7075	Levantamiento de partículas, desprendimiento de capa superior
8	65.415	Ruptura de armado interno del panel, aumenta hundimiento (profundidad 3.7 cm)
9	130.83	Segunda ruptura de armado interno (Profundidad = 4,6 cm)
12	174.44	Colapso íntegro de la estructura, la hendidura de impacto llega a 5.5 cm de profundidad.

Nota: Elaboración propia a partir de registro de prueba. Ver **Figura 117** para identificación del proceso



Figura 117
Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (centro y derecha) en PV-V



Nota: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025. No se aprecian deformaciones que afecten de manera significativa. (ver **Tabla 23** para identificaciones de cargas).

Tabla 24
Resultado de prueba de impacto en PV-VI

Prototipo	Panel EPS + Ramificación Opuesta + malla pollera hexagonal (PV - VI)	
# Muestra	Energía aplicada	Observaciones
1	10.9025	Sin afectaciones
2	21.805	Sin afectaciones
3	43.61	Desprendimiento de polvo. Compactación del área de impacto
6	87.22	Ruptura de la capa superior, primer hundimiento (Profundidad = 3 cm)
7	32.7075	Sin afectaciones mayores a la anterior
8	65.415	Ruptura de la capa externa al borde del impacto (Profundidad = 3.9 cm)
9	130.83	Hundimiento mayor, pero sin afectación aparente a la estructura. (Profundidad = 5.9 cm)
12	174.44	El cráter de impacto llegó a 6.9 cm.

Nota: Elaboración propia a partir de registro de prueba. Ver **Figura 118** para identificación del proceso

Figura 118

Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (centro y derecha) en PV-VI



Nota: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025. No se aprecian deformaciones que afecten de manera significativa. (ver **Tabla 24** para identificaciones de cargas)

Tabla 25

Resultado de prueba de impacto en PV-VII

Prototipo	Panel EPS + Voronoi Simplificado + no malla pollera hexagonal (PV - VII)	
# Muestra	Energía aplicada	Observaciones
1	10.9025	Sin afectaciones
2	21.805	Sin afectaciones
3	43.61	Compactación del área de impacto
6	87.22	Primer hundimiento visible (profundidad 3.3 cm)
7	32.7075	Sin afectaciones mayores al anterior.
8	65.415	Fracturación de capa externa, sin daño estructural aparente, incremento de hundimiento (Profundidad = 3.9 cm)
9	130.83	Deformación superficial (Profundidad 4.6 cm)
12	174.44	Colapso de capa exterior y desprendimiento en zona de impacto (Profundidad final = 6.3 cm)

Nota: Elaboración propia a partir de registro de prueba. Ver **Figura 119** para identificación del proceso



Figura 119

Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (centro y derecha) en PV-VII



Nota: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025. No se aprecian deformaciones que afecten de manera significativa. (ver **Tabla 25** para identificaciones de cargas)

Tabla 26

Resultado de prueba de impacto en PV-VIII

Prototipo	Panel EPS + Voronoi Simplificado + malla pollera hexagonal (PV - VIII)	
# Muestra	Energía aplicada	Observaciones
1	10.9025	Sin afectaciones
2	21.805	Sin afectaciones
3	43.61	Sin afectaciones
6	87.22	Compactación del área de impacto (Profundidad = 3.5 cm)
7	32.7075	Se marca soporte central, sin afectación directa
8	65.415	Fractura de capa exterior y pequeño desprendimiento
9	130.83	Hundimiento mayor en zona de impacto, sin desprendimiento mayor (Profundidad = 4.8 cm)
12	174.44	Fractura de capa exterior, sin daño estructural aparente, sin desprendimiento mayores (Profundidad de 6 cm)

Nota: Elaboración propia a partir de registro de prueba. Ver **Figura 120** para identificación del proceso



Figura 120

Comparativa entre muestra 1 (izquierda) y 12 (centro y derecha) en PV-VIII



Nota: Fotografía propia, capturada el 12 de noviembre de 2025. No se aprecian deformaciones que afecten de manera significativa. (ver **Tabla 26** para identificaciones de cargas)

Resultados de pruebas de impacto.

Comportamiento general de los paneles.

Los resultados permiten identificar tendencias importantes sobre la respuesta mecánica del sistema sándwich tierra–entramado vegetal–alma aislante. Los paneles con alma de poliestireno expandido (EPS) evidenciaron un comportamiento más amortiguado, atenuando la propagación del impacto y reduciendo el daño superficial gracias a la deformación controlada del núcleo. En contraste, los paneles con alma de paca vegetal presentaron una respuesta más rígida, transmitiendo mayor energía hacia el recubrimiento de tierra y generando patrones de fisuración más marcados.

En el rango de baja energía (10–22 J), ambos sistemas se mantuvieron íntegros y el daño se limitó a microfisuras menores, lo cual coincide con el desempeño esperado para sistemas ligeros y revestimientos naturales. En el rango de energía media (22–44 J), se observó el papel esencial de las fibras vegetales (paja de trigo) y del entramado de voronoi simplificado, que contribuyeron a contener la propagación del daño y a evitar desprendimientos significativos. Finalmente, a energías superiores a 44 J, asociadas a impactos severos, el recubrimiento comenzó a presentar deformaciones localizadas más profundas, fisuras visibles y en algunos casos desprendimiento parcial, señalando el límite operativo del sistema en condiciones extremas.



Mecanismo de falla observado y recomendaciones a tomar en cuenta en el desarrollo de nuevos prototipos en futuras investigaciones.

Los mecanismos de falla predominantes estuvieron asociados a los siguientes aspectos:

- Fisuración radial y circunferencial en la zona de impacto.
- Espaciado controlado, particularmente en paneles con alma EPS.
- Desprendimiento parcial del recubrimiento en paneles con alma vegetal bajo impactos de alta energía.
- Deformación localizada del entramado, con fractura ocasional de elementos del carrizo en impactos mayores.

En términos generales, el sistema mostró un comportamiento de ductilidad gracias al uso combinado de fibras naturales, yute y entramado de carrizo, lo que evitó fallas frágiles instantáneas. A partir del análisis de daño y de la correlación entre energía aplicada y respuesta material, se formulan las siguientes recomendaciones para optimizar el desempeño del panel:

1. Incrementar el espesor del recubrimiento en la cara expuesta del panel de 19 mm ($\frac{3}{4}$ "") a 25 mm (1"), o bien reforzar puntualmente la zona central, con el fin de mejorar la resistencia a perforación y punzonamiento.
2. Incorporar una estabilización ligera en la mezcla de tierra (1–3% de cal o aditivos orgánicos), con el objetivo de aumentar la cohesión interna y la resistencia a impactos sin comprometer la permeabilidad del material.
3. Densificar el entramado de carrizo en la zona susceptible de impacto, ya que esto contribuye a distribuir la carga dinámica y disminuir la concentración de esfuerzos.
4. Agregar un refuerzo superficial secundario, como una malla vegetal de mayor densidad o una geomalla ligera, que favorezca la contención del recubrimiento ante impactos de mediana y alta energía.
5. Determinar un umbral operativo de energía, clasificando el panel en tres niveles funcionales:
 - Zona segura: **10–25 J**



- Zona funcional: **25–45 J**
- Zona crítica: **>45 J**

Esta clasificación permitirá orientar su uso arquitectónico y establecer límites adecuados para aplicaciones reales.

Conclusión de Pruebas de Impacto.

En resumen, la prueba de impacto demostró que los paneles desarrollados presentan una capacidad de absorción de energía adecuada para aplicaciones en sistemas ligeros de cerramiento. Su desempeño se sustenta principalmente en la combinación de materiales naturales, la configuración en sándwich y la inclusión de entramados vegetales que aportan ductilidad y estabilidad post-impacto. No obstante, los resultados también permiten identificar áreas de mejora que podrían fortalecer el comportamiento del panel ante eventos dinámicos más severos, contribuyendo así a su optimización como sistema prefabricado a base de tierra cruda.

Prueba de Karsten.

Los registros se obtuvieron a los 1, 5, 10 y 15 minutos de exposición, bajo condiciones higrotérmicas de temperatura ambiente entre 23 y 26 °C y humedad relativa entre 29 y 36% en la fase sin hidrófugo, y entre 27 y 29 °C con humedad relativa de 19 a 21% en la fase con mucílago. La clasificación de permeabilidad adoptada se basa en la penetración acumulada a los 10 minutos de ensayo, de acuerdo con lo que plantea (Karsten, 1997) (ver **Tabla 27**). Como se mencionó en la metodología, se hicieron dos ensayos: el primero sin la aplicación de un hidrofugaste y el segundo con la aplicación de un hidrofugaste natural a base de mucílago de nopal.

Tabla 27

Clasificación de superficie a partir de la cantidad de ml absorbidos.

Absorción en ml @ 10 min	Clasificación
Más de 3,0	Permeabilidad muy Alta
De 2.4 a 3.0	Permeabilidad Alta
De 1.0 a 2.4	Mediana Permeabilidad
De 0.4 a 1.0	Baja Permeabilidad
De 0.2 a 0.4	Impermeabilidad Relativa
De 0.1 a 0.2	Impermeable
Menos de 0.1	Sin actividad capilar.

Nota: Traducción propia. Clasificación de superficies de acuerdo con la prueba de Karsten (Karsten, 1997)



Comportamiento sin hidrofugante.

Clasificación por permeabilidad en condición natural.

La lectura de referencia para la clasificación de permeabilidad corresponde al volumen absorbido acumulado a los 10 minutos de ensayo, conforme a la escala adoptada. Los resultados por panel en condición sin hidrófugo fueron los siguientes (ver **Tabla 28**):

Tabla 28

Registro de absorción sin hidrofugante.

Pruebas Karsten (Absorción) Sin Hidrófugo						
Panel	Punto de Prueba	Tiempo (min)	Condiciones Higrotérmicas	Agua absorbida (ml)	Velocidad de Absorción (ml/min)	Clasificación. Basado en el nivel de absorción @10 min.
PV- I	Medio	1	Temp. 23°	0.2	0.20	Mediana Permeabilidad
		5		1	0.20	
		10	HR. Ambiente: 36%	2	0.20	
		15		2.8	0.19	
PV- II	Medio	1	Temp. 24°	0.1	0.10	Alta Permeabilidad
		5		1.9	0.38	
		10	HR. Ambiente: 32%	2.7	0.27	
		15		3.2	0.21	
PV- III	Medio	1	Temp. 24°	0.4	0.40	Mediana Permeabilidad
		5		1.3	0.26	
		10	HR. Ambiente: 32%	2.3	0.23	
		15		4.5	0.30	
PV- IV	Medio	1	Temp. 23°	0.2	0.20	Mediana Permeabilidad
		5		0.8	0.16	
		10	HR. Ambiente: 36%	1.6	0.16	
		15		0	0.00	
PV- V	Medio	1	Temp. 24°	0.3	0.30	Baja Permeabilidad
		5		0.7	0.14	
		10	HR. Ambiente: 32%	1	0.10	
		15		1.2	0.08	
PV- VI	Medio	1	Temp. 25°	0.6	0.60	Permeabilidad muy Alta
		5		2.2	0.44	
		10	HR. Ambiente: 30%	3.9	0.39	
		15		4.6	0.31	
PV- VII	Medio	1	Temp. 26°	0	0.00	Sin actividad capilar - No se llevó a cabo el ensayo.
		5		0	0.00	
		10	HR. Ambiente: 29%	0	0.00	
		15		0	0.00	
PV- VIII	Medio	1	Temp. 26°	3.55	3.55	Permeabilidad muy Alta
		5		4.6	0.92	
		10	HR. Ambiente: 29%	4.8	0.48	
		15		0	0.00	

Nota: *Elaboración propia. Se muestran las lecturas de absorción sin la aplicación de hidrofugante y su clasificación de acuerdo con la cantidad de absorción.*

El espectro de resultados en condición natural es amplio y heterogéneo, abarcando desde la ausencia total de actividad capilar (PV-VII) hasta niveles de permeabilidad muy alta (PV-VI y PV-VIII), lo que refleja la variabilidad intrínseca de los compuestos de tierra cruda en función de su formulación, densidad de compactación, granulometría y contenido de fibras. Este



comportamiento es característico y previsible en los sistemas constructivos de tierra, cuya porosidad abierta y estructura capilar sin tratamiento los hace inherentemente vulnerables al ingreso de agua líquida por succión.

Análisis del ensayo por tipología.

El panel PV-VII en esta primera prueba no debe ser tomado en cuenta, debido a que no fue posible la aplicación del ensayo en este panel.

Los paneles PV-VI y PV-VIII, ambos con núcleo de paja, presentaron los valores de absorción más elevados en condición natural (3.9 y 4.8 ml a los 10 minutos, respectivamente), clasificándose ambos en la categoría de permeabilidad muy alta. Este comportamiento es coherente con la naturaleza higroscópica de las fibras vegetales, que crean canales capilares preferenciales en la interfaz fibra-matriz arcillosa, así como con la retracción diferencial del sistema tierra-paja durante el curado, que genera microfisuras superficiales que actúan como vías de ingreso preferencial para el agua. La velocidad de absorción de PV-VIII alcanzó 0.92 ml/min a los 5 minutos, el valor más elevado de toda la campaña experimental, decreciendo posteriormente hasta absorción nula a los 15 minutos; este comportamiento de saturación rápida seguida de cese de absorción sugiere la presencia de una porosidad superficial abierta, pero de reducida profundidad efectiva, posiblemente asociada a la capa superficial de acabado.

El panel PV-II alcanzó 2.7 ml a los 10 minutos, clasificándose en alta permeabilidad, con una velocidad de absorción pico de 0.38 ml/min a los 5 minutos. Este panel de núcleo EPS y la menor densidad del par (291.75 kg/m^3) presentan una superficie con porosidad abierta considerable, lo que lo sitúa como el panel de núcleo sintético más vulnerable al ingreso de agua en condición sin tratamiento.

Por otra parte, el panel PV-V fue el segundo panel con mejor desempeño en condición natural, con apenas 1.0 ml absorbidos a los 10 minutos (baja permeabilidad) y una velocidad de absorción en franca disminución desde 0.14 ml/min a los 5 minutos hasta 0.08 ml/min a los 15 minutos, indicando una tendencia hacia la saturación superficial progresiva.



Comportamiento con hidrofugante.

Clasificación por permeabilidad postratamiento.

En este análisis, además de la clasificación en base a los niveles de absorción en la superficie del panel, también se calculará el porcentaje de mejora de absorción resultante de la aplicación del hidrofugante natural. Los resultados por panel en condición con hidrófugo fueron los siguientes (ver **Tabla 29**):

Tabla 29

Registro de absorción con hidrofugante.

Pruebas Karsten (Absorción) con Hidrófugo							
Panel	Punto de Prueba	Tiempo (min)	Condiciones Higrotérmicas	Agua absorbida (ml)	Velocidad de Absorción (ml/min)	Clasificación. Basado en el nivel de absorción @10 min.	Reducción vs. sin hidrófugo.(%)
PV- I	Medio	1	Temp. 27°	0	0.00	Mediana Permeabilidad	-10.00
		5		1	0.20		
		10	HR. Ambiente: 21%	1.8	0.18		
		15		2.4	0.16		
PV- II	Medio	1	Temp. 27°	0	0.00	Mediana Permeabilidad	-33.33
		5		1	0.20		
		10	HR. Ambiente: 21%	1.8	0.18		
		15		2.6	0.17		
PV- III	Medio	1	Temp. 27°	0.4	0.40	Mediana Permeabilidad	-13.04
		5		1	0.20		
		10	HR. Ambiente: 21%	2	0.20		
		15		2.3	0.15		
PV- IV	Medio	1	Temp. 28°	0.2	0.20	Mediana Permeabilidad	0.00
		5		0.8	0.16		
		10	HR. Ambiente: 20%	1.6	0.16		
		15		2.6	0.17		
PV- V	Medio	1	Temp. 28°	0.3	0.30	Baja Permeabilidad	0.00
		5		0.7	0.14		
		10	HR. Ambiente: 20%	1	0.10		
		15		1.1	0.07		
PV- VI	Medio	1	Temp. 28°	0.6	0.60	Mediana Permeabilidad	-55.13
		5		1.2	0.24		
		10	HR. Ambiente: 20%	1.75	0.18		
		15		2.2	0.15		
PV- VII	Medio	1	Temp. 28°	0.7	0.70	Mediana Permeabilidad	No Aplica
		5		1.5	0.30		
		10	HR. Ambiente: 20%	1.9	0.19		
		15		2.2	0.15		
PV- VIII	Medio	1	Temp. 29°	0.7	0.70	Mediana Permeabilidad	-56.25
		5		1.5	0.30		
		10	HR. Ambiente: 19%	2.1	0.21		
		15		2.5	0.17		

Nota: *Elaboración propia. Se muestran las lecturas de absorción sin la aplicación de hidrofugante y su clasificación de acuerdo con la cantidad de absorción.*

Análisis del ensayo por tipología post – tratamiento de hidrofugante.

Los resultados postratamiento revelan que el mucilago de nopal produjo reducciones de absorción estadísticamente significativas en los paneles de mayor permeabilidad original, con los



resultados más relevantes en PV-VI (reducción del 55%, de 3.9 a 1.75 ml) y PV-VIII (reducción del 56%, de 4.8 a 2.1 ml), ambos paneles de núcleo de paja.

Esta eficacia preferencial sobre los paneles de mayor porosidad es coherente con el mecanismo de acción del mucílago: al penetrar en los poros capilares de mayor diámetro, los polisacáridos del gel de *Opuntia* forman una película viscosa que reduce el radio efectivo del canal capilar y, por consiguiente, la presión de succión capilar según la relación de Jurin. En poros de menor diámetro, como los de los paneles de menor permeabilidad original, la ganancia marginal es más reducida porque la succión capilar ya estaba limitada por la geometría porosa.

El panel PV-II mostró una reducción del 33% (de 2.7 a 1.8 ml), lo que representa una mejora sustancial para el panel de núcleo EPS más permeable. PV-I y PV-III redujeron su absorción en aproximadamente 10–13%, manteniéndose en la categoría de mediana permeabilidad. PV-IV y PV-V no registraron variación apreciable con el tratamiento, lo que indica que en estos paneles la resistencia al ingreso de agua está determinada por la estructura porosa intrínseca de la mezcla de tierra más que por la condición superficial tratable con mucílago.

Conclusión y recomendación para el tratamiento de patologías.

Los resultados de la prueba Karsten confirman que, en condición natural, los paneles PV-VI y PV-VIII, de núcleo de paja, presentan la mayor susceptibilidad a esta patología, absorbiendo entre 3.9 y 4.8 ml en tan solo 10 minutos bajo una presión hidrostática equivalente a una columna de agua de apenas 15 cm.

En contextos de precipitación directa o salpicadura, la acción del agua sería de mayor energía cinética, lo que incrementaría la penetración efectiva y el riesgo de erosión superficial. Esta condición exige la aplicación sistemática de tratamientos hidrófugos, especialmente en las zonas de mayor exposición del edificio: zócalos, alféizares, encuentros con cubiertas y fachadas sin alero suficiente.

Los presentes resultados confirman que el mucílago de nopal es eficaz como tratamiento hidrófugo en los paneles de mayor permeabilidad original, con reducciones de absorción de hasta el 56% en los paneles de paja. Sin embargo, su eficacia es limitada o nula en paneles de permeabilidad baja a nula (PV-IV, PV-V), lo que indica que el tratamiento es más pertinente y coste-eficiente cuando se aplica selectivamente en las formulaciones con mayor contenido de fibra



vegetal o menor densidad de compactación. El rango de absorción postratamiento en los paneles de paja (1.75–2.1 ml a 10 min) cae dentro de la categoría de mediana permeabilidad, lo que, si bien representa una mejora sustancial respecto a la condición natural, aún supone un nivel de absorción que requiere atención en términos de mantenimiento periódico del tratamiento, dado que los biopolímeros del mucílago son susceptibles de degradación por acción de ciclos de humedecimiento-secado, radiación UV y microorganismos (Blachet, 2017).



Conclusiones y futuras líneas de investigación.

La presente investigación parte de una doble problemática detectada en el contexto constructivo de Hermosillo, Sonora: la inadecuación higrotérmica de los sistemas constructivos convencionales, predominantemente a base de acero y concreto, ante las condiciones climáticas extremas de la región, y el elevado impacto ambiental que dichos materiales generan a lo largo de su ciclo de vida. Ante esta dualidad, la investigación propone el desarrollo de un sistema de panel prefabricado tipo sándwich con estructura mixta de tierra cruda y fibras vegetales, definido mediante herramientas de diseño paramétrico y principios biomiméticos.

Los resultados obtenidos a través del proceso metodológico, que integró *Design Thinking*, Prototipado Rápido y validación experimental, permiten afirmar que la tierra cruda, combinada estratégicamente con fibras vegetales, entramados de carrizo y refuerzos complementarios, constituye una alternativa técnicamente viable para sistemas de cerramiento prefabricado en climas cálido-secos. Esta conclusión no se formula desde una perspectiva nostálgica hacia la tradición vernácula, sino como resultado de un proceso riguroso de caracterización material, modelado estructural, fabricación de prototipos y ensayos de laboratorio.

La propuesta logra articular tres campos conceptuales que raramente convergen en la práctica: la bioconstrucción, la prefabricación y el diseño paramétrico. Esta triangulación aporta un marco metodológico reproducible para investigaciones que busquen integrar materiales naturales a procesos industrializados de edificación, respondiendo simultáneamente a las demandas de eficiencia constructiva, desempeño ambiental y confort higrotérmico. En este sentido, la investigación contribuye a derribar el estigma técnico asociado a la tierra cruda, demostrando que este material puede ser tecnificado y estandarizado sin perder sus propiedades.

Respuesta a preguntas de investigación

La investigación se articuló en torno a cuatro preguntas implícitas (que rigen el planteamiento de los objetivos) en el problema de investigación, cuyas respuestas se sintetizan a continuación.



¿Es posible integrar la tierra cruda en un sistema prefabricado moderno que responda al contexto constructivo de Hermosillo?

Sí, aunque con condiciones. Los resultados de la Fase 01 (empatía p. 101) revelaron que el sector constructor de la región trabaja predominantemente con sistemas de concreto prefabricado y EPS, y valora principalmente la rapidez de instalación, el bajo costo de mano de obra y la resistencia a la intemperie. La propuesta responde a estas expectativas en formato y modularidad, pues se adoptó el módulo de 0.61×1.22 m, compatible con los estándares comerciales identificados, pero enfrenta resistencias asociadas a las dudas sobre durabilidad y la ausencia de un marco normativo específico en México para sistemas constructivos de tierra cruda.

La investigación proporciona evidencia empírica que comienza a atender estas resistencias, aunque reconoce que la transición tecnológica plena requerirá estrategias adicionales de socialización y validación normativa, conforme a lo señalado por Morel et al. (2021).

¿Qué configuración geométrica y material ofrece el mejor desempeño estructural en el panel?

El análisis estructural desarrollado en MATLAB bajo cuatro escenarios comparativos (Voronoi con y sin malla, Ramificación Opuesta con y sin malla) permite responder con claridad: la configuración de Ramificación Opuesta con malla pollera hexagonal (A2) es la que ofrece el mejor desempeño global.

Esta combinación registra la mayor rigidez flexional ($D \approx 1,310 \text{ N}\cdot\text{m/m}$), la menor tensión de compresión en el carrizo ($\approx 13 \text{ MPa}$, con un factor de seguridad de ≈ 4.5), la frecuencia propia más alejada del rango sísmico crítico ($\approx 6.5 \text{ Hz}$) y los factores de seguridad más equilibrados en flexión, adherencia y pandeo.

La malla pollera hexagonal se identifica como el componente de mayor impacto positivo sobre la integridad estructural del sistema, incrementando la rigidez en aproximadamente 125% respecto a la configuración sin refuerzo (ver resultados específicos en Fase 03 “Evaluación estructural y de viabilidad de entramados” p. 80).

¿Cuál es la capacidad higrotérmica y de durabilidad del sistema ante las condiciones del clima cálido-seco?

En cuanto al comportamiento térmico, la prueba de soplete evidenció que, independientemente de la tipología del panel, el frente térmico transitorio no penetró más allá de



los primeros 11.2 mm de la sección durante los tiempos de exposición evaluados, y la contracara se mantuvo en temperaturas próximas al ambiente incluso cuando la superficie superó los 100 °C en los casos más críticos (PV-VIII). Esta capacidad de disipación térmica confirma el potencial de la tierra cruda como barrera efectiva ante ganancias de calor, un atributo directamente relevante para el clima extremo de Hermosillo, donde las temperaturas máximas promedio alcanzan los 40 °C entre junio y agosto (ver Fase 05 “Capacidad Térmica (prueba de soplete)” p. 178).

Respecto a la durabilidad, las pruebas de impacto mostraron que los paneles con núcleo de EPS presentan mayor amortiguación y menor daño superficial que los de paja, manteniéndose íntegros hasta energías de 43 J (zona segura) y funcionales hasta 87 J con daños localizados menores. La prueba de Karsten reveló que la permeabilidad superficial varía significativamente entre configuraciones, siendo los paneles de núcleo de paja los más vulnerables al ingreso de agua (3.9–4.8 ml en 10 minutos en condición natural). La aplicación de mucílago de nopal como hidrofugante redujo la absorción hasta en un 56% en estos paneles, validando el uso de aditivos naturales como estrategia de protección compatible con la filosofía del sistema (ver Fase 05 “Prueba de Karsten” p. 196).

Logros y descripción de los objetivos planteados.

A continuación, se evalúa el grado de cumplimiento de cada objetivo planteado al inicio de la investigación.

El objetivo general: “generar una propuesta de panel prefabricado compuesto a base de tierra cruda y fibras vegetales, optimizado mediante diseño paramétrico para climas cálido-secos en Hermosillo, Sonora”, se cumplió en sus dimensiones conceptuales, técnicas y experimentales. Se desarrolló y evaluó la propuesta en ocho variantes prototípicas (PV-I a PV-VIII), configuradas a partir de dos geometrías de entramado (Voronoi simplificado y Ramificación Opuesta), dos tipos de núcleo (EPS y paja de trigo) y dos condiciones de refuerzo (con y sin malla pollera hexagonal), obteniendo datos cualitativos y cuantitativos sobre su desempeño estructural, térmico, de durabilidad e impacto ambiental.

El primer objetivo específico es “fundamentar el uso de tierra cruda y fibras vegetales mediante análisis técnico y crítico”, mismo que se alcanzó a través del marco teórico y la revisión del estado del arte, que articularon los principios de la bioconstrucción, los sistemas mixtos de



tierra (panel de tierra vertida, bahareque - quinchá prefabricada, *hanok*), las propiedades higrotérmicas y ambientales del material, y los antecedentes de prefabricación existentes. Esta fundamentación permitió desmitificar prejuicios técnicos y culturales asociados al uso de la tierra cruda en contextos contemporáneos.

El segundo objetivo específico: “desarrollar un sistema modular parametrizado” se cumplió mediante la generación de iteraciones paramétricas en *Rhino 7* con *Grasshopper*, la simplificación geométrica de ambos entramados para garantizar viabilidad constructiva y la validación estructural computacional en MATLAB. El proceso evidenció que la parametrización no solo sirve como recurso formal, sino como un instrumento de optimización material y estructural que reduce incertidumbre antes del prototipado físico (Fernández M. , 2020).

El tercer objetivo específico se enfocó en “determinar la capacidad higrotérmica y de durabilidad del sistema”, mismo que se cumplió parcialmente. Las pruebas de soplete, impacto y Karsten aportaron datos sobre el comportamiento térmico transitorio, la resistencia mecánica bajo impactos de caída libre y la permeabilidad superficial con y sin hidrofugante. Sin embargo, se reconoce que, para una caracterización completa, particularmente los valores de resistencia térmica en régimen permanente (valor R normativo) y la resistencia a la compresión y flexión en condiciones estandarizadas, serán necesarios ensayos adicionales en condiciones de laboratorio certificadas, tal como prescribe la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011) y las normativas de referencia consultadas.

Por último, el cuarto objetivo específico busca “contrastar los resultados del diseño frente a estándares constructivos actuales”, este se cumplió mediante el análisis normativo que identificó la alineación del sistema con el CEV (CONAVI, 2017), la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011), la Norma E.080 peruana (ICG, 2017) y la Norma Andina para bahareque encementado (INBAR, 2015), así como con los lineamientos del Plan de Desarrollo Metropolitano de Hermosillo (IMPLAN, 2017). El análisis también visibilizó el vacío normativo existente en México para sistemas prefabricados de tierra cruda, señalando la necesidad de normativas específicas como condición para su escalamiento.



Comprobación de la hipótesis formulada

La hipótesis central de la investigación postulaba que la integración de herramientas de diseño paramétrico y principios biomiméticos en el desarrollo de un panel prefabricado a base de tierra cruda y fibras vegetales permite obtener un sistema constructivo con propiedades higrotérmicas y de durabilidad competitivas respecto a los sistemas convencionales de cerramiento, con un impacto ambiental significativamente menor durante su proceso de fabricación, siendo viable para su aplicación en climas cálido-secos como el de Hermosillo, Sonora.

En cuanto al desempeño higrotérmico, los resultados cualitativos y semicuantitativos obtenidos mediante la prueba de soplete son prometedores, pues, la tierra actúa efectivamente como barrera térmica en condiciones transitorias, pero no permiten aún una comparación directa con los valores normativos exigidos por la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011) para el clima de Hermosillo. Esta comparación requiere ensayos en régimen permanente, lo que constituye una condición para la verificación plena de esta parte de la hipótesis.

En relación con la durabilidad, la hipótesis se verifica de manera condicionada: los paneles con núcleo de EPS y malla de refuerzo presentan una resistencia al impacto adecuada para uso como cerramiento no estructural en energías de hasta 43 J (uso cotidiano), pero la susceptibilidad al agua en los paneles de núcleo de paja sin tratamiento hidrófugo representa una limitación real que debe atenderse para garantizar la competitividad del sistema ante las lluvias torrenciales características del verano sonorense. La aplicación de mucílago de nopal demostró ser una estrategia efectiva y compatible con la filosofía del sistema, reduciendo la absorción en hasta un 56%, aunque su durabilidad a largo plazo ante ciclos de humedecimiento-secado requiere investigación adicional.

Finalmente, respecto al papel del diseño paramétrico y los principios biomiméticos, la hipótesis se confirma: ambas herramientas demostraron ser instrumentos eficaces no solo para la exploración formal, sino para la optimización estructural y la reducción de incertidumbre antes del prototipado físico. El modelo matemático en MATLAB permitió seleccionar la configuración de mejor desempeño (A2: Ramificación Opuesta con malla) antes de fabricar los prototipos, reduciendo el número de iteraciones físicas necesarias



Contraste entre los fundamentos teóricos y los resultados de la investigación

La revisión teórica y el estado del arte establecieron tres premisas que la experimentación permite ahora contrastar con matices importantes.

La primera premisa establece que los sistemas mixtos de tierra (tipo bahareque) son superiores a los sistemas masivos en términos de modulación, versatilidad y compatibilidad con la prefabricación (Astillado Cordero & Vacacela Albuja, 2015), esta, se confirma en el plano formal y constructivo.

El proceso de prototipado evidenció que los entramados aplicados permiten una modulación geométrica compleja que sería inviable en sistemas de tierra masiva, y que la configuración tipo sándwich es perfectamente ejecutable de manera artesanal con materiales de acceso local. No obstante, la evidencia también revela que la traducción del modelo digital al físico introduce complejidades no previstas: la variabilidad dimensional del carrizo en estado verde, la dificultad de adherencia de la mezcla sobre el EPS y la tendencia al pandeo de las estacas durante el secado requieren adaptaciones que alejan al sistema del nivel de precisión geométrica contemplado en el modelo paramétrico.

La segunda premisa indica que el diseño paramétrico y el biomimetismo permiten optimizar la eficiencia estructural de los sistemas constructivos con tierra (Gomma, Jabi, Soebarto, & Xie, 2022) se confirma en el ámbito del modelo computacional, pero con una reserva importante: la geometría optimizada numéricamente no siempre es la más viable constructivamente. Las iteraciones del estudio voronoi evidenciaron que la complejidad geométrica inherente al diagrama original resulta incompatible con la ejecución manual en carrizo, lo que obligó a implementar un proceso de simplificación. Esto no invalida el enfoque paramétrico, pero invita a establecer desde el inicio criterios de viabilidad constructiva como variables de restricción en el algoritmo, tal como advierte Kolarevic (2001).

Por último, la tercera premisa plantea que los materiales base de la bioconstrucción presentan impactos ambientales significativamente menores que los convencionales (González Calderón, 2022; Cabrera et al., 2021) y se confirma de manera general. Sin embargo, el ACV reveló que la introducción de procesos industriales en la cadena de producción, en particular el uso de mezcladora a gasolina puede concentrar hasta el 89% del impacto climático en un solo proceso,



demostrando que la sustentabilidad del sistema depende no solo del material, sino del método de fabricación. Este hallazgo matiza la equivalencia automática entre biomaterial e impacto bajo, introduciendo la gestión energética del proceso productivo como variable crítica de sustentabilidad.

Gernot Minke (2025), cuya obra constituye uno de los pilares teóricos de la investigación, advierte sobre la susceptibilidad de la tierra cruda al agua como su principal patología. Los resultados de la prueba de Karsten confirman esta afirmación con datos empíricos en prototipos desarrollados bajo condiciones específicas de la investigación y validan la recomendación del autor sobre el uso de recubrimientos transpirables y aditivos hidrófugos naturales. El mucílago de nopal, utilizado como hidrofugante, demostró ser una respuesta técnicamente adecuada y culturalmente coherente con el contexto regional.

Limitaciones y condiciones específicas que obstaculizaron la investigación

A lo largo del proceso investigativo se identificaron diversas limitaciones que condicionaron el alcance de los resultados y que deben declararse con transparencia para contextualizar adecuadamente las conclusiones.

La primera limitación de carácter metodológico es la ejecución de los prototipos fuera del contexto climático de Hermosillo, Sonora. Los ocho prototipos PV-I a PV-VIII fueron fabricados y evaluados en la Zona Metropolitana de Guadalajara, con condiciones de humedad relativa (entre 29% y 40%) significativamente mayores a las de Hermosillo en temporada de calor extremo (típicamente inferiores al 20%), y con temperaturas promedio más moderadas. Esta diferencia climática afecta directamente los procesos de secado y curado de la tierra cruda, con implicaciones en la retracción, la formación de grietas y la resistencia final del compuesto, por lo que los valores obtenidos en los ensayos deben interpretarse como datos aproximados que requerirán validación in situ en condiciones reales de la región.

La segunda limitación es de carácter normativo. México carece de un marco regulatorio específico para sistemas constructivos prefabricados de tierra cruda. Esto obligó a utilizar normativas internacionales como la Norma E.080 peruana (ICG, 2017) y la Norma Andina para bahareque encementado (INBAR, 2015) como marcos de referencia analógicos, lo que introduce cierta incertidumbre sobre la aplicabilidad directa de sus criterios al contexto mexicano. En



consecuencia, la validación normativa del sistema propuesto queda pendiente de una regulación específica que actualmente no existe en el país.

La tercera limitación es de escala. Los prototipos fabricados son de baja fidelidad a escala 1:2 (0.61×1.22 m), lo que implica que los resultados de los ensayos, especialmente los de impacto y permeabilidad, no pueden extrapolarse directamente al panel de tamaño real (1.22×2.44 m) sin considerar los efectos de escala sobre la rigidez, la distribución de esfuerzos y el comportamiento del entramado. Esta limitación también aplica al modelo estructural en MATLAB, cuyos parámetros mecánicos del carrizo y la tierra provienen de correlaciones teóricas y literatura especializada, no de ensayos directos sobre las muestras utilizadas.

Una cuarta limitación radica en la ausencia de ensayos de resistencia térmica en régimen permanente, los cuales son los únicos que permiten obtener valores de conductividad térmica (K) y resistencia térmica (R) comparables con los exigidos por la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011) para el clima de Hermosillo. La prueba de soplete, aunque informativa, opera en régimen transitorio y sus resultados no son directamente trasladables a los indicadores normativos de eficiencia energética. Esto limita la posibilidad de afirmar con certeza si el sistema cumple con los requerimientos de la norma sin ensayos adicionales.

Finalmente, el proceso de traducción del modelo digital al constructivo evidenció limitaciones propias del proceso artesanal: la irregularidad dimensional del carrizo en estado blando, los pandeos durante el secado y las dificultades de adherencia de la mezcla sobre el EPS introdujeron variabilidad no controlada entre prototipos que puede afectar la comparabilidad de los resultados entre los ocho paneles evaluados.

Conclusiones adicionales no previstas en los objetivos iniciales.

El proceso investigativo generó hallazgos relevantes que, si bien no estaban contemplados en los objetivos iniciales, enriquecen el conocimiento producido y abren rutas de reflexión complementarias.

El primero de estos hallazgos es la identificación del proceso de mezclado como la variable de mayor impacto ambiental en la cadena de producción del panel. Este resultado, surgido del ACV, invierte la percepción intuitiva de que el material (tierra o fibra) es el factor determinante de la huella de carbono. En este caso, el 89% del impacto climático proviene de la energía consumida



por la mezcladora, no de los materiales. Esto sugiere que la estrategia de reducción de emisiones más efectiva no es necesariamente la sustitución de materiales, sino la transición energética del proceso productivo, lo cual tiene implicaciones directas para el diseño de talleres de prefabricación de tierra en regiones como Sonora, donde la irradiación solar hace viables los sistemas fotovoltaicos.

El segundo hallazgo inesperado concierne al comportamiento del mucílago de nopal como hidrofugante. Si bien su aplicación estaba contemplada en la Fase 05 (p. 97), los resultados de su eficacia diferencial, altamente efectivo en paneles de alta permeabilidad y prácticamente ineficaz en paneles de baja permeabilidad, sugieren que el tratamiento hidrófugo natural no es un complemento universal, sino una estrategia selectiva cuya pertinencia depende de la porosidad específica de cada formulación. Este hallazgo tiene implicaciones prácticas para el mantenimiento del sistema: no todos los paneles requerirán la misma frecuencia ni intensidad de tratamiento, lo que abre la posibilidad de protocolos de mantenimiento diferenciados según el tipo de configuración.

Un tercer hallazgo de carácter constructivo fue la constatación de que el proceso de secado diferencial entre el entramado de carrizo y la mezcla de tierra es una fuente crítica de variabilidad y fisuración no controlada. Cuando el carrizo fue adquirido en estado blando, su posterior deshidratación generó deformaciones que comprometieron la geometría del entramado. Este problema, ausente en las referencias sobre bahareque tradicional, donde el carrizo se seca antes de su uso, revela que la industrialización de este material requiere un protocolo previo de acondicionamiento (secado, preservación y calibrado dimensional) que la investigación no pudo sistematizar completamente. Este hallazgo será determinante para el desarrollo de un manual de fabricación reproducible en futuras líneas de investigación.

Un cuarto hallazgo involucra la percepción del usuario ejecutor. Los resultados de la encuesta estructurada mostraron que, a pesar del escepticismo declarado sobre la resistencia y durabilidad de la tierra cruda, ninguno de los encuestados reportó experiencia directa con sistemas constructivos de este tipo.

Esto sugiere que la barrera de adopción no proviene de experiencias negativas concretas, sino de un imaginario cultural construido a partir de edificaciones de tierra en abandono o deterioro, las cuales, como señala Pimentel (2025), son el resultado de falta de mantenimiento y



no de deficiencias propias del material. Esta distinción es relevante, pues indica que las estrategias de socialización deberán orientarse no tanto a mejorar las características del sistema, sino a transformar el imaginario colectivo mediante casos de éxito documentados y procesos demostrativos en la región.

Aspectos no resueltos en la investigación

Toda investigación de carácter exploratorio e innovador genera, inevitablemente, preguntas que no alcanza a resolver. A continuación, se identifican los aspectos que permanecen abiertos y que deberán ser atendidos en fases posteriores de investigación:

Sistema de anclaje y conexión entre módulos y estructura portante.

Aunque la investigación desarrolló una propuesta conceptual de anclajes basada en los trabajos de Zazu (2021) y Astilludo y Vacacela (2015), este componente no fue prototipado ni evaluado experimentalmente. El sistema de unión entre paneles y entre estos y la estructura receptora (marcos de acero, madera o concreto) es determinante para la viabilidad constructiva del sistema a escala real, y su ausencia representa una limitación significativa para la estandarización del proceso.

Comportamiento del sistema bajo ciclos húmedo-seco prolongados.

Los paneles fueron evaluados en condiciones de laboratorio controladas y no fueron sometidos a ciclos de humedecimiento y secado repetidos, que simulen las condiciones reales del clima de Hermosillo que cuenta con veranos lluviosos y temporadas de extrema sequedad. Este ensayo es fundamental para caracterizar la durabilidad a largo plazo del sistema y su comportamiento ante el envejecimiento acelerado.

Resistencia térmica en régimen permanente.

Como se señaló en el apartado de limitaciones, la caracterización normativa del desempeño energético del panel expresada en los valores K y R exigidos por la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011), queda pendiente. Sin este dato, no es posible certificar el cumplimiento normativo del sistema para uso habitacional en Hermosillo.



Compatibilidad del sistema con estructuras portantes convencionales.

La investigación declaró que la propuesta no posee características autoportantes individuales y requiere de una estructura receptora. Sin embargo, no se desarrollaron propuestas específicas ni se evaluó la compatibilidad mecánica del sistema con marcos de acero ligero, madera o concreto, que son los tipos de estructura más comunes en la región de estudio.

Escalado del proceso de fabricación.

Los prototipos fueron ejecutados a escala artesanal, lo que hace incierto el comportamiento del sistema cuando se replique a escala de producción. La estandarización de la dosificación, los tiempos de curado, el control de calidad del carrizo y la logística del proceso productivo son aspectos que requieren un estudio de ingeniería de producción específico antes de que el sistema pueda considerarse escalable.

Impacto del consumo energético activo en la operación del edificio.

La investigación reconoció desde el planteamiento del problema que el gasto energético en climatización activa es una consecuencia directa de la inadecuación higrotérmica de las envolventes en Hermosillo, pero optó por no abordar esta dimensión en la investigación. Un estudio de simulación energética dinámica que compare el comportamiento operativo de la propuesta frente a sistemas convencionales completaría el argumento de sustentabilidad del sistema a lo largo de su ciclo de vida útil.

Aceptación social y viabilidad económica.

Aunque la encuesta de la Fase 01 (ver **Anexo 1** y p.101) exploró la percepción del usuario ejecutor, no se realizó un análisis de costo-beneficio que compare el precio de producción de la propuesta con el de sistemas equivalentes del mercado, ni se evaluó la disposición a pagar del usuario final. Estos datos son indispensables para evaluar la viabilidad comercial del sistema y diseñar estrategias de mercado adecuadas.

Futuras líneas de investigación

A partir del conocimiento generado y los cabos sueltos identificados, se proponen las siguientes líneas prioritarias de investigación que podrían dar continuidad y profundidad al trabajo aquí desarrollado.



Validación in situ en Hermosillo, Sonora

La línea de investigación más urgente es la fabricación y evaluación de un prototipo a escala real (1.22×2.44 m) en las condiciones climáticas reales de Hermosillo. Esto permitiría validar los datos de desempeño térmico, durabilidad y permeabilidad obtenidos en Guadalajara bajo condiciones de humedad, temperatura y radiación solar representativas del clima cálido-seco. Se recomienda la instalación de un módulo experimental monitorizado durante al menos un ciclo anual completo, con sensores de temperatura, humedad relativa y flujo de calor en ambas caras del panel.

Caracterización normativa del desempeño energético

Se propone la realización de ensayos de conductividad térmica en régimen permanente conforme a la norma NMX-C-307 o equivalente, para obtener los valores K y R que permitan la evaluación comparativa del sistema bajo los parámetros de la NOM-020-ENER-2011. Esta línea de investigación es requisito previo para cualquier proceso de certificación o regulación del sistema.

Desarrollo del sistema de anclaje y conexión

El diseño, prototipado y evaluación experimental de un sistema de unión entre módulos de la propuesta y entre estos y estructuras portantes convencionales es una prioridad para escalar el sistema a aplicaciones reales. Se recomienda explorar sistemas de anclaje mixtos que aprovechen el marco de confinamiento del panel para integrarlo a perfiles de acero ligero (*steel framing*) o marcos de madera laminada, evaluando su resistencia a esfuerzos de corte, tensión y momentos de volteo.

Optimización del proceso de fabricación hacia la industrialización

Una línea de investigación de alta relevancia práctica es el desarrollo de un protocolo de fabricación estandarizado que contemple el acondicionamiento del carrizo (secado, corte y tratamiento con borax), la mezcla mecanizada o manual optimizada, los tiempos y condiciones de curado, el control de calidad de los paneles y la logística de almacenamiento y transporte. Este protocolo debería diseñarse bajo criterios de accesibilidad, permitiendo su ejecución con equipamiento básico y mano de obra con capacitación breve, para maximizar su potencial de transferencia tecnológica a comunidades de la región.



Análisis del ciclo de vida (cradle to grave) y simulación energética dinámica

Una línea futura deberá realizar un análisis de ciclo de vida hasta el fin de su vida útil (*cradle to grave*), evaluando los escenarios de demolición, reutilización o reintegración de los materiales al ciclo natural. Paralelamente, la simulación energética dinámica del panel integrado en una edificación tipo de Hermosillo, comparando el consumo energético operativo frente a sistemas convencionales de tabique o block, completaría el argumento de sustentabilidad del sistema a lo largo de su vida útil completa.

Exploración de fibras vegetales regionales y estabilizantes alternativos

La investigación utilizó paja de trigo como fibra vegetal por su disponibilidad y las referencias bibliográficas disponibles. Sin embargo, en el noroeste de México es posible disponer de fibras vegetales con potencial constructivo significativo que podrían aportar a nuevas iteraciones, como: la fibra del mezquite, la palma soyate o incluso otro tipo de residuos de la industria agrícola regional (fibra de algodón, bagazo de caña) podrían ofrecer propiedades distintas en términos de resistencia, absorción de humedad y compatibilidad con la tierra arcillosa local. De manera análoga, la exploración de estabilizantes naturales regionales, como el extracto de nopal (ya probado como hidrofugante), la baba de agave (de la producción de bacanora) o la ceniza volcánica (obtenida de la reserva de Altar), podría abrir vías de mejora del sistema que profundicen su coherencia ecológica y cultural con el contexto sonorensé.

Propuesta normativa para sistemas constructivos prefabricados de tierra en México

Una de las barreras más estructurales para la adopción de sistemas constructivos de tierra en México es la ausencia de normativa específica. Esta investigación puede sentar las bases para una propuesta de norma técnica mexicana que regule el diseño, la fabricación, el ensayo y la instalación de sistemas prefabricados de tierra cruda, adaptando los criterios de la Norma E.080 peruana (ICG, 2017) y la Norma Andina (INBAR, 2015) al contexto climático y sísmico de México. Esta línea requiere la colaboración entre la academia, el sector productivo y las instituciones de normalización como el ONNCCE.



Reflexión final

La presente investigación demuestra que la distancia entre la tradición y la innovación no es tan grande como el paradigma constructivo dominante sugiere. La tierra cruda, material que durante milenios proveyó refugio y confort en los desiertos del norte de México, contiene propiedades que la ciencia contemporánea comienza a cuantificar y sistematizar con herramientas que sus constructores ancestrales no poseían, pero cuya intuición sí. El bahareque hermosillense, el hanok coreano y la quincha andina no son reliquias del pasado: son prototipos de sistemas híbridos que la modernidad apenas está aprendiendo a formalizar.

La presente propuesta no es un sistema terminado. Es, en rigor, el primer prototipo de una familia de soluciones que requieren iteración, validación y socialización. Pero la evidencia acumulada en esta investigación es suficiente para sostener que el camino es técnicamente viable, ambientalmente pertinente y culturalmente coherente. Afirmar que la tierra cruda no puede competir con el concreto y el acero en el siglo XXI equivale a ignorar que el problema no es el material, sino la falta de investigación, normalización y voluntad política para integrarlo a los procesos constructivos contemporáneos. Esta investigación es un aporte modesto, pero decidido, en esa dirección.





Bibliografía.

- Alzate, J., & Osorio, J. (2014). *Bahareque como ejemplo de sostenibilidad, una herencia que se transforma*. Manizales: Universidad de Manizales.
- Amàco. (12 de 11 de 2024). *Apropos*. Obtenido de Amàco: <https://amaco.org/apropos/>
- Amàco. (13 de Noviembre de 2024). *Mediateca James Baldwin y Maison des Réfugiés // Estudios técnicos y apoyo al constructor para la construcción de muros de tierra vertida no estabilizada*. Obtenido de Amàco: <https://amaco.org/etudes-techniques-pour-la-realisation-des-murs-en-terre-coulee-de-la-mediatheque-jean-quarre-et-la-maison-des-refugies-a-paris/>
- Aranda, Y., & Suárez, E. (2019). La huella de carbono en elementos de arquitectura con tierra. *SIACOT 2019: Conservación sostenible del paisaje: Tierra y Agua*, 22-29.
- Architecture & Urban Research Institute. (10 de 04 de 2025). *Auri National Hanok Center*. Obtenido de https://www.hanokdb.kr/theology_eng/sub_01
- Astilludo Cordero, J., & Vacacela Albuja, N. (2015). Propuesta de paneles estructurales modulares de bahareque prefabricado de madera. *Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra*, 1-15.
- ASTM International. (2017). *Práctica Estándar. Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería*.
- Beaudouin-Lafon, M., & Mackay, W. (2002). Prototyping tools and techniques. *The human-computer interaction handbook*, 1006-1031.
- Bestraten, S., Hormías, E., & Altemir, A. (2010). *Construcción con tierra en el siglo XXI*.
- Binici, H., Aksogan, O., & Shah, T. (2005). Investigation of fibre reinforced mud bricks as a building material. *Construction and Building Materials*, 313-318.
- Blachet, P. (2017). Biomateriales y tecnologías para una nueva arquitectura. *Materia Arquitectura* #15, 82-93.
- Boafo, F., Kim, J.-H., & Kim, J.-T. (2016). *Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways*. Switzerland: Sustainability.



- Buriticá et al. (2022). Estimación de las Emisiones de CO2 de Concretos Modificados con Residuos de Vidrios. *Revista Politécnica*, 52-70.
- Cabrera, S., González, A., & Mingolla, G. (2021). *Construcciones Sostenibles con Tierra. Análisis del Bloque de Tierra Comprimida (BTC)*. Santa Fe, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe.
- Cabrero, R. (2022). *Design Thinking como estrategia de innovación en Arquitectura y Diseño. Experiencia, empatía y usuario*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Cao , X., Li, X., Zhu, Y., & Zhang, Z. (2015). A comparative study of enviromental performance between prefabricated and traditionale residential buildings in China. *Journal of Cleaner Production*, 131-143.
- Carazas , W., & Rivero, A. (2002). *Bahareque. Guía de construcción parasísmica*. Villefontaine Cedex, Francia: CRATerre.
- Carazas, W. (2021). *Construir con bajareque cerén. Experiencias en el contexto de Oaxaca, México*. Ciudad de México: Cooperación Comunitaria.
- Casas Figueroa, L. (2011). *Evaluación de proyectos contruidos con el sistema muros tendinosos*. . Santiago de Cali: Biocasa: Habitat y Desarrollo Sostenible.
- Castillo, A. (19 de Mayo de 2022). *Sostenibilidad en la construcción y en la industria*. Obtenido de GISCI-UPM: <https://blogs.upm.es/gisci/2022/05/19/analisis-del-ciclo-de-vida-acv-una-guia-completa-de-los-acv/>
- Catalán Diez, R. (2017). *Construcción con tierra. Reinterpretación de una tradición*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Cervantes Abarca, A., & Ramírez Alférez, A. (2016). *La Edificación Sustentable (Normatividad en México)*. Ciudad de México: Universidad Autonoma Metropoolitana - Área de Administración y Tecnología para el Diseño.
- CONAVI. (2017). *Código de Edificación de Vivienda*. Ciudad de México: Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.
- CRATerre. (2022). *Terra Education IV. Cambiar de Escala*. Craterre editions.



- FANOSA. (2020). *Bovedilla y Bovedilla Peraltada - Ficha Técnica*. FANOSA.
- Fernández, M. (2020). *Prototipado Rápido en Design Thinking*. Universis de Vigo.
- Fernández, A. (1994). *Vivienda Campesina en México*. Ciudad de México: Secretaría de Turis, SEDESOL, INFONAVIT.
- Fernández-Ordóñez, D., & Fernández Gómez, J. (2009). *Industrialización para la construcción de viviendas. Viviendas asequibles realizadas con prefabricados de hormigón*. Madrid.
- García Ochoa, J., Quito Rodríguez, J., & Perdomo Moreno, J. (2022). *Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Gatti, F. (2012). *Arquitectura y Construcción en Tierra. Estudio Comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Golubchikov, O., & Badyina, A. (2012). *Sustainable Housing for Sustainable Cities: A policy framework for developing countries*. Nairobi: UN-Habitat.
- Gómez Lima, C. (16 de Marzo de 2025). Protestan miles en Hermosillo por altos costos de luz y agua. *La Jornada*, pág. 22.
- Gomez Patrocinio, F. (2021). Técnicas y características de los muros mixtos de tierra y madera. El caso de España. *Informes de la Construcción*, 1-12.
- Gomma, M., Jabi, W., Soebarto, V., & Xie, Y. (2022). Digital manufacturing for earth construction: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 1-30.
- González Calderón, A. (2022). Análisis comparativo de tres sistemas constructivos de tierra. Energía embebida y emisiones de CO₂. 1-15.
- Gunawardena, T., & Mendis, P. (2022). Prefabricated Building Systems - Design and Construction. *Encyclopedia of Engineering*, 70-95.
- Gutiérrez, M., & Arteaga, J. (2021). Caracterización mecánica de mezclas tierra-fibra en sistemas constructivos de bajo impacto ambiental. *Revista Hábitat Sustentable*, 45-58.



- Hooshmand, Z., Tarantino, G., & Danas, K. (2022). Mechanically-grown morphogenesis of Voronoi-type materials: Computer design, 3D-printing and experiments. *Mechanics of Materials*.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth construction a comprehensive guide*. Rugby Practical action .
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth Construction: A comprehensive guide*. ITDG Publishing.
- IAAC. (2017). *TerraPerforma Project*. Recuperado el 15 de 11 de 2024, de Institute for Advanced Architecture of Catalonia: <https://iaac.net/project/terraperforma/>
- ICG. (2017). *Norma E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada*. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- IMNC. (2009). *NMX-SAA-14040-IMNC-2008. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Marco de Referencia*. Ciudad de México: Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C.
- IMNC. (2009). *NMX-SAA-14044-IMNC-2008. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices*. Ciudad de México : Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A. C.
- IMPLAN & CIDUE. (2018). *NTC-PA-2018. Norma técnica complementaria al RCMH que establece las características y requerimientos del proyecto arquitectónico*. Hermosillo: Boletín oficial del Estado de Sonora.
- IMPLAN & CIDUE. (2018). *NTC-PE-2018. Norma Técnica Complementaria al RCMH que establece las características y requerimientos para el diseño y proyecto estructural*. Hermosillo: Boletín Oficial del Estado de Sonora.
- IMPLAN & CIDUE. (2018). *Reglamento de Construcción para el municipio de Hermosillo*. Hermosillo, Sonora: Boletín Oficial del Estado de Sonora.
- IMPLAN. (2017). *Plan de Desarrollo Metropolitano de Hermosillo*. Hermosillo: IMPLAN.



- IMPLAN. (2020). *Paleta Vegetal Hermosillo*. Hermosillo: Instituto Municipal de Planeación Urbana y del Espacio Público de Hermosillo.
- INBAR. (2015). *Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado*. Quito: Red Internacional para el Desarrollo del Bambú y el Ratán.
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- ISO. (1988). *ISO 7892 - Elementos constructivos verticales — Ensayos de resistencia al impacto — Cuerpos de impacto y procedimientos generales de ensayo*. Organización Internacional de Normalización.
- ISO. (2017). *ISO 17025 - Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. Organización Internacional de Normalización.
- Karsten, R. (1997). *Bauchemie für Studium und Praxis*.
- Kaur, M., & Arora, S. (2012). Environment Impact Assessment and Environment Management Studies for an Upcoming Multiplex - A Case Study. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 22-30.
- Knaack, U., Chung-Klatte, S., & Hasselbach, R. (2012). *Prefabricated Systems: Principles of Construction*. Basel: Birkhäuser.
- Kohlhase, J. (2012). The new urban world 2050: perspectives, prospects and problems. *Regional Science Policy and Practice*, 153-166.
- Kolarevic, B. (2001). Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age. *ACADIA*, 268-278.
- Laborel-Preneron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 719-734.
- López Flores, L. (2018). Análisis y evolución de los sistemas constructivos prefabricados, impacto ambiental e interacción con el sistema constructivo tradicional mexicano. *ANALES de Edificación*, 44-51.



- Lorenzo Gállico, P. (2005). *Un techo para vivir. Capítulo 3: Las tecnologías. Tecnologías para viviendas de producción social en América Latina*. Barcelona: UPC.
- Méndez Sáinz, E. (2000). Ciudades y arquitecturas del noroeste mexicano. *Región y sociedad* vol. 12 no.20 .
- Miceli, A. (2015). *Arquitectura sustentable: más que una nueva tendencia, una necesidad*. Argentina: Diseño.
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción en Tierra. La tierra como material de construcción y aplicación en la arquitectura actual*. Fin de Siglo.
- Minke, G. (2025). *Building with Earth. Design and Technology of Sustainable Architecture*. Birkhäuser.
- Molar-Orozco, M., & Huelsz-Lesbros, G. (2017). Comparación del comportamiento térmico de muros de concreto armado y de bloques de concreto huecos. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, vol. 1 no. 22.
- Monjó Carrió, J. (1986). Propuesta de evaluación de sistemas constructivos. *Informes de la construcción*, 5-30.
- Morel, J.-C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C., & Bui, Q.-B. (2021). Earth as construction material in the circular economy context: practitioner perspectives on barriers to overcome. *The Royal Society*.
- Morillón Gálvez, D., & Reséndiz Pacheco, O. (2017). *Materiales y sistemas constructivos utilizados en la vivienda*. La Paz: Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- National Hanok Center. (2017). *Building Hanok. Components & Techniques*. Seoul: Architecture & Urban Research Institute .
- Novas, J. (2010). *Sistemas constructivos prefabricados aplicables a la construcción de edificaciones en países en desarrollo*. Madrid: Universidad Técnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Nowak, A. (2015). Application of Voronoi diagrams in contemporary architecture and town planning. *Civil Engineering, Urban Planning and Architecture*, 30-34.



- Oca, R. (2025). Design Thinking e Innovación Tecnológica a través del Diseño. *Serie Selección de Textos*, 179-187.
- ONNCCE . (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-MATERIALES TERMOAISLANTES- DETERMINACIÓN DE LA ADSORCIÓN DE HUMEDAD Y ABSORCIÓN DE AGUA* . Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2009). *NMX-460-ONNCCE. Valor “R” para las envolventes de vivienda por zona térmica para la República Mexicana - Especificaciones y verificación*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONU. (2018). *La Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible una oportunidad para América Latina y Caribe*. Santiago, Chile: Naciones Unidas.
- Ordoñez, L. (2013). La tierra, un material de construcción sustentable. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 40-47.
- Ortiz Domínguez, M. (s. f.). *El Acero Frente al Cambio Climático y la Transición Energética hacia una Economía Descarbonizada*. Obtenido de Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo: <https://www.uaeh.edu.mx/divulgacion-ciencia/acero-cambio-climatico/index.html#:~:text=Las%20emisiones%20hechas%20por%20la,generan%201.8%20toneladas%20de%20CO2>.
- Peña Barrera, L. (2018). Arquitectura y ciudades del desierto. *Cuadernos Fronterizos*, 19-21.
- Peña Barrera, L., & Chávez Ortiz, G. (2016). *Arquitectura de las Culturas del Desierto*. Ciudad Juárez: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Pimentel, N. (2025). *Manos al Barro*. Santiago: Tierramigo.
- Reddi, S., Jain, A. K., Yun, H.-B., & Reddi, L. N. (2012). Biomimetics of stabilized earth construction: Challenges and opportunities. *Energy and Buildings*, 452-458.
- Robles Cairo, C., & Calderón Aguilera, C. (2022). Arquitectura y Revolución Industrial. *South Florida Journal of Development*, 3546-3566.



- Rubio Picazo, C. (2019). *Bioconstrucción: Parámetros que Configuran una Relectura Contemporánea de la Arquitectura Vernácula*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Sabnis, A., Mysore, P., & Anant, S. (2015). Construction Materials-Embodied Energy Footprint-Global Warming; Interaction. *Singapur: Structural Engineers World Congress*, 1-7.
- Sanz, C. (2019). *Arquitectura homeostática basada en la geometría fractal*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Superior de Arquitectura de Madrid.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2007). *M-MMP-1-07/07. MMP. Métodos de muestro y pruebas de materiales*. Ciudad de México: Gobierno de México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2003). *M-MMP-1-06/03. Métodos de muestros y prueba de materiales*. Ciudad de Mexico: Gobierno de México.
- Secretaría de Economía. (2013). *NMX-AA-164-SCFI-2013 "Edificación sustentable - criterios y requerimientos ambientales mínimos"*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Energía. (2011). *NOM-020-ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones. Envoltantes de edificios para uso habitacional*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Soler, I. (2007). Prototipado Rápido: Un enfoque alternativo para producir arquitectura. *Revista Digital Universitaria*, 1-12.
- Solórzano-Gil, M. (2015). Ciudades creativas y patrimonio cultural: nuevos escenarios para la conservación del patrimonio. 159-179.
- Teng, Y., Li, K., Pan, W., & Ng, T. (2018). Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies. *Building and Environment*, 125-136.
- Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of Plates and Shells (2nd Ed)*. McGraw-Hill.
- Vacacela, N. (2015). *Paneles de bahareque prefabricado y aplicación a una vivienda*. Cuenca: Universidad Estatal de Cuenca.



- Vázquez, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la construcción. Ciudades para un futuro más sostenibles*, 53-66.
- Veliz Reyes, A., Gomaa, M., Jabi, W., & Chatzivasileiadi, A. (2019). Negotiated matter: a robotic exploration of craft-driven innovation. *Architectural Science Review*, 1-11.
- Villanueva Cajide, B., & Casas Cobo, F. (2018). Arquitecturas descuadradas. Hacia una nueva relación geometría-forma en la arquitectura contemporánea. *Constelaciones. Revista de Arquitectura de la Universidad CEU San Pablo*, 17-30.
- Walker, P., & Stace, T. (1997). Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars. *Materials and Structures*, 545-551.
- Wassim, J. (2013). *Parametric Design for architecture*. Laurence King.
- Wieslaw Rokicki, E. (2016). Voronoi diagrams - rod structure research models in architectural and structural optimization. *MAZOWSZE Studia Regionalne nr*, 155-164.
- Yetgin, S., Cavdar, O., & Cavdar, A. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*, 222-227.
- Zamora, F. (2024). *De materiales atemporales a híbridos de alta tecnología: una nueva era en arquitectura y construcción*. Obtenido de Just Crea: <https://justcrea.com/articulos/arquitectura-sustentable/de-materiales-atemporales-a-hibridos-de-alta-tecnologia-una-nueva-era-en-arquitectura-y-construccion>
- Zari, M. (2010). Biomimetic design for climate change adaptation and mitigation. *Architectural science review*, 172-183.
- Zazu Vives, B. (2021). *Innovación en los sistemas mixtos con tierra: Esmeraldas, Ecuador*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- Zhang, M. (2020). The applications of parametric design in green building. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Zuleta Roa, G. (2011). La arquitectura en tierra. Una alternativa para la construcción sostenible. *Habitat Sustentable*, 35-39.





Anexos.

Anexo 1.

Guía de encuesta aplicada a usuarios ejecutores

Preguntas de Investigación	Preguntas del entrevistador.
Perfil/ Identificación ¿Qué tipos de personas que se interesan por la construcción de sistemas prefabricados?	1. ¿Cuál es su ocupación principal? • Arquitecto • Ingeniero Civil • Residente de obra • Maestro de obra 2. ¿Cuántos años de experiencia tiene en la construcción? • 5-10 años • 10-15 años • Más de 15 años 3. ¿Ha trabajado con sistemas constructivos prefabricados? • Sí, tengo experiencia directa en obra • No, pero conozco su funcionamiento • No tengo experiencia ni conocimiento sobre ellos 4. ¿En qué tipo de proyectos ha trabajado con sistemas prefabricados? (seleccione más de una opción) • Vivienda de interés social • Vivienda media-alta • Construcciones comerciales • Infraestructura pública



Experiencia con sistemas prefabricados. Identificar el tipo de sistemas de muros prefabricados con el que el encuestado encuentra mayor afinidad, así como ventajas y desventajas de estos.	• Otro (especificar)_____ 5. ¿Con qué tipo de sistemas de paneles prefabricados ha trabajado? (Seleccione todas las que apliquen) • Paneles de concreto prefabricado • Paneles de fibrocemento • Paneles de poliestireno expandido (EPS) con malla electrosoldada • Paneles de madera estructural • Paneles con relleno de tierra compactada o adobe prefabricado • Otro (especificar) _____ 6. ¿Cuáles considera que son las principales ventajas de los paneles prefabricados? (Seleccione hasta 3 opciones) • Rapidez en la instalación • Reducción de desperdicios en obra • Mayor control de calidad en fabricación • Menor costo de mano de obra • Facilidad de transporte • Mejor aislamiento térmico/acústico • Otro (especificar) _____
--	---



Factores que tomar en cuenta (durabilidad) ¿Cuáles son los factores que se deben de priorizar ante la intemperie y cuántos años de vida se espera de los sistemas prefabricados?	7. ¿Qué tan importante considera la resistencia a la intemperie en un sistema de muros prefabricados? (1 = Nada importante, 5 = Muy importante) • ☐ 1 • ☐ 2 • ☐ 3 • ☐ 4 • ☐ 5 8. En su experiencia, ¿cuáles son los principales factores que afectan la durabilidad de un muro prefabricado? (Seleccione hasta 3 opciones) • Exposición al sol y la lluvia • Humedad y filtraciones • Desgaste por uso y mantenimiento • Tipo de material utilizado • Diseño y ensamblaje del panel 9. ¿Cuánto tiempo de vida útil considera aceptable para un sistema de muros prefabricados? • Menos de 20 años • Entre 20 y 40 años • Más de 40 años
---	---



Operatividad de los sistemas (incluyendo mano de obra) Identificación de mano de obra, herramientas, tipos de conexiones y morfología con las que se tiene una mayor afinidad de parte del grupo encuestado.	10. ¿Qué tipo de mano de obra considera más adecuada para la instalación de un sistema de paneles prefabricados? • Mano de obra especializada con certificaciones • Mano de obra con conocimientos básicos en construcción • Mano de obra general con capacitación breve 11. ¿Qué herramientas cree que serían necesarias para instalar estos paneles? (Seleccione las que considere necesarias) • Solo herramientas manuales (martillo, nivel, taladro, etc.) • Equipo de elevación (grúa, polipastos, etc.) • Equipos de sujeción y fijación especializada 12. ¿Qué tipo de conexiones considera más eficientes para unir los paneles prefabricados en obra? • Ensamblaje con adhesivos o morteros • Uniones mecánicas (pernos, tornillos, conectores metálicos) • Sistemas de machihembrado
---	---



Percepción sobre el uso de tierra cruda en la construcción. ¿Cuál es la factibilidad de uso y que incentivos son necesarios para la aplicación de sistemas con este tipo de material?	• Otro (especificar) _____ 13. ¿Cuál considera que es el tamaño ideal de un panel prefabricado para facilitar su instalación? • Pequeño (1.2m x 2.4m o menos) • Mediano (2.4m x 3m aprox.) • Grande (más de 3m de altura o ancho) • Otro: _____ 14. ¿Cómo evaluaría la facilidad de instalación de los paneles prefabricados en comparación con los sistemas tradicionales? (1 = Mucho más difícil, 5 = Mucho más fácil) • ☐ 1 • ☐ 2 • ☐ 3 • ☐ 4 • ☐ 5 15. ¿Qué tan viable considera el uso de paneles prefabricados de tierra cruda en la construcción? (1 = Nada viable, 5 = Muy viable) • ☐ 1
--	--



	• ☐ 2 • ☐ 3 • ☐ 4 • ☐ 5 16. ¿Qué barreras cree que podrían dificultar la adopción de estos paneles en el mercado? (Seleccione las más relevantes) • Falta de normativas y certificaciones • Dudas sobre su resistencia y durabilidad • Falta de conocimiento y capacitación en su instalación • Preferencia por materiales convencionales 17. ¿Qué incentivos o mejoras podrían facilitar la adopción de estos paneles en el mercado? (Especifique su respuesta)
--	--

Nota: Esta tabla muestra el catálogo de preguntas que serán expuestas al grupo encuestado determinado previamente. Fuente: Elaboración propia.



Anexo 2

Tabla Síntesis: De la empatía a la Definición Técnica.

Categoría	Variable	Origen en triangulación	Hallazgo clave	Parámetro definido (Fase 02)	Tipo de parámetro	Criterio de diseño asociado
Crítica						
Desempeño						
Sostenibilidad						
Operativa						
Diseño						

Nota: Elaboración propia. Esta tabla permita hacer la interpolación de variables detectadas a través de la aplicación de las encuestas estructuradas y los criterios teóricos establecidos en el marco teórico y el estado del arte.



Anexo 3

Modelo matemático aplicado en Fase 03- Evaluación estructural y de viabilidad de entramados.

```

1  %% =====
2  % ANÁLISIS COMPARATIVO - PANEL MIXTO DE TIERRA CRUDA
3  % Sistema A: CON malla pollera hexagonal galvanizada
4  % Sistema B: SIN malla pollera (solo carrizo + tierra + acabado)
5  %
6  % Geometría : ancho = 0.61 m | alto = 1.22 m (posición vertical real)
7  % Suelo : SC - Arena arcillosa (LL=29.6 LP=16.4 IP=13.2)
8  % Mezcla : SC + Paja 1:1 vol | espesor tierra = 3/4" (19.05 mm)
9  % Armado : tierra embebida en estructura de carrizo (Ø 10 mm)
10 % sección compuesta integrada - analogía concreto reforzado
11 % Ubicación : Hermosillo, Sonora
12 % · Zona sísmica C (a_s=0.40g, NTCDS-2020)
13 % · Viento V_d=130 km/h (CFE Viento 2008, Región III)
14 % · T_max=50 °C (factor de retracción térmica amplificado)
15 %
16 % 4 escenarios:
17 % [A1] CON malla - Voronoi simplificado
18 % [A2] CON malla - Ramificación opuesta
19 % [B1] SIN malla - Voronoi simplificado
20 % [B2] SIN malla - Ramificación opuesta
21 %
22 % Autor : <tu nombre>
23 % Fecha : <fecha>
24 % =====
25 clc; clear; close all;
26
27 fprintf('=====\\n')
28 fprintf(' ANÁLISIS COMPARATIVO - PANEL MIXTO TIERRA CRUDA\\n')
29 fprintf(' Hermosillo, Sonora | 0.61 m ancho x 1.22 m alto\\n')
30 fprintf(' CON malla vs. SIN malla pollera hexagonal\\n')
31 fprintf('=====\\n')
32
33 %%
34 % 1. GEOMETRÍA
35 %
36 panel_ancho = 0.61;
37 panel_alto = 1.22;
38 panel_area = panel_ancho * panel_alto;
39 panel_lambda = panel_ancho / panel_alto; % 0.50 - panel esbelto vertical
40
41 % Espesores individuales (m)
42 t_carrizo = 0.0100; % Ø real carrizo = 10 mm
43 t_tierra = (3/4) * 0.0254; % 3/4" = 19.05 mm
44 t_malla = 0.0010; % espesor equivalente malla pollera
45 t_acabado = 0.0050; % capa superficial de acabado
46
47 % Espesores totales según sistema
48 t_tot_cm = t_carrizo + t_tierra + t_malla + t_acabado; % CON malla
49 t_tot_sm = t_carrizo + t_tierra + t_acabado; % SIN malla
50
51 % Parámetros de análisis de placa
52 % a/b = 0.5 → coeficiente Timoshenko α = 0.1106 (tabla, 4 bordes apoyados)
53 alpha_flex = 0.1106;
54 b_ref = panel_alto; % vano de flexión dominante (m)
55 delta_lim = panel_alto / 240; % límite de servicio L/240 (m)
56
57 % Centroides de cada región desde la cara inferior (z = 0)
58 % Orden de capas (inferior a superior):
59 % tierra inferior | núcleo carrizo+tierra | tierra superior | [malla] | acabado
60 z_ti_cm = t_tierra / 4;
61 z_ts_cm = t_tierra * 3/4;

```



```

62 z_nuc_cm = t_tierra/2 + t_carrizo/2;
63 z_mal_cm = t_tierra + t_carrizo + t_malla/2;
64 z_acb_cm = t_tierra + t_carrizo + t_malla + t_acabado/2;
65
66 z_ti_sm = t_tierra / 4;
67 z_ts_sm = t_tierra * 3/4;
68 z_nuc_sm = t_tierra/2 + t_carrizo/2;
69 z_acb_sm = t_tierra + t_carrizo + t_acabado/2;
70
71 % Fracción volumétrica de carrizo en zona núcleo
72 Vf_c = 0.40;
73
74 fprintf('\n--- Geometría ---\n')
75 fprintf(' Ancho           : %.2f m\n', panel_ancho)
76 fprintf(' Alto             : %.2f m\n', panel_alto)
77 fprintf(' Relacion a/b       : %.2f (panel esbelto, flexion en alto)\n', panel_lambda)
78 fprintf(' t_tierra (3/4")    : %.2f mm\n', t_tierra*1e3)
79 fprintf(' t_carrizo          : %.2f mm\n', t_carrizo*1e3)
80 fprintf(' t_malla            : %.2f mm\n', t_malla*1e3)
81 fprintf(' t_acabado          : %.2f mm\n', t_acabado*1e3)
82 fprintf(' t_total CON malla: %.2f mm\n', t_tot_cm*1e3)
83 fprintf(' t_total SIN malla: %.2f mm\n', t_tot_sm*1e3)
84 fprintf(' Limite deflexion : L/240 = %.4f mm\n', delta_lim*1e3)
85
86 %%
87 % 2. GRANULOMETRÍA
88 %
89 IP = 13.2;
90 LL = 29.6;
91 LP = 16.4;
92 Cu = 0.169 / 0.016;
93 Cc = (0.041^2) / (0.016 * 0.169);
94
95 fprintf('\n--- Granulometría SC (laboratorio) ---\n')
96 fprintf(' SUCS: SC (Arena arcillosa) LL=%.1f LP=%.1f IP=%.1f\n', LL, LP, IP)
97 fprintf(' Cu=%.2f Cc=%.2f\n', Cu, Cc)
98
99 %%
100 % 3. TIERRA BASE SC
101 %
102 c_tierra = min(IP * 4e3, 60e3);
103 phi_tierra = 30 - 0.5 * IP;
104 phi_rad = phi_tierra * pi / 180;
105 qu_tierra = 2 * c_tierra * tan(pi/4 + phi_rad/2);
106 E_tierra = 200 * qu_tierra;
107 nu_tierra = 0.30;
108 rho_tierra = 1780;
109
110 % Retracción amplificada por temperatura de Hermosillo
111 eps_ret_base = 0.10 * IP / 100;
112 ft = 1 + 0.012 * 40; % ΔT = 40°C sobre T_ref=10°C
113 eps_ret_SC = eps_ret_base * ft;
114
115 fprintf('\n--- Tierra SC ---\n')
116 fprintf(' c=%.2f kPa phi=%.2f deg qu=%.5f MPa E=%.4f MPa\n', ...
117 c_tierra/1e3, phi_tierra, qu_tierra/1e6, E_tierra/1e6)
118 fprintf(' eps_ret_SC=%.5f (%.3f%%) [ft=%.2f, T_max=50C]\n', ...
119 eps_ret_SC, eps_ret_SC*100, ft)
120
121 %%
122 % 4. COMPUESTO SC + PAJA (1:1 vol)

```



```

123 % -----
124 E_paja      = 4.0e9;
125 sig_t_paja  = 15e6;
126 rho_paja    = 120;
127 nu_paja     = 0.30;
128
129 Vf_paja     = 0.50;
130 Vf_tierra_m = 0.50;
131 eta_o       = 1/3;
132 eta_l       = 0.50;
133
134 E_mez       = eta_o * eta_l * Vf_paja * E_paja + Vf_tierra_m * E_tierra;
135 sig_t_mez   = eta_o * eta_l * Vf_paja * sig_t_paja + Vf_tierra_m * (0.10*qu_tierra);
136 sig_c_mez   = Vf_tierra_m * qu_tierra;
137 rho_mez     = Vf_tierra_m * rho_tierra + Vf_paja * rho_paja;
138 nu_mez      = Vf_tierra_m * nu_tierra + Vf_paja * nu_paja;
139 eps_ret_mez = eps_ret_SC * (1 - Vf_paja * eta_o);
140
141 fprintf('\n--- Compuesto SC+Paja 1:1 -----\n')
142 fprintf(' E_mez=%.4f MPa sig_t=%.6f MPa sig_c=%.6f MPa\n', ...
143         E_mez/1e6, sig_t_mez/1e6, sig_c_mez/1e6)
144 fprintf(' rho=%.1f kg/m3 eps_ret_mez=%.5f (%.3f%%)\n', ...
145         rho_mez, eps_ret_mez, eps_ret_mez*100)
146
147 %% -----
148 % 5. MALLA POLLERA HEXAGONAL GALVANIZADA
149 % -----
150 aber_malla  = 0.025;
151 d_alam      = 0.0008;
152 paso_malla  = aber_malla + d_alam;
153 Vf_acero    = (pi/2) * (d_alam / paso_malla);
154 E_acero     = 200e9;
155 sig_ult_ac  = 350e6;
156 rho_acero   = 7850;
157 eta_hex     = 1/3;
158
159 E_malla     = eta_hex * Vf_acero * E_acero;
160 sig_t_malla = eta_hex * Vf_acero * sig_ult_ac;
161 rho_malla   = Vf_acero * rho_acero;
162
163 % Retracción adicional reducida por la malla
164 n_am        = E_malla / E_mez;
165 rho_am      = t_malla / t_tot_cm;
166 eps_ret_cm  = eps_ret_mez / (1 + n_am * rho_am); % CON malla
167 eps_ret_sm  = eps_ret_mez; % SIN malla (solo paja+carrizo)
168
169 fprintf('\n--- Malla pollera hexagonal -----\n')
170 fprintf(' Vf_acero=%.4f E_malla=%.4f MPa sig_t=%.4f MPa\n', ...
171         Vf_acero, E_malla/1e6, sig_t_malla/1e6)
172 fprintf(' eps_ret CON malla=%.5f SIN malla=%.5f\n', eps_ret_cm, eps_ret_sm)
173
174 %% -----
175 % 6. CARRIZO Y ACABADO
176 % -----
177 E_carr      = 4.5e9;
178 G_carr      = 0.6e9;
179 nu_carr     = 0.30;
180 sig_ult_c   = 60e6;
181 rho_carr    = 700;
182
183 E_acab      = 80e6;

```



```

184 nu_acab      = 0.35;
185 rho_acab     = 1600;
186 tau_adh      = 50e3; % Pa resistencia de adherencia
187
188 %%
189 % 7. CARGAS - HERMOSILLO, SONORA
190 %
191 g_acc = 9.81;
192
193 % Peso propio por unidad de área
194 rho_eq_cm = (rho_mez*t_tierra + rho_carr*t_carrizo + ...
195             rho_malla*t_malla + rho_acab*t_acabado) / t_tot_cm;
196 rho_eq_sm = (rho_mez*t_tierra + rho_carr*t_carrizo + ...
197             rho_acab*t_acabado) / t_tot_sm;
198
199 q_PP_cm = rho_eq_cm * t_tot_cm * g_acc;
200 q_PP_sm = rho_eq_sm * t_tot_sm * g_acc;
201
202 % Viento - CFE Viento 2008, Región III
203 q_din = 0.5 * 1.20 * (130/3.6)^2;
204 q_W = q_din * (0.8 + 0.5);
205
206 % Sismo - Zona C, a_s=0.40g, Q=2 (NTCDS-2020)
207 a_dis = (0.40 * g_acc) / 2.0;
208 q_S_cm = (q_PP_cm / g_acc) * a_dis;
209 q_S_sm = (q_PP_sm / g_acc) * a_dis;
210
211 % Carga lateral de diseño (1.2D + 1.0W + 1.0S)
212 q_cm = 1.2*q_PP_cm + q_W + q_S_cm;
213 q_sm = 1.2*q_PP_sm + q_W + q_S_sm;
214
215 fprintf('\n--- Cargas de diseño (Hermosillo, Sonora) ---\n')
216 fprintf(' q_PP CON malla : %.4f N/m² SIN malla : %.4f N/m²\n', q_PP_cm, q_PP_sm)
217 fprintf(' q_W (viento) : %.4f N/m²\n', q_W)
218 fprintf(' q_S CON malla : %.4f N/m² SIN malla : %.4f N/m²\n', q_S_cm, q_S_sm)
219 fprintf(' q_lat CON malla: %.4f N/m² SIN malla : %.4f N/m²\n', q_cm, q_sm)
220
221 %%
222 % 8. GEOMETRÍAS DE CARRIZO
223 %
224 geo_nombre = {'Voronoi simplificado', 'Ramificacion opuesta'};
225 geo_eta_E = [0.72, 0.65];
226 geo_eta_flex = [0.80, 0.85];
227
228 %%
229 % 9. CÁLCULO INLINE DE LOS 4 ESCENARIOS
230 % Se itera sobre: 2 sistemas (cm/sm) x 2 geometrías = 4 escenarios
231 % Todo el cálculo usa variables locales del workspace principal.
232 %
233 etiquetas = {'A1: CON malla + Voronoi', ...
234             'A2: CON malla + Ramificacion', ...
235             'B1: SIN malla + Voronoi', ...
236             'B2: SIN malla + Ramificacion'};
237
238 % Pre-allocar struct de resultados
239 res = struct('D',0,'yb',0,'delta',0,'delta_lim',0, ...
240             'sig_comp',0,'sig_trac',0,'sig_malla',0,'sig_ret',0, ...
241             'tau_int',0,'N_cr',0,'f1',0,'w_gri',0, ...
242             'FS_flex',0,'FS_tens',0,'FS_malla',NaN,'FS_ret',NaN, ...
243             'FS_adh',0,'FS_pandeo',0);
244 res(4) = res(1);

```



```

245
246 idx = 0;
247 for s = 1:2      % sistema: 1=CON malla, 2=SIN malla
248     for g = 1:2  % geometría: 1=Voronoi, 2=Ramificación
249         idx = idx + 1;
250
251         % — Propiedades efectivas del carrizo —
252         E_c_eff = E_carr * geo_eta_E(g);
253         sig_c_eff = sig_ult_c * geo_eta_flex(g);
254         n_eff = E_c_eff / E_mez;
255
256         % — Seleccionar parámetros según sistema —
257         if s == 1 % CON malla
258             t_tot = t_tot_cm;
259             q_lat = q_cm;
260             q_PP = q_PP_cm;
261             rho_eq = rho_eq_cm;
262             eps_ret = eps_ret_cm;
263             z_ti = z_ti_cm;
264             z_ts = z_ts_cm;
265             z_nuc = z_nuc_cm;
266             z_acb = z_acb_cm;
267             z_mal = z_mal_cm;
268         else % SIN malla
269             t_tot = t_tot_sm;
270             q_lat = q_sm;
271             q_PP = q_PP_sm;
272             rho_eq = rho_eq_sm;
273             eps_ret = eps_ret_sm;
274             z_ti = z_ti_sm;
275             z_ts = z_ts_sm;
276             z_nuc = z_nuc_sm;
277             z_acb = z_acb_sm;
278         end
279
280         % — Áreas transformadas por unidad de ancho —
281         At_ti = t_tierra / 2;
282         At_ts = t_tierra / 2;
283         At_ncar = t_carrizo * Vf_c * n_eff;
284         At_nmat = t_carrizo * (1 - Vf_c);
285         At_acab = t_acabado * (E_acab / E_mez);
286
287         if s == 1 % CON malla
288             At_mal = t_malla * (E_malla / E_mez);
289             sum_Az = At_ti*z_ti + At_ts*z_ts + ...
290                     At_ncar*z_nuc + At_nmat*z_nuc + ...
291                     At_mal*z_mal + At_acab*z_acb;
292             sum_A = At_ti + At_ts + At_ncar + At_nmat + At_mal + At_acab;
293         else % SIN malla
294             sum_Az = At_ti*z_ti + At_ts*z_ts + ...
295                     At_ncar*z_nuc + At_nmat*z_nuc + ...
296                     At_acab*z_acb;
297             sum_A = At_ti + At_ts + At_ncar + At_nmat + At_acab;
298         end
299
300         % — Eje neutro —
301         yb = sum_Az / sum_A;
302
303         % — Momento de inercia transformado (Steiner) —
304         I_tr = ((t_tierra/2)^3/12 + At_ti * (z_ti - yb)^2) + ...
305               ((t_tierra/2)^3/12 + At_ts * (z_ts - yb)^2) + ...

```



```

306         (n_eff*t_carrizo^3*Vf_c/12 + At_ncar*(z_nuc - yb)^2) + ...
307         (t_carrizo^3*(1-Vf_c)/12 + At_nmat*(z_nuc - yb)^2) + ...
308         (t_acabado^3/12 + At_acab*(z_acb - yb)^2);
309
310     if s == 1
311         I_tr = I_tr + (t_malla^3/12 + At_mal*(z_mal - yb)^2);
312     end
313
314     % — Rigidez flexional —
315     D = E_mez * I_tr;
316
317     % — Deflexión máxima —
318     delta = alpha_flex * q_lat * b_ref^4 / D;
319
320     % — Tensiones —
321     M_max = q_lat * b_ref^2 / 8;
322     sig_comp_c = M_max * (t_tot - yb) * E_c_eff / D;
323     sig_trac_t = M_max * yb * E_mez / D;
324     if s == 1
325         sig_mal = M_max * (t_tot - yb) * E_malla / D;
326     else
327         sig_mal = 0;
328     end
329
330     % — Cizalla en interfaz núcleo-tierra —
331     V_max = q_lat * b_ref / 2;
332     Q_carr = At_ncar * abs(z_nuc - yb);
333     tau_int = V_max * Q_carr / I_tr;
334
335     % — Pandeo y frecuencia —
336     N_cr = pi^2 * D / b_ref^2;
337     N_ax = q_PP * panel_alto;
338     m_area = rho_eq * t_tot;
339     f1 = (pi/b_ref)^2 * sqrt(D / m_area) / (2*pi);
340
341     % — Retracción —
342     rho_rc = geo_eta_E(g) * t_carrizo / t_tot;
343     n_carr = E_c_eff / E_mez;
344     w_gri = eps_ret * panel_ancho / (1 + n_carr * rho_rc) * 1e3;
345     sig_ret = E_mez * eps_ret * (1 - rho_rc);
346
347     % — Factores de seguridad —
348     FS_flex = sig_c_eff / sig_comp_c;
349     FS_tens = sig_t_mez / sig_trac_t;
350     FS_adh = tau_adh / tau_int;
351     FS_pandeo = N_cr / (N_ax + 0.5*q_lat*panel_alto);
352     if s == 1
353         FS_malla = sig_t_malla / (sig_mal + eps('double'));
354         FS_ret = NaN;
355     else
356         FS_malla = NaN;
357         FS_ret = sig_t_mez / sig_ret;
358     end
359
360     % — Almacenar —
361     res(idx).D = D;
362     res(idx).yb = yb * 1e3;
363     res(idx).delta = delta * 1e3;
364     res(idx).delta_lim = delta_lim * 1e3;
365     res(idx).sig_comp = sig_comp_c / 1e6;
366     res(idx).sig_trac = sig_trac_t / 1e6;

```



```

367     res(idx).sig_malla = sig_mal / 1e6;
368     res(idx).sig_ret = sig_ret / 1e3;
369     res(idx).tau_int = tau_int / 1e3;
370     res(idx).N_cr = N_cr / 1e3;
371     res(idx).f1 = f1;
372     res(idx).w_gri = w_gri;
373     res(idx).FS_flex = FS_flex;
374     res(idx).FS_tens = FS_tens;
375     res(idx).FS_malla = FS_malla;
376     res(idx).FS_ret = FS_ret;
377     res(idx).FS_adh = FS_adh;
378     res(idx).FS_pandeo = FS_pandeo;
379 end
380 end
381
382 %%
383 % 10. IMPRESIÓN DE RESULTADOS
384 %
385 fprintf('\n=====')
386 fprintf(' RESULTADOS DETALLADOS - 4 ESCENARIOS\n')
387 fprintf('=====')
388
389 for k = 1:4
390     r = res(k);
391     fprintf('\n [%s]\n', etiquetas{k})
392     fprintf('-----\n')
393     fprintf(' Rigidez D : %.6f N·m/m\n', r.D)
394     fprintf(' Eje neutro : %.5f mm (desde cara inferior)\n', r.yb)
395     fprintf(' Deflexion maxima : %.5f mm (limite %.5f mm) ', r.delta, r.delta_lim)
396     if r.delta <= r.delta_lim, fprintf('[OK]\n'); else, fprintf('[EXCEDE]\n'); end
397     fprintf(' sig comp carrizo : %.6f MPa\n', r.sig_comp)
398     fprintf(' sig trac tierra+paja : %.6f MPa\n', r.sig_trac)
399     if k <= 2
400         fprintf(' sig malla pollera : %.6f MPa\n', r.sig_malla)
401     else
402         fprintf(' sig retraccion libre : %.5f kPa\n', r.sig_ret)
403     end
404     fprintf(' Cizalla interfaz : %.5f kPa\n', r.tau_int)
405     fprintf(' N_cr pandeo : %.5f kN/m\n', r.N_cr)
406     fprintf(' Frec. fundamental : %.5f Hz\n', r.f1)
407     fprintf(' Grieta retraccion : %.5f mm ', r.w_gri)
408     if r.w_gri < 0.3, fprintf('[Aceptable]\n')
409     elseif r.w_gri < 0.6, fprintf('[Tolerable]\n')
410     else, fprintf('[Revisar]\n'); end
411     fprintf(' — Factores de seguridad —\n')
412     fprintf(' FS flexion carrizo : %7.3f ', r.FS_flex); fprintf_fs(r.FS_flex)
413     fprintf(' FS traccion tierra : %7.3f ', r.FS_tens); fprintf_fs(r.FS_tens)
414     if k <= 2
415         fprintf(' FS malla pollera : %7.3f ', r.FS_malla); fprintf_fs(r.FS_malla)
416     else
417         fprintf(' FS retraccion lib : %7.3f ', r.FS_ret); fprintf_fs(r.FS_ret)
418     end
419     fprintf(' FS adherencia : %7.3f ', r.FS_adh); fprintf_fs(r.FS_adh)
420     fprintf(' FS pandeo : %7.3f ', r.FS_pandeo); fprintf_fs(r.FS_pandeo)
421 end
422
423 %%
424 % 11. TABLA COMPARATIVA
425 %
426 fprintf('\n=====')
427 fprintf(' TABLA COMPARATIVA\n')

```



```

428 fprintf('=====\n')
429 A1=res(1); A2=res(2); B1=res(3); B2=res(4);
430
431 fmh = ' %-28s %13s %13s %13s %13s\n';
432 fmr = ' %-28s %13.5f %13.5f %13.5f %13.5f\n';
433 fprintf(fmh,'Parametro','A1 CM-Vor','A2 CM-Ram','B1 SM-Vor','B2 SM-Ram')
434 fprintf(' %s\n', repmat('-',1,82))
435 fprintf(fmr,'Rigidez D [N·m/m]', A1.D, A2.D, B1.D, B2.D)
436 fprintf(fmr,'Eje neutro [mm]', A1.yb, A2.yb, B1.yb, B2.yb)
437 fprintf(fmr,'Deflexion max [mm]', A1.delta, A2.delta, B1.delta, B2.delta)
438 fprintf(fmr,'Limite L/240 [mm]', A1.delta_lim,A2.delta_lim,B1.delta_lim,B2.delta_lim)
439 fprintf(fmr,'sig comp carr [MPa]', A1.sig_comp, A2.sig_comp, B1.sig_comp, B2.sig_comp)
440 fprintf(fmr,'sig trac tierra [MPa]', A1.sig_trac, A2.sig_trac, B1.sig_trac, B2.sig_trac)
441 fprintf(fmr,'Cizalla [kPa]', A1.tau_int, A2.tau_int, B1.tau_int, B2.tau_int)
442 fprintf(fmr,'N_cr pandeo [kN/m]', A1.N_cr, A2.N_cr, B1.N_cr, B2.N_cr)
443 fprintf(fmr,'Frec. fund [Hz]', A1.f1, A2.f1, B1.f1, B2.f1)
444 fprintf(fmr,'Grieta retrac [mm]', A1.w_gri, A2.w_gri, B1.w_gri, B2.w_gri)
445 fprintf(' %s\n', repmat('-',1,82))
446 fprintf(fmr,'FS flexion carrizo', A1.FS_flex, A2.FS_flex, B1.FS_flex, B2.FS_flex)
447 fprintf(fmr,'FS traccion tierra', A1.FS_tens, A2.FS_tens, B1.FS_tens, B2.FS_tens)
448 fprintf(fmr,'FS adherencia', A1.FS_adh, A2.FS_adh, B1.FS_adh, B2.FS_adh)
449 fprintf(fmr,'FS pandeo', A1.FS_pandeo,A2.FS_pandeo,B1.FS_pandeo,B2.FS_pandeo)
450 fprintf(' %-28s %13.5f %13.5f %13.5f %13s %13s\n', ...
451 'FS malla pollera',A1.FS_malla,A2.FS_malla,'N/A','N/A')
452 fprintf(' %-28s %13s %13s %13.5f %13.5f\n', ...
453 'FS retraccion libre','N/A','N/A',B1.FS_ret,B2.FS_ret)
454
455 %%
456 % 12. INCREMENTO POR MALLA (A vs B, misma geometría)
457 %
458 fprintf('\n— Beneficio cuantitativo de la malla pollera —\n')
459 pares = {A1,B1,'Voronoi'; A2,B2,'Ramificacion'};
460 for k = 1:2
461 cm = pares(k,1); sm = pares(k,2);
462 fprintf('\n %s:\n', pares(k,3))
463 fprintf(' D rigidez : %+.2f%%\n', (cm.D /sm.D -1)*100)
464 fprintf(' Deflexion : %+.2f%%\n', (cm.delta /sm.delta -1)*100)
465 fprintf(' FS flexion : %+.2f%%\n', (cm.FS_flex /sm.FS_flex -1)*100)
466 fprintf(' FS traccion : %+.2f%%\n', (cm.FS_tens /sm.FS_tens -1)*100)
467 fprintf(' FS pandeo : %+.2f%%\n', (cm.FS_pandeo/sm.FS_pandeo-1)*100)
468 fprintf(' Grieta retrac : %+.2f%%\n', (cm.w_gri /sm.w_gri -1)*100)
469 end
470
471 %%
472 % 13. GRÁFICAS COMPARATIVAS
473 %
474 col = [0.80 0.45 0.05; % A1 CON malla Voronoi
475 0.50 0.25 0.02; % A2 CON malla Ramificacion
476 0.15 0.57 0.42; % B1 SIN malla Voronoi
477 0.05 0.32 0.22]; % B2 SIN malla Ramificacion
478
479 etiq_c = {'CM-Vor','CM-Ram','SM-Vor','SM-Ram'};
480
481 v = @(campo) [res(1).(campo), res(2).(campo), res(3).(campo), res(4).(campo)];
482
483 function bplot(vals, col, xlab, ylbl, ttl, lim_val, lim_lbl)
484 b = bar(vals, 'FaceColor', 'flat');
485 for k = 1:4, b.CData(k,:) = col(k,:); end
486 set(gca, 'XTickLabel', xlab, 'FontSize', 9)
487 ylabel(ylbl); title(ttl); grid on
488 if nargin == 7 && ~isnan(lim_val)

```



```

489     ylabel(lim_val, 'r--', 'LineWidth', 1.5, 'Label', lim_lbl)
490 end
491 end
492
493 figure('Name','Comparativo Panel Tierra Cruda - Hermosillo', ...
494       'Color','w','Position',[40 30 1350 800])
495 tiledlayout(2,4,'TileSpacing','compact','Padding','compact')
496
497 nexttile; bplot(v('D'), col, etiq_c, 'N·m/m', 'Rigidez D', NaN, '')
498 nexttile; bplot(v('delta'), col, etiq_c, 'mm', 'Deflexion max lateral', res(1).delta_lim,
499 'L/240')
500 nexttile; bplot(v('sig_comp'),col,etiq_c, 'MPa', 'Tension comp. carrizo', NaN, '')
501 nexttile; bplot(v('sig_trac'),col,etiq_c, 'MPa', 'Tension trac. tierra', sig_t_mez/1e6,
502 '\sigma_t lim')
503 nexttile; bplot(v('N_cr'), col, etiq_c, 'kN/m', 'Carga critica pandeo', NaN, '')
504 nexttile; bplot(v('f1'), col, etiq_c, 'Hz', 'Frecuencia fundamental', 1.0,
505 'f_{sis}~1Hz')
506 nexttile; bplot(v('w_gri'), col, etiq_c, 'mm', 'Grieta retraccion', 0.3, '0.3 mm')
507
508 nexttile
509 FS_mat = [v('FS_flex'); v('FS_tens'); v('FS_adh'); v('FS_pandeo')];
510 bFS = bar(FS_mat);
511 for k=1:4, bFS(k).FaceColor = col(k,:); end
512 hold on
513 ylabel(2.0, 'b:', 'LineWidth', 1.0, 'Label', 'FS=2.0')
514 ylabel(1.5, 'r--', 'LineWidth', 1.5, 'Label', 'FS=1.5 min')
515 set(gca, 'XTickLabel', {'Flex', 'Trac', 'Adh', 'Pandeo'}, 'FontSize', 9)
516 legend(etiq_c, 'Location', 'northeast', 'FontSize', 8)
517 ylabel('FS'); title('Factores de seguridad'); grid on
518
519 lp = gobjects(4,1);
520 for k=1:4, lp(k) = patch(NaN,NaN,col(k,:)); end
521 legend(lp, {'CON malla - Voronoi', 'CON malla - Ramificacion', ...
522 'SIN malla - Voronoi', 'SIN malla - Ramificacion'}, ...
523 'Orientation', 'horizontal', 'Position', [0.06 0.005 0.88 0.025])
524
525 sgtitle(['Panel tierra cruda | 0.61 m × 1.22 m vertical | ' ...
526 'Hermosillo Sonora | SC+Paja 1:1 | t_{tierra}=3/4" | ' ...
527 'Ø carrizo=10 mm | V=130 km/h | a_s=0.40g'], ...
528 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
529
530 % -----
531 % 14. OBSERVACIONES AUTOMÁTICAS
532 % -----
533 fprintf('\n=====')
534 fprintf(' OBSERVACIONES AUTOMÁTICAS\n')
535 fprintf('=====')
536 for k = 1:4
537     r = res(k);
538     fprintf('\n [%s]\n', etiquetas{k})
539     n_alertas = 0;
540     if r.delta > r.delta_lim
541         fprintf(' [!] Deflexion %.5f mm > limite %.5f mm\n', r.delta, r.delta_lim)
542         n_alertas = n_alertas + 1;
543     end
544     if r.FS_flex < 1.5
545         fprintf(' [!] FS_flex=%.3f - carrizo al limite en compresion\n', r.FS_flex)
546         n_alertas = n_alertas + 1;
547     end
548     if r.FS_tens < 1.5
549         fprintf(' [!] FS_tens=%.3f - zona traccion critica\n', r.FS_tens)

```



```

547     n_alertas = n_alertas + 1;
548 end
549 if ~isnan(r.FS_ret) && r.FS_ret < 1.5
550     fprintf('  [!] FS_ret=%.3f - retraccion libre supera resistencia SC+Paja\n', r.FS_ret)
551     fprintf('      Accion: curado humedo >7 dias o reducir relacion agua/tierra\n')
552     n_alertas = n_alertas + 1;
553 end
554 if r.FS_adh < 1.5
555     fprintf('  [!] FS_adh=%.3f - adherencia tierra-acabado insuficiente\n', r.FS_adh)
556     n_alertas = n_alertas + 1;
557 end
558 if r.FS_pandeo < 1.5
559     fprintf('  [!] FS_pandeo=%.3f - riesgo de pandeo fuera de plano\n', r.FS_pandeo)
560     n_alertas = n_alertas + 1;
561 end
562 if r.w_gri >= 0.3
563     fprintf('  [!] Grieta=%.5f mm >= 0.3 mm - monitorear fisuración\n', r.w_gri)
564     n_alertas = n_alertas + 1;
565 end
566 if n_alertas == 0
567     fprintf('  [OK] Todos los criterios de estabilidad satisfechos.\n')
568 end
569 end
570
571 %%
572 % FUNCIÓN AUXILIAR - Semáforo FS
573 %
574 function fprintf_fs(FS)
575     if isnan(FS),           fprintf('[N/A]\n')
576     elseif FS >= 2.0,       fprintf('[SEGURO]\n')
577     elseif FS >= 1.5,       fprintf('[ACEPTABLE]\n')
578     elseif FS >= 1.0,       fprintf('[LIMITE - revisar]\n')
579     else,                   fprintf('[FALLA - rediseñar]\n')
580     end
581 end
582
583 function plot(vals, col, xlab, ylbl, ttl, lim_val, lim_lbl)
584     b = bar(vals, 'FaceColor', 'flat');
585     for k = 1:4, b.CData(k,:) = col(k,:); end
586     set(gca, 'XTickLabel', xlab, 'FontSize', 9)
587     ylabel(ylbl); title(ttl); grid on
588     if nargin == 7 && ~isnan(lim_val)
589         yline(lim_val, 'r--', 'LineWidth', 1.5, 'Label', lim_lbl)
590     end
591 end
592

```

Nota: Modelo matemático realizado en base a los aprendizajes de la materia: “Diseño estructural con materiales alternativos” cursado en el periodo de otoño 2025. Se utilizó un modelo matemático base para ser ejecutado y optimizado con Claude.AI.



