

HABITAR LA MEMORIA:

ARQUITECTURA RURAL CAMPESINA COMO REFUGIO FRENTE AL CLIMA.

ARQ. CARLOS ANDRÉS CANTILLO RENGIFO

ARQ. LAURA VALENTINA QUICENO PIEDRAHITA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI

FACULTAD DE CREACIÓN Y HÁBITAT

MAESTRÍA EN HÁBITAT SUSTENTABLE

CALI

2025-2

Contenido

1. Abstract:.....	3
2. Introducción.....	3
3. Planteamiento del problema.....	4
4. Pregunta problema.....	6
5. Objetivo general.....	6
6. Objetivos específicos.....	6
7. Marco teórico.....	7
8. Marco referencial.....	12
La Casa Minga Solar Decathlon LAC 2019.....	12
Casa en el Carrizal / Daniel Moreno + Sebastián Calero.....	13
Reformulación del proyecto estándar de CRESOL CENTRAL en términos de desempeño térmico para la Zona Bioclimática 2 de Santa Catarina, Brasil.....	14
8.1 Diagnostico bioclimático Riosucio Caldas.....	15
Informe climático de Manizales Caldas.....	16
Definición de confort.....	28
Requerimientos de climatización.....	28
Estrategias de climatización pasiva.....	28
Tácticas de bioclimatización recomendadas.....	31
9. Estado del arte.....	34
10. Metodología y herramientas.....	37
Fase I. Observación etnoarquitectónica y levantamiento arquitectónico:.....	41
Fase II. Medición in situ de variables micro climáticas.....	42
Fase III. Simulación y análisis.....	45
Ventilación calculada.....	46
Fase IV: Modelado geométrico y definición del entorno climático.....	48
Configuración de materiales y sistemas constructivos.....	49
Configuración de la actividad interna y cargas internas.....	51
11. Resultados.....	53
11.1 Resultados de las simulaciones en Desingbuilder.....	55
12. Propuesta de diseño.....	61
13. Discusiones.....	85
14. Conclusiones.....	87
15. Bibliografía.....	90

1. Abstract:

El presente proyecto de investigación aborda la integración de las características arquitectónicas de la vivienda rural campesina en la vereda Miraflores, municipio de Riosucio (Caldas, Colombia), en el diseño bioclimático contemporáneo. Este proyecto se centra en el análisis de los elementos tectónicos tradicionales con el propósito de mejorar las condiciones de confort térmico en el hábitat rural. A partir de una revisión en campo de las características bioclimáticas, morfológicas, espaciales y materiales de las viviendas, se estudian las soluciones arquitectónicas que tradicionalmente han respondido a las particularidades climáticas y ambientales de dicho territorio. La investigación integra criterios contemporáneos de arquitectura bioclimática y eficiencia energética para evaluar el desempeño térmico de los materiales y sistemas constructivos tradicionales, por medio de simulaciones en programas como DesignBuilder y Energyplus. Como resultado, se espera desarrollar un modelo de vivienda rural campesina que contribuya simultáneamente a satisfacer las necesidades habitacionales y agrícolas de la comunidad, para promover la recuperación de los saberes constructivos tradicionales a la par de garantizar el confort térmico de sus habitantes.

Palabras clave: vivienda rural campesina, diseño bioclimático, materiales vernáculos, confort térmico.

2. Introducción

La vivienda rural campesina se configura como un sistema integral donde convergen la cultura, la naturaleza y el territorio. Su morfología, sus materiales y sus técnicas constructivas responden a un proceso histórico de adaptación a las condiciones geográficas, climáticas y agrícolas que existen en el campo. Estos saberes vernáculos, compartidos a través de generaciones, constituyen no solo un patrimonio técnico y cultural, sino también un modelo empírico de arquitectura bioclimática. En este contexto, la presente investigación se centra en el análisis y evaluación del desempeño térmico de los elementos tectónicos tradicionales, para ser adaptados a las exigencias actuales de confort térmico de los habitantes y el contexto climático.

Para la obtención de la información a evaluar, se crea una metodología y se usan herramientas de recolección de información. En este sentido, la etnoarquitectura permite centrar la investigación y análisis en el objeto construido en su contexto. El punto de partida es la selección de 12 casas de la Vereda Miraflores, cuya particularidad es la relación con un

práctica agrícola, como el sembrado de café. Con visitas de campo, se recolectan datos cualitativos por medio de la observación directa y fichas técnicas. Se contemplan como ejes cualitativos de observación: *el uso, la función y el símbolo*, aspectos fundamentales para comprender cómo se adapta la vivienda rural al entorno cultural y natural.

Dentro del eje cuantitativo, se realizan mediciones de las variables climáticas más relevantes para la investigación (humedad relativa, temperatura interior, temperatura superficial interior y exterior) en tres momentos del día durante un periodo de dos semanas, con el fin de construir una base de datos climatológicos sobre el comportamiento de la vivienda en determinadas horas del día y la percepción de confort del usuario. Se evalúa y estudia la información climática obtenida y se analiza en paralelo con la información de la percepción térmica del usuario.

Con la información obtenida en campo, se realizan una serie de simulaciones en programas como DesignBuilder y Energyplus de las viviendas rurales seleccionadas, para conocer el comportamiento térmico original de la vivienda rural y las horas en confort de cada una de ellas, lo cual permitirá visualizar las necesidades en términos de confort térmico.

Finalmente, se propone un modelo de vivienda rural que, desde su orientación, forma y uso de materiales con un desempeño térmico óptimo, responda a las necesidades de confort y habitar de los habitantes. Esta investigación busca exponer la pertinencia del análisis del desempeño térmico durante la etapa de diseño de viviendas rurales.

3. Planteamiento del problema

A lo largo del último siglo, Colombia ha experimentado una transformación estructural profunda en la distribución de su población, caracterizada por una disminución sostenida de la población rural y un acelerado proceso de urbanización. Los censos históricos evidencian que la proporción de población rural pasó de 85,6 % en 1918 a 68,1 % en 1938 y 60,7 % en 1951, de acuerdo con la definición de cabecera y resto adoptada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE (DANE, s. f.). Esta tendencia descendente se ha mantenido de manera consistente hasta la actualidad, de tal forma que para 2025 las estimaciones oficiales de Naciones Unidas sitúan la población rural en torno al 17,6 %, confirmando una transición sostenida hacia la urbanización (United Nations, 2022), magnitudes que resultan coherentes con las series del Banco Mundial, las cuales reportan valores cercanos al 18 % de ruralidad en 2023 (World Bank, n. d.). En conjunto, estos datos ponen de manifiesto una reducción marcada

y persistente de las comunidades rurales, asociada a procesos de migración interna, expansión de las cabeceras urbanas y reconfiguración de las actividades productivas, lo que ha generado impactos significativos sobre las dinámicas territoriales y las condiciones habitacionales rurales.

Por su parte, el cambio climático está transformando profundamente las condiciones de confort y habitabilidad en el mundo. El incremento de las temperaturas, la alteración de los regímenes de humedad y la variabilidad térmica diaria plantean nuevos retos para la arquitectura, particularmente para aquella que depende de estrategias pasivas de climatización. Como advierten Triana et al. (2020), los estándares internacionales de confort térmico, tales como la ASHRAE 55 y la ISO 7730, fueron formulados con base en contextos climáticos templados y edificaciones climatizadas mecánicamente; por ello, resultan insuficientes para caracterizar el confort en entornos tropicales donde la percepción térmica y los mecanismos de adaptación humana difieren sustancialmente. En consecuencia, es necesario replantear los modelos de confort térmico en el trópico, reconociendo que las estrategias pasivas tradicionalmente consideradas eficientes podrían dejar de serlo frente al aumento sostenido de las temperaturas.

En este escenario, la vivienda rural campesina constituye un caso de análisis y, a la vez, una oportunidad para la investigación bioclimática rural. Estas viviendas, históricamente concebidas desde el conocimiento empírico y el vínculo con el territorio, han empleado elementos tectónicos tradicionales como muros en bahareque, en adobe, estructuras en madera y guadua, cubiertas de teja de barro, etc que, además de ser hábitats son capaces de expresar una identidad cultural. En lugares como Miraflores (Riosucio, Caldas), se ve una oportunidad para analizar y evaluar el desempeño térmico de los sistemas constructivos tradicionales, por medio de simulaciones en programas contemporáneos como DesignBuilder y Energyplus, con el fin de caracterizar el desempeño térmico de las viviendas rurales y a examinar las condiciones que inciden en el confort de sus habitantes.

El reto actual de la investigación en hábitat rural campesino radica en la integración controlada de innovación y tradición. En este marco, diversos autores (Rojas & Altamirano, 2023; Soto-Chahua et al., 2025) han señalado la existencia de vacíos en la comprensión integral del confort térmico en entornos rurales de clima tropical. Si bien dichos estudios han documentado la incidencia de factores como la materialidad, la orientación espacial y las condiciones de ventilación en el desempeño térmico de las edificaciones, aún se identifican

limitaciones en la integración de dimensiones socioculturales y adaptativas asociadas a las percepciones y prácticas cotidianas de los habitantes rurales. Esta situación abre un campo de análisis que permite examinar el confort térmico no solo desde el rendimiento físico de la envolvente, sino también desde las formas locales de habitar el territorio.

Por tanto, el problema central se radica en la ausencia de un marco teórico y metodológico que articule la tradición constructiva con los nuevos criterios de confort adaptativo y contexto climático. Discutir los estándares de confort en el trópico implica reconocer que las condiciones futuras del clima exigirán viviendas capaces de autorregular su comportamiento térmico mediante una combinación inteligente de estrategias pasivas, materiales locales y decisiones espaciales coherentes con la cultura del habitar campesino.

De este contexto se deriva la necesidad de investigar cómo integrar los elementos tectónicos tradicionales en el diseño espacial y bioclimático de la vivienda rural campesina, de modo que no solo se restituya su capacidad de confort térmico, sino que se fortalezca su resiliencia frente a las transformaciones climáticas y socioculturales del territorio.

4. Pregunta problema

¿Cómo integrar los elementos tectónicos tradicionales en el diseño espacial y bioclimático para mejorar el confort térmico de los habitantes en los espacios de la vivienda rural campesina en Miraflores (Riosucio, Caldas)?

5. Objetivo general

1. Diseñar un modelo de vivienda rural campesina a partir del análisis del desempeño térmico de los elementos tectónicos tradicionales para mejorar el confort térmico de sus habitantes.

6. Objetivos específicos

1. Caracterizar la función, uso y símbolo que integran la vivienda rural campesina para diseñar un modelo de vivienda rural coherente con el contexto cultural.

2. Analizar el desempeño térmico de los elementos tectónicos y espaciales tradicionales que componen la vivienda rural campesina para mejorar el confort térmico de sus habitantes.

3. Examinar las condiciones que inciden en el confort térmico de los habitantes de la vivienda rural para determinar estrategias arquitectónicas bioclimáticas en el modelo de vivienda rural.

7. Marco teórico

El confort térmico, entendido como la condición de equilibrio entre el ser humano y su entorno térmico, ha sido objeto de estudio desde diversas perspectivas científicas y proyectuales. Su comprensión ha evolucionado desde enfoques adaptativos tomando en cuenta la adaptabilidad fisiológica de las personas y ecológicos que integran las dimensiones culturales, materiales y espaciales del habitar. En el contexto de la arquitectura rural campesina, donde el clima, la tectónica y la vida cotidiana se entrelazan de manera inseparable, esta evolución teórica ofrece un marco de referencia esencial para formular estrategias de diseño bioclimático basadas en la integración de los elementos tradicionales de construcción.

Las teorías de Fanger (1970), Givoni (1969), Olgyay (1963), Humphreys y Nicol (1998), y Herrera-Limones et al. (2019) configuran una línea de desarrollo conceptual que permite comprender el confort térmico como un fenómeno multidimensional: físico, perceptual y cultural. Estas perspectivas, en conjunto, sustentan el principio de que la arquitectura debe responder simultáneamente a las condiciones ambientales y a las identidades locales, proponiendo una síntesis entre la racionalidad técnica y la sabiduría vernácula.

La obra de Victor Olgyay (1963), *Design with Climate*, constituye el punto de partida del pensamiento bioclimático contemporáneo. Su propuesta introduce la adecuación del diseño al entorno climático, geográfico y cultural, estableciendo que la forma arquitectónica debe surgir del diálogo entre el ambiente natural y las necesidades humanas. Olgyay sistematizó una metodología que integra las variables climáticas (temperatura, humedad, radiación solar y viento) para identificar requerimientos de climatización en el diseño.

Para Olgyay, el edificio no es un objeto aislado, sino un organismo termodinámico capaz de interactuar con el medio. Esta visión resulta particularmente pertinente para la

arquitectura rural campesina, en la que la tectónica tradicionales muros de tierra, cubiertas de teja, estructuras de madera funciona como mediación energética entre el interior habitable y el clima exterior. Su obra reafirma que la sostenibilidad no radica únicamente en la tecnología, sino en la coherencia morfológica entre el edificio, su clima y su cultura, principio fundamental para revalorizar la vivienda campesina como arquitectura regionalmente adaptada.

El modelo desarrollado por Poul O. Fanger (1970) aportó la base científica y normativa para el estudio del confort térmico en la ingeniería ambiental. Fanger propuso los índices PMV (Predicted Mean Vote) y PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), que cuantifican la percepción térmica promedio de un grupo de personas en función de variables físicas y fisiológicas. Su modelo definió el confort como una condición de neutralidad térmica, en la que el cuerpo humano no requiere activar mecanismos de termorregulación.

Este enfoque analítico permitió estandarizar el confort térmico en normas internacionales como la ASHRAE 55 y la ISO 7730, hoy vigentes en la evaluación ambiental de edificaciones. Sin embargo, su aplicación en contextos rurales y naturalmente ventilados requiere una lectura crítica. La vivienda rural campesina, al depender de la ventilación cruzada, la masa térmica y las prácticas cotidianas, no responde a condiciones de laboratorio. Por tanto, el modelo de Fanger se constituye más en una referencia comparativa que en un marco absoluto. Como se mencionará más adelante, Humphreys y Nicol (1998) con su forma de evaluar el confort térmico, involucran al habitante y a las acciones que el realiza como parte fundamental para estar en confort.

Baruch Givoni (1969), en su obra *Man, Climate and Architecture*, estableció la relación directa entre las condiciones climáticas y las decisiones de diseño. Mediante el desarrollo del *diagrama psicrométrico y de estrategias bioclimáticas*, Givoni transformó el análisis climático en un instrumento proyectual. Su enfoque concibe al edificio como un sistema regulador del microclima interior, en el cual la orientación, la masa térmica, el sombreado y la ventilación constituyen variables de control térmico.

Givoni vincula la climatología con la morfología del edificio, señalando que el confort puede lograrse mediante estrategias pasivas como la inercia térmica, la ventilación natural y la protección solar, sin recurrir necesariamente a sistemas activos. Este enfoque es directamente aplicable a la arquitectura rural campesina, donde las soluciones constructivas empíricas como muros gruesos, cubiertas ventiladas y patios se acercan con los principios bioclimáticos que él

formalizó. Su aporte permite analizar en paralelo las estrategias pasivas con las respuestas que los habitantes dan al contexto específico donde se implantan, en este caso de investigación el área rural de Miraflores.

El modelo adaptativo desarrollado por Humphreys y Nicol (1998) representa un cambio epistemológico fundamental al reconocer que el confort térmico no depende exclusivamente de las condiciones físicas del ambiente, sino también de las experiencias, hábitos y comportamientos adaptativos de los usuarios. Su teoría se basa en la observación empírica de que las personas modifican su entorno hacen acciones como abrir las ventanas, ajustar la ropa, variar su actividad para alcanzar un equilibrio térmico subjetivo.

Desde esta perspectiva, el confort no es un estado fijo, sino un proceso adaptativo entre el cuerpo humano, el clima y el espacio. Este paradigma resulta especialmente relevante para la vivienda rural campesina, donde el uso del espacio es flexible y estacional: los corredores se activan en horas de calor, las cocinas funcionan como núcleos térmicos, y las habitaciones se reorganizan según los ciclos agrícolas. La teoría adaptativa legitima, por tanto, las formas vernáculas de habitar como modelos bioclimáticos en sí mismos, ajustados a las condiciones ambientales y culturales locales.

Asimismo, su influencia ha sido reconocida en las versiones recientes de la ASHRAE Standard 55, la cual incorpora el modelo adaptativo de confort térmico como método oficial para edificaciones naturalmente ventiladas. Dicho modelo establece que la temperatura operativa de confort ($T_{op,conf}$) puede expresarse como una función lineal de la temperatura media exterior (T_{rm}), de acuerdo con la siguiente relación:

$$T_{op,conf} = 0.31 T_{rm} + 17.8$$

donde T_{rm} corresponde a la temperatura media exterior ponderada en el tiempo. Este enfoque valida científicamente los procesos de adaptación térmica de los usuarios y respalda, desde un marco normativo, los principios empíricos del habitar rural, caracterizados por estrategias pasivas y una relación directa entre el clima exterior y el ambiente interior.

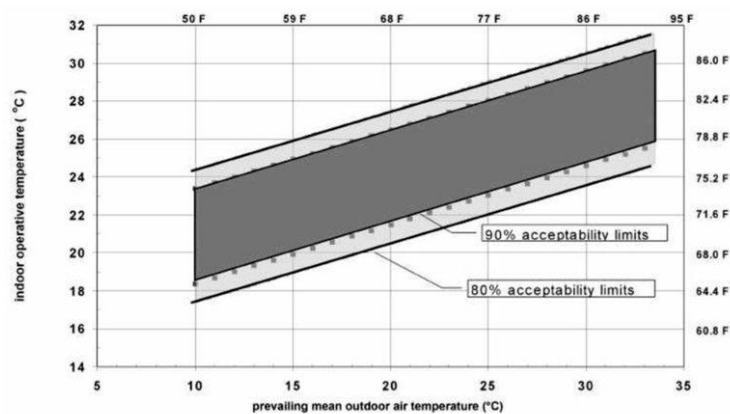


Ilustración 1: Gráfico del modelo adaptativo existente según norma ASHRAE: 55

De acuerdo con el modelo de confort térmico adaptativo establecido en la ASHRAE Standard 55, la temperatura de neutralidad para el lugar de estudio se determinó en 23,4 °C, valor que representa la condición térmica en la cual la mayoría de los ocupantes no manifiestan preferencia por ambientes más cálidos o más fríos. A partir de esta temperatura de referencia y considerando un nivel de aceptabilidad del 80 %, se define un rango de confort térmico comprendido entre 19,9 °C y 26,9 °C, el cual delimita las condiciones operativas aceptables para edificaciones naturalmente ventiladas. Este intervalo resulta fundamental para la interpretación de los resultados de simulación térmica, ya que permite evaluar la capacidad de los sistemas constructivos y de la configuración arquitectónica para mantener la temperatura operativa interior dentro de márgenes compatibles con el confort adaptativo, reconociendo la influencia del clima local y los procesos de adaptación fisiológica y conductual de los usuarios, tal como lo plantean De Dear y Brager (1998).

En este sentido, la proximidad de las temperaturas interiores simuladas a la temperatura de neutralidad y su permanencia dentro del rango definido constituyen indicadores clave del desempeño bioclimático de las viviendas analizadas.

El recorrido teórico que trazan Olgyay, Fanger, Givoni, Humphreys y Nicol permite comprender que el confort térmico en arquitectura no puede reducirse a una variable técnica, sino que constituye un fenómeno integral donde confluyen ciencia, diseño y cultura. Mientras Olgyay establece la relación fundante entre arquitectura y clima, Fanger cuantifica el equilibrio térmico fisiológico, Givoni traduce el clima en forma arquitectónica y Humphreys y Nicol revelan la dimensión adaptativa del usuario.

En la arquitectura rural campesina, estos aportes confluyen en un principio esencial: la integración de los elementos tectónicos tradicionales con estrategias bioclimáticas (entorno físico) y la adaptabilidad del usuario (experiencia) con llevan a mejorar el confort térmico. Este marco teórico, por tanto, sustenta el desarrollo de modelos de vivienda campesina que no solo responden al clima de Miraflores (Riosucio, Caldas), sino que promuevan un diseño en armonía con las condiciones ambientales del territorio y las prácticas culturales del habitar campesino.

Por otra parte, encontramos que el municipio de Riosucio, Caldas en sus políticas de vivienda rural en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), en su componente rural: 2.1 Zonas homogéneas-Zona rural, mencionan brevemente la normativa que se tiene para las viviendas rurales y sus parámetros de construcción.

1. *Área privada no inferior a 3.000 m² y máximo una (1) edificación.*
2. *Área máxima de ocupación: 300 m²*
3. *Número máximo de pisos permitidos: dos (2) pisos y altillo (30 % del área de la planta baja).*
4. *Aislamientos laterales mínimos entre construcciones: 25 m.*

A pesar de reconocer la importancia del suelo rural, sus componentes sociales, económicos, ambientales y condiciones físicas como la red hidrográfica, geología, geomorfología, calidad del suelo y usos actuales del suelo, el componente rural del PBOT de Riosucio, Caldas, evidencia una notable debilidad normativa en relación con la construcción de viviendas rurales. Si bien se establecen parámetros generales como el área mínima del lote, los aislamientos y la altura permitida de las edificaciones, existe una ausencia de lineamientos técnicos específicos que orienten adecuadamente el diseño. Por ejemplo, no se mencionan los sistemas constructivos tradicionales o el uso de materiales locales. No se promueve activamente el aprovechamiento de recursos naturales como la guadua, la tierra o la madera, materiales que históricamente han estado siempre en el lugar. La norma se limita a establecer restricciones sobre el área y la densidad, sin considerar los efectos que tienen los sistemas constructivos en el confort térmico y la sostenibilidad de la vivienda en el suelo rural.

El Ministerio de Vivienda de Colombia ha desarrollado múltiples programas que buscan involucrar a las comunidades rurales en el diseño de soluciones habitacionales, bajo un concepto de vivienda digna, segura, saludable y sostenible, procurando mantener la identidad de la población rural, reconociendo la importancia de adaptar las soluciones habitacionales a

las condiciones específicas de cada territorio. Sin embargo, investigaciones como la de Mandrini et al. (2018) señalan que la intervención estatal sigue aplicando modelos urbanos a contextos rurales que, entre otras cosas, no tienen presente las condiciones climáticas y tradiciones constructivas de cada región. Artículos como el publicado por *El Colombiano* (2024) reflejan la situación actual de la vivienda rural colombiana, donde "uno de los problemas es que se sigue llegando al campo con viviendas que no responden a las necesidades culturales, geográficas y climáticas de esas poblaciones" (*El Colombiano*, 2024, párr. 5). Es necesario que estos programas y, en general, la normativa colombiana comprenda que cada territorio está conformado por una comunidad auténtica con modos de vida diferentes que hacen de la ruralidad tan diversa.

Por lo tanto, se evidencia la necesidad de dedicar estudios al análisis de los elementos tectónicos tradicionales de las comunidades rurales, para diseñar viviendas capaces de responder a un contexto climático específico sin alterar ni modificar la identidad cultural de sus habitantes.

8. Marco referencial

Los referentes fueron elegidos por su diseño bioclimático, el uso de la teoría y la medición en campo de las variables climatológicas con el fin de sustentar y argumentar las decisiones arquitectónicas para resolver los problemas de confort y sostenibilidad. Aspectos que se tomarán en consideración para el desarrollo del modelo de vivienda rural campesina.

La Casa Minga Solar Decathlon LAC 2019.

La Casa Minga es un prototipo de vivienda con condiciones de confort climático adecuadas, mínimo consumo energético e incorporación de energías renovables. Es un referente para el uso híbrido de estrategias pasivas y activas para alcanzar una vivienda con alto desempeño y confort térmico para los usuarios. Una vivienda que aborda el cambio climático de forma realista, anticipando escenarios futuros de aumento de temperatura y humedad, idea que es de gran utilidad para el planteamiento del modelo de vivienda rural campesina.

La Casa Minga incorpora el análisis de las variables climáticas como la temperatura, la humedad, los vientos, el asoleamiento, la radiación como parte fundamental en el diseño arquitectónico. Es de resaltar que no existe la dicotomía "pasivo vs activo"; combina lo más

importante de ambas estrategias, uso de ventilación natural, sombreado, aislamiento térmico, junto con aire acondicionado controlado y ventiladores eficientes.

En las estrategias pasivas, en la implantación, los volúmenes están orientados estratégicamente para protección solar y ventilación cruzada. Para una mayor protección solar, la estructura se comporta como una envolvente principal que actúa como cubierta sombreante. En la ventilación natural, las ventanas se ubican opuestas en cada habitación, lo que permite ventilación cruzada; se añaden persianas móviles en cada habitación, lo que permite al usuario regular el aire y la entrada de luz natural. Se resalta la efectividad en el uso de las estrategias pasivas utilizadas en la arquitectura, decisiones que se tomarán como referente en el diseño del modelo de vivienda rural.

Con relación a los materiales, usaron materiales con baja energía incorporada y disponibilidad en la zona. Investigaron técnicas constructivas tradicionales que se caracterizan por el uso de la madera como material principal. La envolvente está pensada formando muros compuestos; por una parte, la cara de madera logra un autosombreado en la cara exterior y una cámara de aire en el centro del muro. En las caras interiores de las tablas de madera fue colocada una barrera radiante de aluminio, material con el cual están compuestos estos empaques de Tetra Brik®, lo que funcionó como barrera térmica para las habitaciones, debido a su baja emisividad.

Por estas innovaciones, uso adecuado de las estrategias bioclimáticas y el apoyo con simulaciones, la Minga House es un referente que demuestra la posibilidad de construir viviendas asequibles, sostenibles y culturalmente pertinentes con un enfoque adaptable al cambio climático.

Casa en el Carrizal / Daniel Moreno + Sebastián Calero

La Casa en el Carrizal constituye un ejemplo significativo de arquitectura bioclimática adaptada al contexto rural de Carrizal, Ecuador. Desde su concepción, el proyecto prioriza el respeto por el entorno natural y la reutilización inteligente de recursos, lo cual se evidencia en la incorporación de materiales recuperados, como columnas de eucalipto, cajas de almacenamiento y duelas de chanul provenientes del Museo Interactivo de Ciencias. Este enfoque no solo reduce el impacto ambiental asociado a la extracción de nuevos materiales, sino que además pone en valor la economía circular dentro del ámbito constructivo.

Por otra parte, la estructura de la vivienda fue concebida para trabajar con tierra en altura, integrando piso, pared y cubierta en una lógica continua y coherente. Con esta estrategia se logra un alto nivel de aislamiento térmico natural, lo cual aporta al confort de sus usuarios. Se resalta este método constructivo, ya que responde a saberes tradicionales de edificación con tierra, demostrando que el conocimiento tradicional puede reinterpretarse de manera adecuada en la arquitectura contemporánea.

Otro aspecto clave del proyecto es la participación activa de la comunidad a través de mingas, en las cuales clientes, arquitectos y vecinos colaboraron en el proceso de construcción. Lo que permitió optimizar los recursos humanos y económicos, fortaleciendo el vínculo entre arquitectura, cultura y territorio.

En conjunto, todas estas decisiones de diseño, desde el uso de materiales locales hasta el uso de estrategias bioclimáticas, constituyen un modelo de vivienda rural pensada para dar confort, responder eficientemente al clima de la región y promover la sostenibilidad ambiental y cultural. Esta casa es un referente para el modelo de vivienda rural, por el uso de saberes constructivos tradicionales, materiales y estrategias que en conjunto mejoran el confort y aportan a una construcción más sostenible.

Reformulación del proyecto estándar de CRESOL CENTRAL en términos de desempeño térmico para la Zona Bioclimática 2 de Santa Catarina, Brasil.

Este proyecto de vivienda agrícola campesina ha sido desarrollado específicamente para el clima de Frei Rogério, en conformidad con las directrices de la norma NBR 15220-3, correspondiente a la Zona Bioclimática 2. A través del análisis de datos climáticos locales y el uso de cartas bioclimáticas, se definieron estrategias de diseño pasivo adaptadas al contexto.

Entre las estrategias pasivas adoptadas se destaca la ventilación cruzada natural, lograda mediante el adecuado dimensionamiento y ubicación de las aberturas de la vivienda, permitiendo una eficiente renovación del aire interior. Asimismo, se utilizó alta inercia térmica a través de materiales de gran masa, como la mampostería, que contribuyen a retener calor durante el invierno y mitigar el sobrecalentamiento en verano. El diseño arquitectónico también incorpora protecciones solares que reducen la ganancia térmica y permiten el aprovechamiento solar en invierno. Además, se valoró el uso tradicional del fogón a leña como una fuente interna de calor, especialmente útil en la estación fría.

Para validar el desempeño térmico del proyecto, se realizaron simulaciones computacionales utilizando el software EnergyPlus, considerando todo el año (8.760 horas). Se evaluaron diferentes escenarios que incluyen variaciones en el tipo de cubierta (fibrocemento vs. teja de barro), la presencia o ausencia de aislamiento térmico, el uso del fogón a leña y distintos grados de apertura de ventanas. Estas simulaciones permitieron comparar un caso base con la propuesta y cuantificar su eficiencia energética, aspecto a tomar en cuenta para esta investigación.

El confort térmico fue evaluado con base en la temperatura operativa, según los criterios establecidos por la norma ISO 7730:2005. A partir de esta evaluación, se calculó el número de grados-hora fuera del rango de confort, lo que permitió una valoración objetiva del desempeño térmico del proyecto. Metodología que se pretende implementar en el desarrollo de la investigación con el fin de valorar objetivamente el desempeño térmico del modelo actual y compararlo con el modelo propuesto.

El diseño también contempla la flexibilidad constructiva, permitiendo ampliaciones progresivas sin comprometer el desempeño térmico original. Para estas futuras intervenciones, se propone el uso de técnicas de bioconstrucción, que favorecen la sostenibilidad y reducen el impacto ambiental. Estas estrategias reflejan un enfoque integral hacia la sostenibilidad, donde la arquitectura se adapta al clima y al contexto local.

Este es un referente clave dentro del uso de simulaciones computacionales y softwares, ya que se podrán evaluar las condiciones del modelo actual y la propuesta de vivienda rural. De esta manera, se podrá comparar y cuantificar su eficiencia energética, el confort térmico y demás variables que dan lugar a una arquitectura confortable y sostenible.

8.1 Diagnostico bioclimático Riosucio Caldas

El diagnóstico bioclimático desarrollado en el presente informe se fundamenta en el uso del programa Bioclimarq, una herramienta de análisis diseñada para la evaluación climática aplicada a la arquitectura, desarrollada por Gómez-Azpetia (2023). Este instrumento, estructurado en formato de hoja de cálculo, permite sistematizar variables climáticas relevantes como temperatura del aire, humedad relativa y condiciones de confort térmico y relacionarlas con criterios de diseño pasivo, en coherencia con los principios de la arquitectura bioclimática y los enfoques de confort adaptativo reconocidos por la norma ASHRAE 55.

Informe climático de Manizales Caldas

La ciudad de Manizales, capital del departamento de Caldas, se localiza en la cordillera Central de los Andes colombianos, a una altitud aproximada de 2.150 m s. n. m., lo que determina un clima templado–frío de montaña, con fuerte influencia orográfica, alta nubosidad y variabilidad térmica diaria moderada. Se ha usado el EPW y la información climática de Manizales por la cercanía y menor diferencia en altitud que Riosucio Caldas, este con una altitud aproximada de 1,800 m s. n. m.

Localización																			
Nombre del lugar	Manizales Caldas																		
Latitud	5	°	3	'	"	5,1	°												
Longitud	75	°	29	'	"	75,5	°												
Zona horaria (UTC)							Huso horario	0,0											
Altitud	2160												msnm						
Población de la ciudad	454												habitantes						
Ubicación del lote en la ciudad							Uso de horario de verano												
En el centro de la ciudad <input type="radio"/>							Meses con horario de verano												
Entre el centro y la periferia <input type="radio"/>							Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
En la periferia o localidad rururbana <input type="radio"/>							<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Normales Climatológicas																			
	Meses												Anual	Unidad					
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic							
Temperatura máxima promedio	23,7	22,6	25,0	23,0	23,0	22,2	22,8	25,3	22,8	22,1	23,0	23,0	23,2	°C					
Temperatura mínima promedio	8,1	9,4	8,7	10,1	9,8	9,4	8,6	7,2	8,5	8,8	9,0	6,2	8,7	°C					
Humedad relativa máxima promedio*	99	100	100	100	100	100	99	99	100	100	98	100	99,6	%					
Humedad relativa mínima promedio*	49	51	47	53	53	50	60	44	49	52	51	50	50,8	%					
Humedad relativa media*	83,5	85,2	82,3	84,8	87,5	88,8	86,4	80,7	84,6	87,5	86,1	84,2	85,1	%					
Precipitación pluvial total	128,0	142,1	162,8	232,2	234,6	191,4	161,6	172,4	209,4	247,8	238,1	172,1	2293	mm					
Radación media s/p. horizontal*														W/m ² día					
Brillo solar efectivo*														horas-mes					
Velocidad media de viento	1,5	1,1	2,2	1,5	1,2	1,1	1,1	1,6	1,2	1,0	1,0	1,6	1,3	m/s					

Ilustración 2. Datos de referencia de localización.

Temperaturas horarias

El mes más cálido corresponde a agosto, con una temperatura máxima promedio de 25,3 °C, seguido muy de cerca por marzo, que registra 25,0 °C. Estos valores representan los picos térmicos anuales del sitio de estudio. En un segundo nivel se ubican meses como enero, abril, mayo, noviembre y diciembre, con temperaturas máximas promedio cercanas a 23,0–23,7 °C, lo que confirma un comportamiento térmico relativamente estable y una baja amplitud térmica anual.

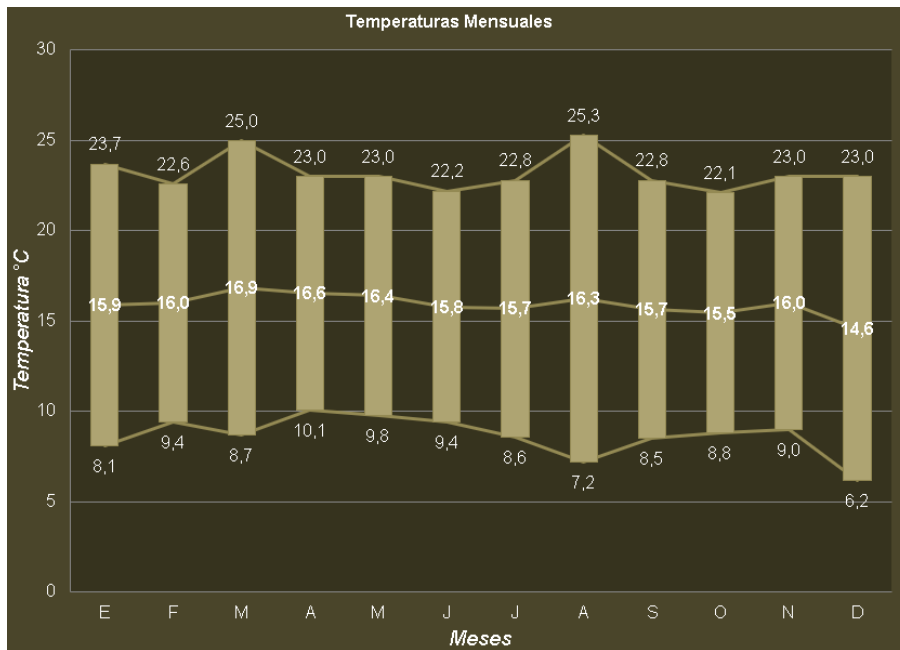


Ilustración 3. Tabla de temperaturas mensuales.



Ilustración 4. Tabla de oscilación de temperaturas mensuales.

Desde una perspectiva bioclimática, estos patrones mensuales de oscilación térmica son determinantes para la selección de estrategias pasivas, especialmente el uso de masa térmica, control de ganancias solares y regulación de la ventilación natural, en coherencia con los criterios del modelo adaptativo de la ASHRAE 55.

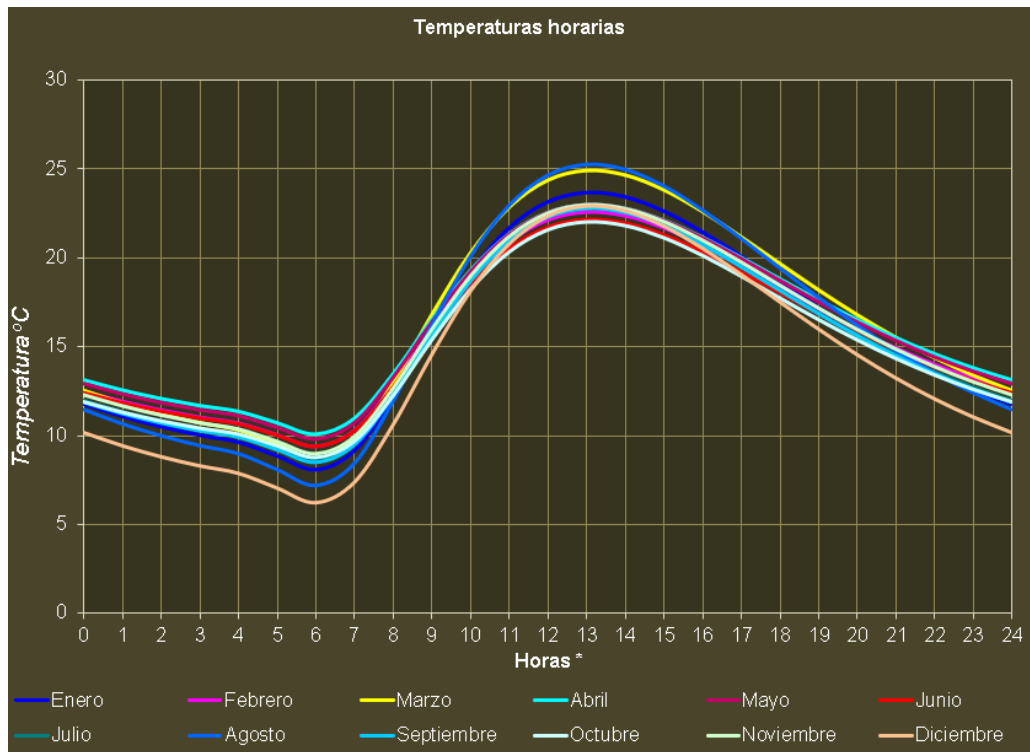


Ilustración 5. Tabla de oscilación de temperaturas mensuales.

Desde la perspectiva de la física de la edificación, estas curvas horarias permiten identificar los periodos críticos de ganancia y pérdida de calor, información clave para el dimensionamiento de elementos de masa térmica, la gestión de la ventilación natural y el control solar. Asimismo, el análisis se alinea con los criterios del modelo adaptativo de la **ASHRAE 55**, al evidenciar la variabilidad diaria de las condiciones térmicas y la importancia de la adaptación del usuario en edificaciones naturalmente ventiladas.

El diagrama de isotermas permite visualizar de manera integrada la distribución temporal de la temperatura del aire a lo largo del día y del año. Se observa que las temperaturas más bajas se concentran de forma sistemática durante las horas nocturnas y de madrugada (aproximadamente entre las 0:00 y 7:00 h), con predominio de rangos térmicos inferiores a 10 °C, especialmente en los meses de junio, julio y agosto, lo que indica condiciones potenciales de discomfort por frío. En contraste, las temperaturas más elevadas se registran de manera consistente entre las 11:00 y 16:00 h, donde predominan isotermas asociadas a rangos de 20 a 25 °C, alcanzando valores puntuales cercanos a 25–30 °C en meses como marzo y agosto, coincidiendo con los periodos de mayor carga térmica diaria.

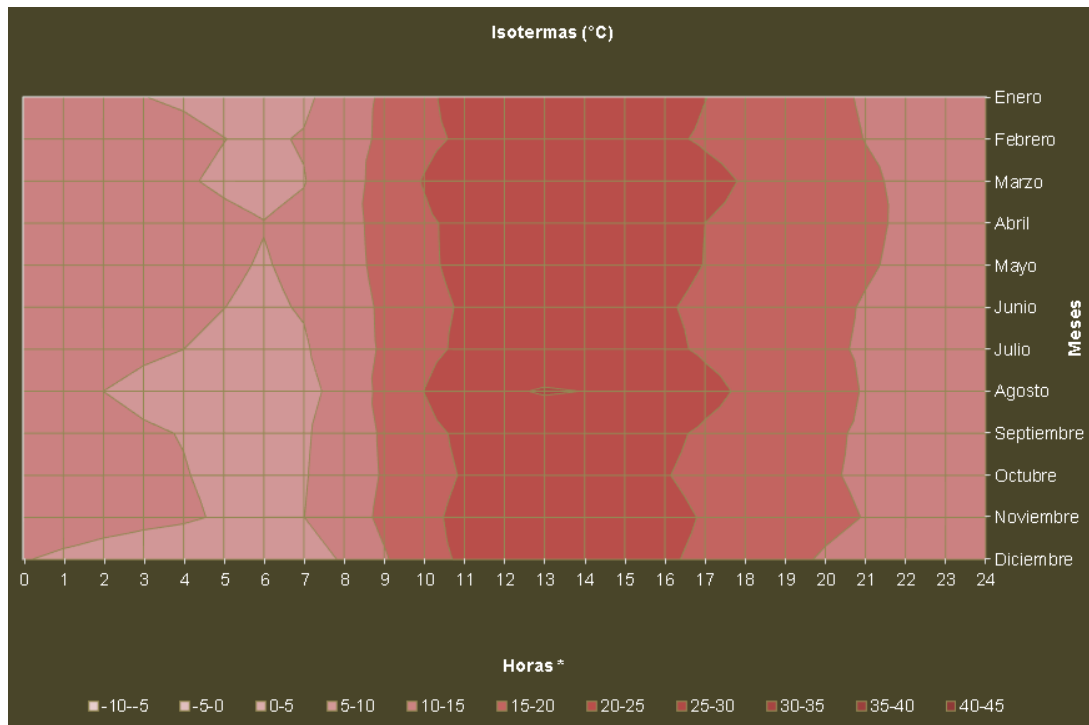


Ilustración 6. Tabla de isotermas

Humedades horarias

El comportamiento de la humedad relativa a lo largo del año evidencia condiciones atmosféricas persistentemente húmedas, con valores máximos mensuales cercanos al **100 %** en prácticamente todos los meses, lo que indica una alta frecuencia de saturación del aire, especialmente durante las horas nocturnas y de madrugada.

Desde la perspectiva del confort térmico, la combinación de temperaturas moderadas con altos niveles de humedad relativa puede intensificar la sensación de desconfort térmico al limitar la capacidad de disipación de calor por evaporación. En este sentido, el análisis mensual de la humedad relativa resulta determinante para la definición de estrategias pasivas orientadas al control higrotérmico, tales como la ventilación natural cruzada, la selección de materiales con capacidad higroscópica y el adecuado control de infiltraciones, en coherencia con los criterios del modelo adaptativo de la ASHRAE 55.

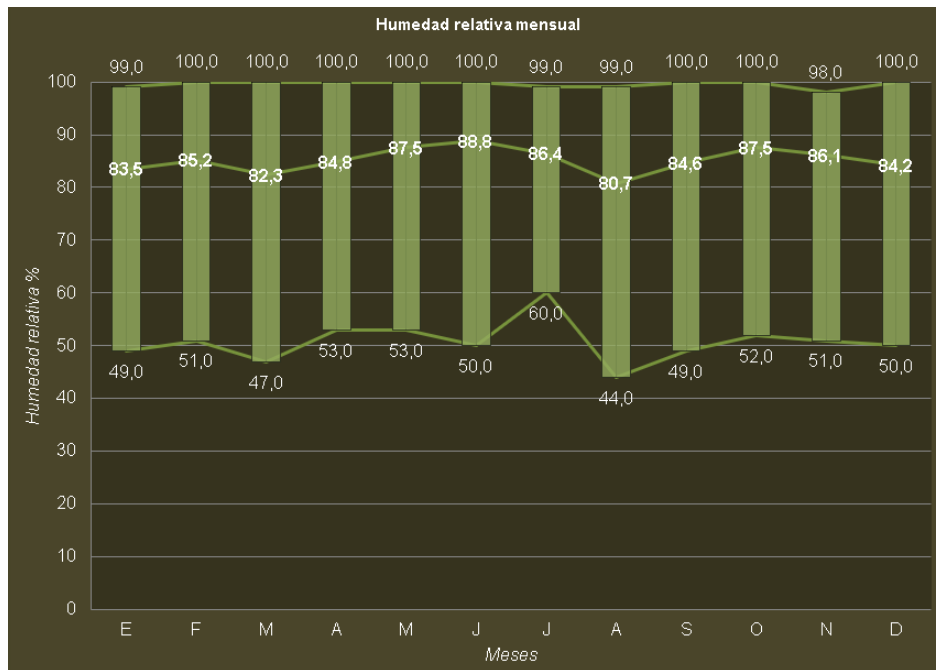


Ilustración 7. Humedad relativa mensual.

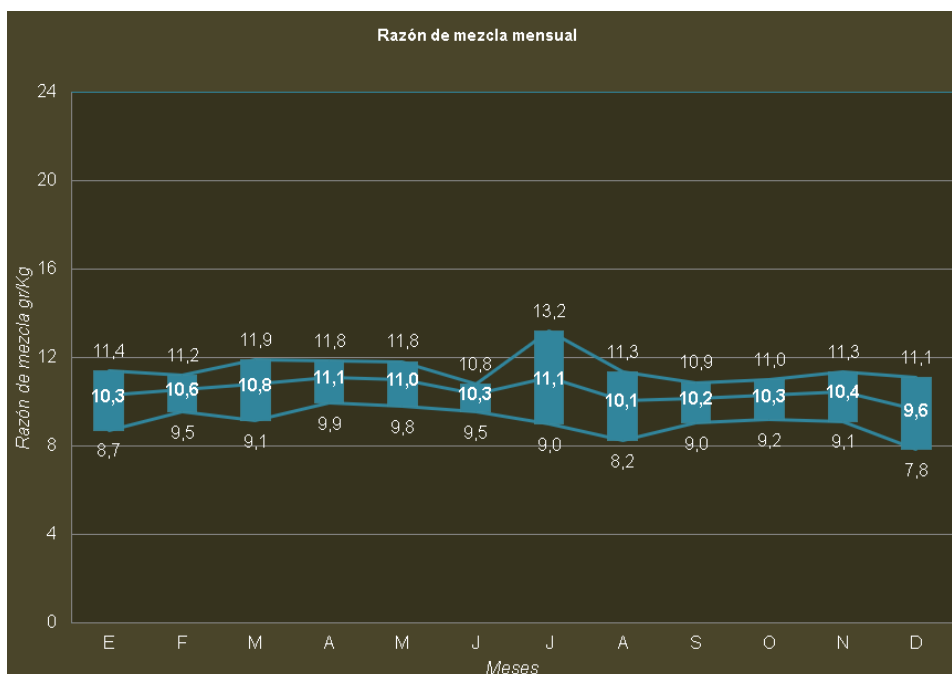


Ilustración 8. Humedad relativa mensual.

En cuanto a la razón de mezcla, los valores más altos se registran en abril, mayo y julio, con 11,1 g/kg, 11,0 g/kg y 11,1 g/kg respectivamente, lo que muestra una mayor cantidad de vapor de agua en el aire durante estos meses, y el valor más bajo se destaca en diciembre con 9,6 g/kg, lo que sugiere que puede mejorarse con estrategias de ventilación.

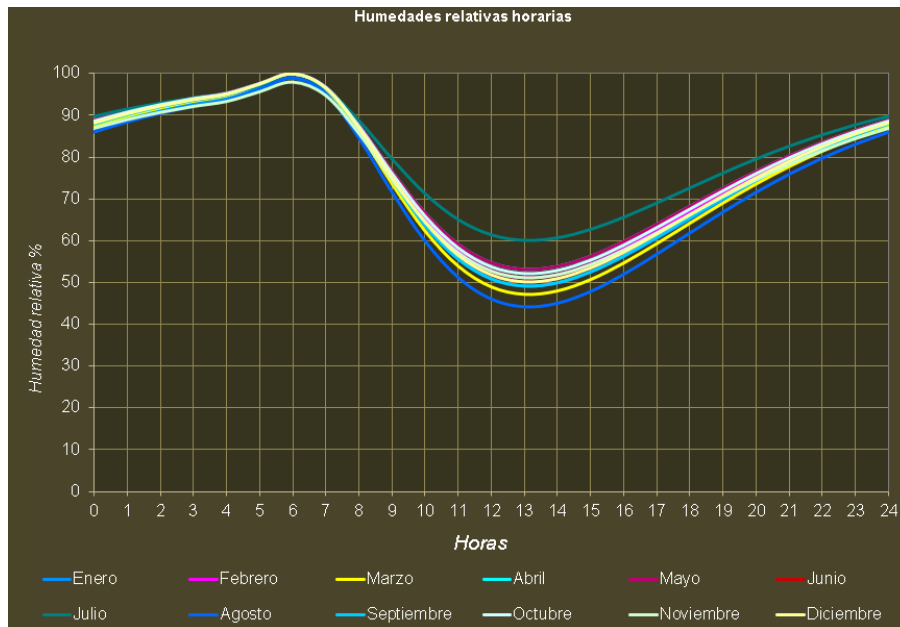


Ilustración 9. Humedad relativa por hora.

El gráfico de humedad relativa horaria presenta los valores más elevados durante los meses de diciembre, enero y febrero, especialmente en las horas nocturnas y de la madrugada, con rangos que se sitúan aproximadamente entre 90 % y 95 %. Asimismo, noviembre y octubre muestran valores altos de humedad relativa a lo largo del día, aunque con un descenso más marcado durante las horas centrales, alcanzando mínimos cercanos al 55–60 %. Estos patrones reflejan la influencia de temperaturas más bajas en estos meses, lo que favorece una mayor humedad relativa horaria en comparación con el resto del año.

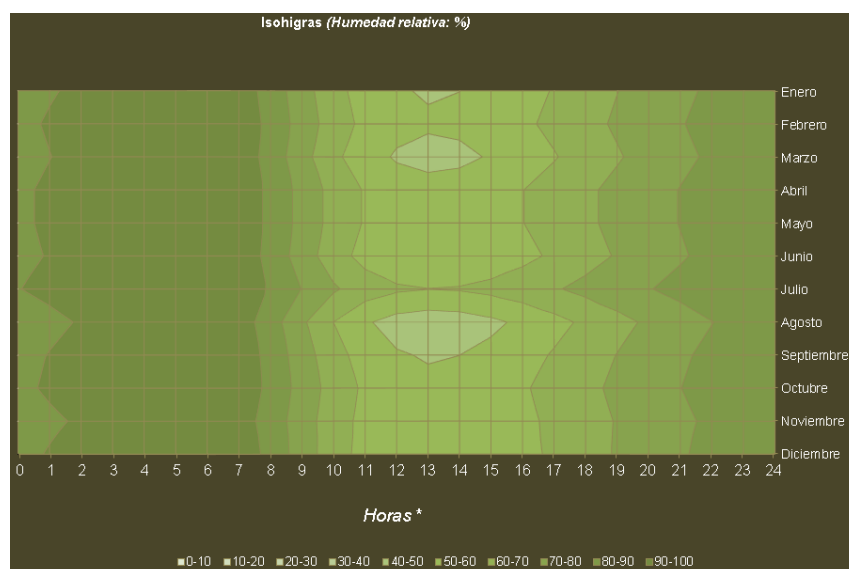


Ilustración 10. Isohigras humedad relativa.

El gráfico de Isohigras de humedad relativa demuestra que en términos horarios, los valores más altos de humedad relativa (80–100 %) se concentran de forma generalizada durante la noche y la madrugada (aproximadamente entre 0:00 y 7:00 h) en todos los meses, lo que indica condiciones cercanas a la saturación asociadas a temperaturas más bajas. Conforme avanza el día, la humedad relativa disminuye progresivamente, alcanzando sus mínimos entre las 11:00 y 15:00 h, cuando predominan rangos del 50–60 %, e incluso valores ligeramente inferiores en los meses más cálidos.

Radiación solar

La gráfica de radiación incidente muestra que la mayor captación de radiación se presenta sobre plano horizontal con cielo despejado, alcanzando valores cercanos a 8.500 W/m² durante los meses de febrero, marzo, abril, agosto, septiembre y octubre, mientras que los valores mínimos, alrededor de 7.800 W/m², se registran en enero, mayo, junio, julio, noviembre y diciembre. En condiciones de nublado típico, la radiación sobre plano horizontal disminuye notablemente, situándose en un rango aproximado de 5.000 a 5.600 W/m² a lo largo del año. Por su parte, la radiación incidente sobre muros norte presenta una marcada estacionalidad, con máximos en los meses cercanos a los equinoccios bajo cielo despejado y valores prácticamente nulos en algunos meses, tendencia que se atenúa bajo condiciones nubladas.

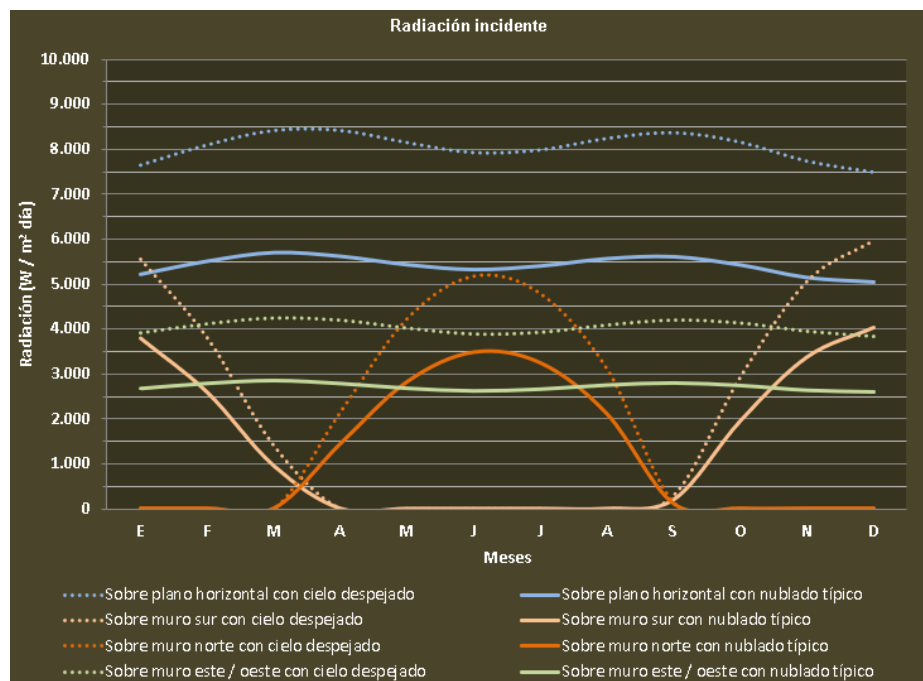


Ilustración 11. Radiación incidente.

La gráfica de brillo solar mensual evidencia que, aunque las horas de sol astronómicas se mantienen relativamente estables a lo largo del año, el brillo solar efectivo presenta variaciones significativas influenciadas por las condiciones climáticas. Los valores más bajos se registran principalmente en febrero, mientras que los mayores niveles de aprovechamiento solar se concentran entre los meses de mayo y agosto.

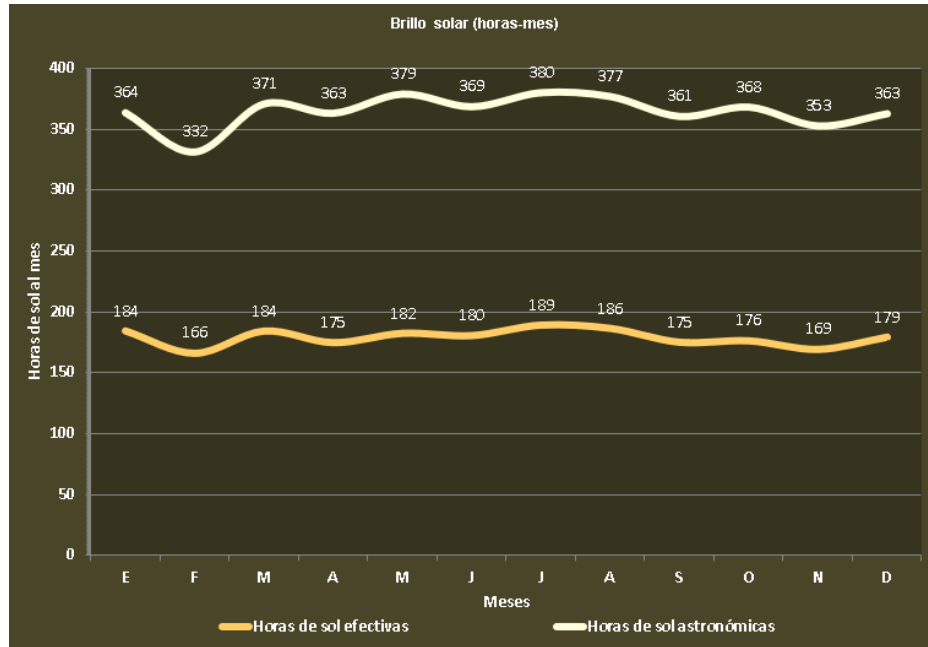


Ilustración 12. Brillo solar por horas.

Clima anual y estacional

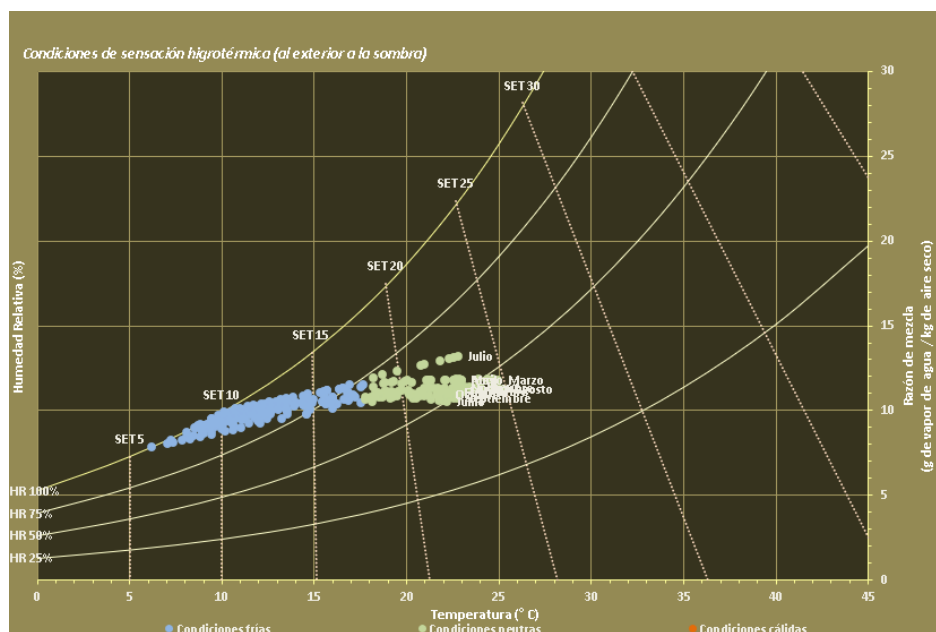


Ilustración 13. Condiciones de sensación higrotérmica (al exterior a la sombra).

El gráfico de sensación higrotérmica muestra la distribución de temperatura y humedad relativa durante el año, La mayor concentración de puntos se sitúa entre temperaturas aproximadas de 15 °C a 26 °C y humedades relativas cercanas al 60–85 %, lo que indica un predominio de condiciones neutras a ligeramente cálidas durante gran parte del año. Esto sugiere un ambiente generalmente confortable desde el punto de vista térmico.

Las condiciones frías se concentran en valores de temperatura más bajos (por debajo de 15 °C), aunque con humedades relativamente altas, lo que puede intensificar la sensación de frío. Por su parte, las condiciones cálidas son menos frecuentes y aparecen asociadas a temperaturas superiores a 25 °C, donde la humedad elevada incrementa la sensación de calor.

Carta de confort ASHRAE 55:2020 Modo adaptativo

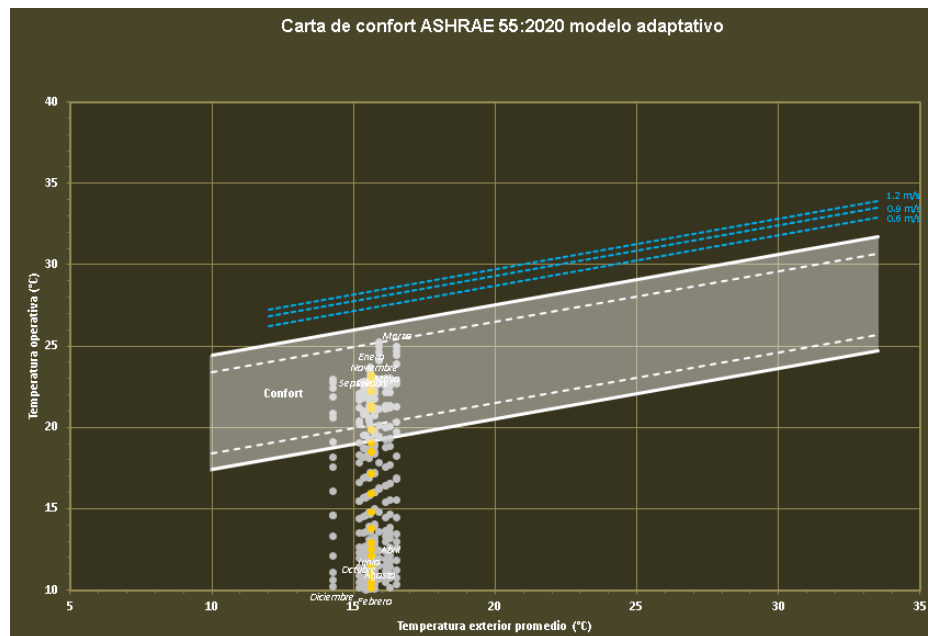


Ilustración 14. Grafica Carta de confort de ASHRAE Modo adaptativo.

En la carta de confort ASHRAE 55:2020 Modo adaptativo, se observa que los valores de temperatura exterior se concentran principalmente entre 14 °C y 17 °C, mientras que la temperatura operativa interior varía aproximadamente entre 18 °C y 25 °C, evidenciando una adecuada adaptación del ambiente interior frente a las condiciones climáticas externas. Algunos puntos se sitúan ligeramente por debajo de la zona de confort, especialmente en los meses más fríos, lo que sugiere posibles sensaciones de frío térmico en determinados periodos.

No obstante, la ausencia de registros por encima del límite superior indica que no se presentan condiciones de sobrecalentamiento.

En conjunto, la gráfica evidencia un buen desempeño térmico del espacio analizado, con predominio de condiciones confortables según el modelo adaptativo de ASHRAE. Esto resalta la eficacia de estrategias pasivas y de adaptación climática, reduciendo la necesidad de sistemas mecánicos de climatización y favoreciendo el bienestar térmico de los usuarios.

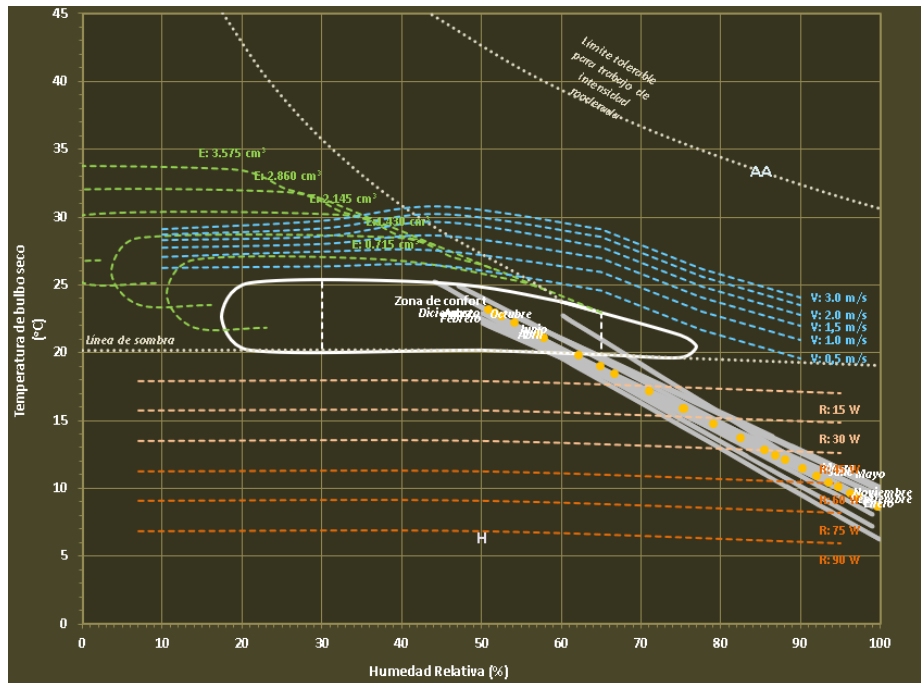


Ilustración 15. Gráfica carta bioclimática de Olgyay.

En el centro del diagrama se identifica la zona de confort, delimitada por una figura ovalada, dentro de la cual se concentran varios de los registros climáticos, lo que indica la presencia de condiciones térmicas aceptables durante ciertos periodos del año.

La mayor parte de los puntos se distribuye hacia la zona derecha del gráfico, caracterizada por altos niveles de humedad relativa (superiores al 60 %) y temperaturas moderadas. Esta localización sugiere que el clima analizado es predominantemente húmedo, lo que puede intensificar la sensación térmica y generar incomodidad cuando la ventilación es insuficiente. Por esta razón, el gráfico resalta la importancia de estrategias de ventilación natural, representadas por las líneas azules asociadas a diferentes velocidades del viento, como mecanismo clave para desplazar las condiciones hacia la zona de confort.

La gráfica evidencia que, aunque existen periodos dentro de la zona de confort, gran parte de las condiciones climáticas requieren la aplicación de estrategias pasivas complementarias para garantizar el bienestar térmico. La carta de Olgyay permite identificar de manera clara estas necesidades y orienta decisiones de diseño arquitectónico y urbano adaptadas al contexto climático analizado.

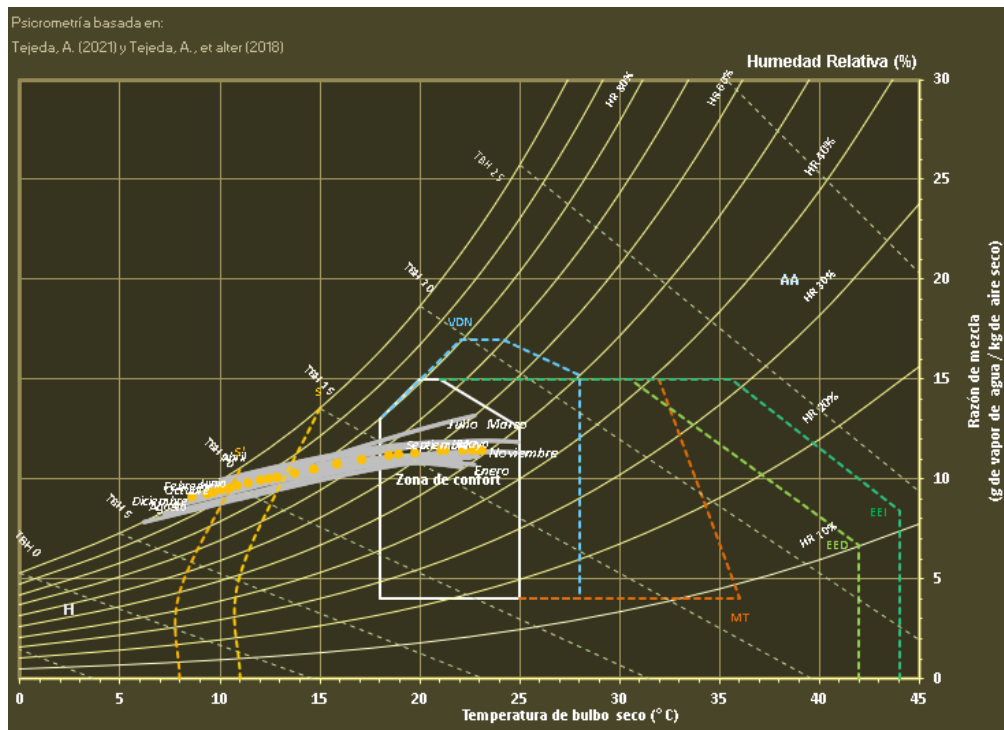


Ilustración 16. Carta bioclimática de Givoni.

En el centro del diagrama se identifica la zona de confort, dentro de la cual se ubican varios de los registros climáticos mensuales, lo que indica que existen periodos del año en los que las condiciones ambientales son naturalmente confortables.

La mayor concentración de puntos se sitúa en un rango de temperaturas moderadas, entre aproximadamente 18 °C y 26 °C, con humedades medias a altas, lo que caracteriza un clima templado-húmedo. Sin embargo, una parte significativa de los datos se extiende fuera de la zona de confort, principalmente hacia valores de mayor humedad y temperatura, evidenciando posibles sensaciones de calor. Ante estas condiciones, la carta señala la necesidad de estrategias bioclimáticas como la ventilación natural, el sombreado, y el uso de enfriamiento evaporativo, representadas por las áreas y líneas punteadas del gráfico.

La carta psicrométrica de Givoni evidencia que, aunque el clima presenta condiciones potencialmente confortables durante ciertos meses, el bienestar térmico depende en gran

medida de la adaptación arquitectónica al contexto climático. Esta herramienta resulta fundamental para orientar decisiones de diseño sostenible, permitiendo reducir la dependencia de sistemas mecánicos y optimizar el confort ambiental de los usuarios.

El resumen diagnóstico bioclimático según Bioclimarq, dice lo siguiente:

Las estrategias de climatización se determinan mediante la carta síntesis de Bioclimarq, que concilia los procedimientos de las cartas bioclimáticas incluidas en la herramienta. Las zonas que se observan en dicha carta son:

—	Confort
—	Zona de confort anual
---	Ganancia solar más inercia térmica (GS + IT)
---	Eficiencia (η): 0.5
---	Eficiencia (η): 0.7
---	Ventilación (V)
---	Ventilación potencial según condiciones locales $V_a = 1,3$ m/s
---	Ventilación nocturna más inercia térmica (VN + IT)
---	Enfriamiento evaporativo (EE)
---	Enfriamiento evaporativo directo (EED)
---	Enfriamiento evaporativo indirecto (EEI)
■	Calefacción (H)
■	Aire acondicionado (AA)

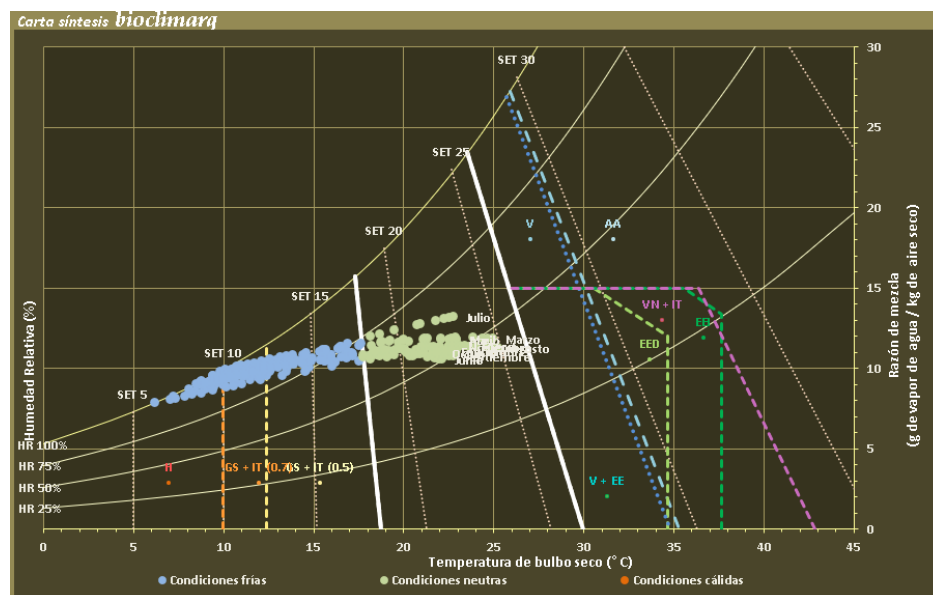


Ilustración 17. Resumen diagnóstico bioclimático.

Definición de confort

De acuerdo con el modelo de confort usado y calculado en la herramienta Bioclimarq, la temperatura neutra anual para el lugar de estudio se determinó en 23°C, valor que representa la condición térmica en la cual la mayoría de los ocupantes no manifiestan preferencia por ambientes más cálidos o fríos. Se definen el límite superior de confort en 26°C y un límite inferior de 18°C. Esta definición de confort es importante para contrarrestar la definición de confort hallada usando la fórmula de confort adaptativo.

Los parámetros estimados para hacer el diagnóstico son:

Temperatura neutra anual (T_n):	23	°C
Límite superior de confort ($T_{sup} = T_n + 3.5 K$)	26	°C
Límite inferior de confort ($T_{inf} = T_b-$)	18	°C *
Rango de confort anual (RC):	8	K **

** Los datos que se refieren a una temperatura puntual se expresan en grados centígrados (°C), y cuando se refieren a un intervalo se expresan en grados Kelvin (K), en el entendido que en el caso de incrementos o longitudes de intervalos 1°C = 1K

Ilustración 18. Resumen diagnóstico bioclimático.

Requerimientos de climatización

Con base en los parámetros climáticos analizados y en el régimen de temperaturas y humedades registrado para la ciudad de Manizales, Caldas, se identifica de manera consistente un requerimiento básico de calentamiento a lo largo de todo el año. Las temperaturas medias y mínimas, particularmente durante las horas nocturnas y de madrugada, se sitúan frecuentemente por debajo del rango de confort térmico aceptable para edificaciones naturalmente ventiladas, condición que se ve reforzada por los elevados niveles de humedad relativa. Este contexto climático limita la sensación térmica de confort y acentúa las pérdidas de calor sensible en los espacios interiores, haciendo necesario priorizar estrategias pasivas orientadas al aprovechamiento de la ganancia solar, la reducción de pérdidas térmicas y el uso de masa térmica.

Estrategias de climatización pasiva

A lo largo del año, las condiciones de temperatura y humedad que se ubican dentro de la zona de confort representan aproximadamente el 37% del tiempo. Para el resto, las estrategias básicas de climatización que mejor aplican a los requerimientos identificados son:

1. Ganancia solar + inercia térmica (0.5) (GS+IT 0.5) =45%
2. Ganancia solar + inercia térmica (0.7) (GS+IT 0.7) =35%

3. Calefacción (H) =19%

El porcentaje de aplicación se refiere al periodo de condiciones fuera de confort.

De acuerdo a la temperatura media anual (16°C), así como al promedio de variación diaria de temperaturas durante el año (15K), el efecto de inercia térmica no es indispensable, por lo que la masa térmica del edificio podría funcionar bien con cerramientos ligeros. Se recomienda que durante el 63% del periodo diurno, se procure que los vanos acristalados permanezcan protegidos del sol.

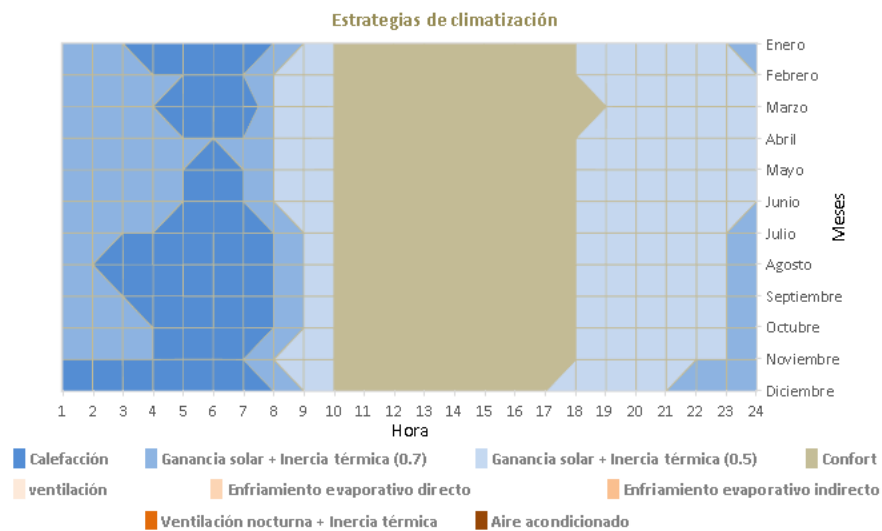


Ilustración 19. Resumen diagnóstico estrategias de climatización.

Caracterización climática	El clima de Manizales Caldas se caracteriza por:												
Según Mahoney	Temperatura entre los 15 °C y 20 °C y humedad relativa entre el 50% y el 70%, en promedio anual.												
Según sensación higró-térmica	Condiciones principalmente frías (62% del año), y en segundo término neutras (38%)												
Diagnóstico bioclimático	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Claves
Diurno													F Ambiente frío
Nocturno	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	C Ambiente cálido
													Ambiente confortable
Estrategias recomendadas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Temporalidad
Ventilación esencial													10 meses
Ventilación deseable													
Protección contra la lluvia			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Inercia Térmica	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Todo el año
Espacio exterior como dormitorio													
Protección contra el frío	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Temas	Tácticas de bioclimatización recomendadas												
Configuración en planta	Orientación Norte-Sur, con eje largo Este-Oeste												
Configuración espacial	Configuración compacta; habitaciones adyacentes entre sí												
Distribución espacial para efectos de ventilación	Habitaciones agrupadas, sin necesidad de ventilación para enfriamiento												
Tamaño de los vanos	Medianos: 25 - 40 % de la superficie de fachada												
Posición de los vanos	Sin indicación especial												
Aberturas en cerramientos interiores	No es necesaria su consideración												
Protección de Vanos	Protegidos contra la lluvia.												
Muros y Pisos	Masivos, arriba de 8 hr de retraso térmico												
Cubiertas	Masivas, arriba de 8 hr de retraso térmico												
Exteriores	Considerar drenes suficientes ante lluvias intensas												

Ilustración 20. Mahoney tácticas de climatización recomendadas.

Las tácticas bioclimáticas recomendadas por Mahoney establecen una orientación Norte–Sur con el eje largo Este–Oeste, una configuración compacta de la edificación y habitaciones adyacentes y agrupadas, sin requerir ventilación cruzada para enfriamiento. Se propone un tamaño de vanos mediano, equivalente al 25–40 % de la superficie de fachada, sin una posición específica definida y sin necesidad de aberturas en cerramientos interiores. Asimismo, los vanos deben estar protegidos contra la lluvia, mientras que muros, pisos y cubiertas deben ser masivos, con un retraso térmico superior a 8 horas, y en los espacios exteriores se debe prever un sistema de drenaje adecuado frente a lluvias intensas.

Caracterización climática	El clima de Manizales Caldas se caracteriza por:
Según Mahoney	Temperatura entre los 15 °C y 20 °C y humedad relativa entre el 50% y el 70%, en promedio anual.
Según sensación higró-térmica	Condiciones principalmente frías (62% del año), y en segundo término neutras (38%)
Coefficientes de forma general del edificio	Grado recomendado y tácticas de bioclimatización aplicables
Compacidad	Compacidad alta. Configuración espacial y volumétrica lo más compacta posible.
Porosidad	Porosidad muy baja. Patios centrales no recomendados.
Coefficientes de tratamiento de la piel	Grado recomendado y tácticas de bioclimatización aplicables
Asentamiento	Asentamiento alto. La mayor área posible de la envolvente en contacto con el subsuelo.
Adosamiento	Adosamiento alto. La mayor área posible de la envolvente adosada a otro(s) edificio(s).
Pesadez	Pesadez alta. Cerramientos masivos, de alta inercia térmica.
Perforación	Perforación muy baja. Vanos abiertos con una superficie entre 10% y 20% del área de fachada.
Transparencia	Transparencia alta. La mayor área acristalada posible de la superficie de los vanos.
Aislamiento	Aislamiento alto. Cerramientos con el mayor aislamiento térmico posible.
Tersura	Tersura muy baja. Fachadas lisas, sin pliegues, que favorezcan la ganancia solar.
Textura	Textura muy baja. Superficies exteriores lisas, que eviten el intercambio por convección.
Color	Color de alta absortividad (α). Acabados de superficies exteriores a base de colores oscuros ($\alpha \geq 0,7$).
Variabilidad	Variabilidad muy baja. Arreglo de elementos y dispositivos sin variación durante todo el año.

Ilustración 21. Resumen Serra & Coch.

Las tácticas bioclimáticas recomendadas por Serra y Coch proponen una edificación de alta compacidad, con una configuración espacial y volumétrica lo más compacta posible y una porosidad muy baja, desaconsejando patios centrales. Se recomienda un asentamiento elevado, maximizando el contacto de la envolvente con el subsuelo, así como un adosamiento alto, adosando la mayor superficie posible a edificaciones contiguas. La envolvente debe presentar alta pesadez, con cerramientos masivos y elevada inercia térmica, y una perforación muy baja, limitando los vanos a entre 10 % y 20 % del área de fachada, aunque con alta transparencia en los mismos, privilegiando la mayor superficie acristalada posible. Se plantea un aislamiento térmico alto, fachadas de textura y tersura muy bajas, lisas y sin pliegues, que favorezcan la ganancia solar y reduzcan la convección, junto con colores de alta absortividad, preferiblemente oscuros ($\alpha \geq 0,7$). Finalmente, se recomienda una variabilidad mínima, manteniendo una disposición constante de los elementos y dispositivos durante todo el año.

Tácticas de bioclimatización recomendadas

LOCALIZACIÓN		CLIMA
LUGAR	Manizales Caldas	Presenta condiciones principalmente frías (62% del año), y en segundo término neutras (38%).
LATITUD	5,1 ° Norte	
LONGITUD	75,5 ° Este	
ALTITUD	2.160 msnm	
REQUERIMIENTOS DE CLIMATIZACIÓN		ESTRATEGIAS DE CLIMATIZACIÓN
Calentamiento		Ganancia solar + inercia térmica (0.5) 45 %
		Ganancia solar + inercia térmica (0.7) 35 %
		Calefacción* 19 %

* Estrategia no pasiva. Requiere de energía activa.

Ilustración 21. Resumen Serra & Coch.

1. Configuración espacial y volumétrica

Implantación y distribución:

Se recomienda un desarrollo de planta compacta, con posibilidad de protegerse del viento (figura 1). Conviene que las habitaciones se resuelvan de manera agrupada, adyacentes entre sí (figura 2).

Proximidad:

Con el fin de hacer eficiente el intercambio de calor entre el interior habitable y el entorno inmediato del edificio, se recomienda que la envolvente arquitectónica tenga el mayor contacto posible con el subsuelo, incluso como construcción subterránea. Asimismo, se plantea como favorable que el edificio mantenga el mayor contacto posible con otros edificios (figura 3).

Densidad:

La densidad de los elementos constructivos determina la inercia térmica de la envolvente. Para las condiciones identificadas en este estudio, se recomiendan cerramientos de alta capacidad calorífica. De ahí que muros, pisos, entrepisos y cubiertas deben ser masivos, capaces de alcanzar 8 horas de retraso térmico, cuando menos (figura 4). El aprovechamiento

de ganancias internas (provenientes del calor disipado por personas y aparatos eléctricos, así como de otras fuentes de calor interno), puede ser una estrategia de climatización conveniente. De ahí que se recomiende evitar las pérdidas mediante un buen aislamiento de la envolvente, así como proveer de paredes divisorias masivas que favorezcan la inercia térmica.

Adaptabilidad:

El volumen de precipitación esperable en el sitio hace necesaria la implementación de sistemas de captación y conducción de aguas lluvia en exteriores, cubiertas y azoteas.

II. Tratamiento de fachadas

Morfología, textura y color:

Las superficies de fachada deben propiciar la ganancia de radiación solar, por lo tanto, se sugiere que su desarrollo sea lo más plano posible, sin quiebres, pliegues o salientes (figura 5). Asimismo, se recomiendan superficies lisas, que eviten el intercambio por convección (figura 6). La pintura o recubrimiento a aplicar debe ser a base de colores oscuros (a 20.7) (figura 7).

Tamaño, configuración y protección de vanos:

En lo que respecta a los vanos de la envolvente, se sugiere que su área total se mantenga entre el 15% y 25% de la superficie de fachada (figura 8).

Los elementos de sombreado (fijos o móviles), deben obstruir la radiación solar que incide sobre el área de vanos durante el 63% de las horas con sol al día (figura 9). Se recomienda que el área cerrada mediante cristales sea la mayor posible. Adicionalmente, se deben considerar elementos de protección contra la lluvia.

Variabilidad:

Dado el carácter estable del clima, no es necesario variar la forma o función de elementos y dispositivos arquitectónicos y de bioclimatización a lo largo del año.

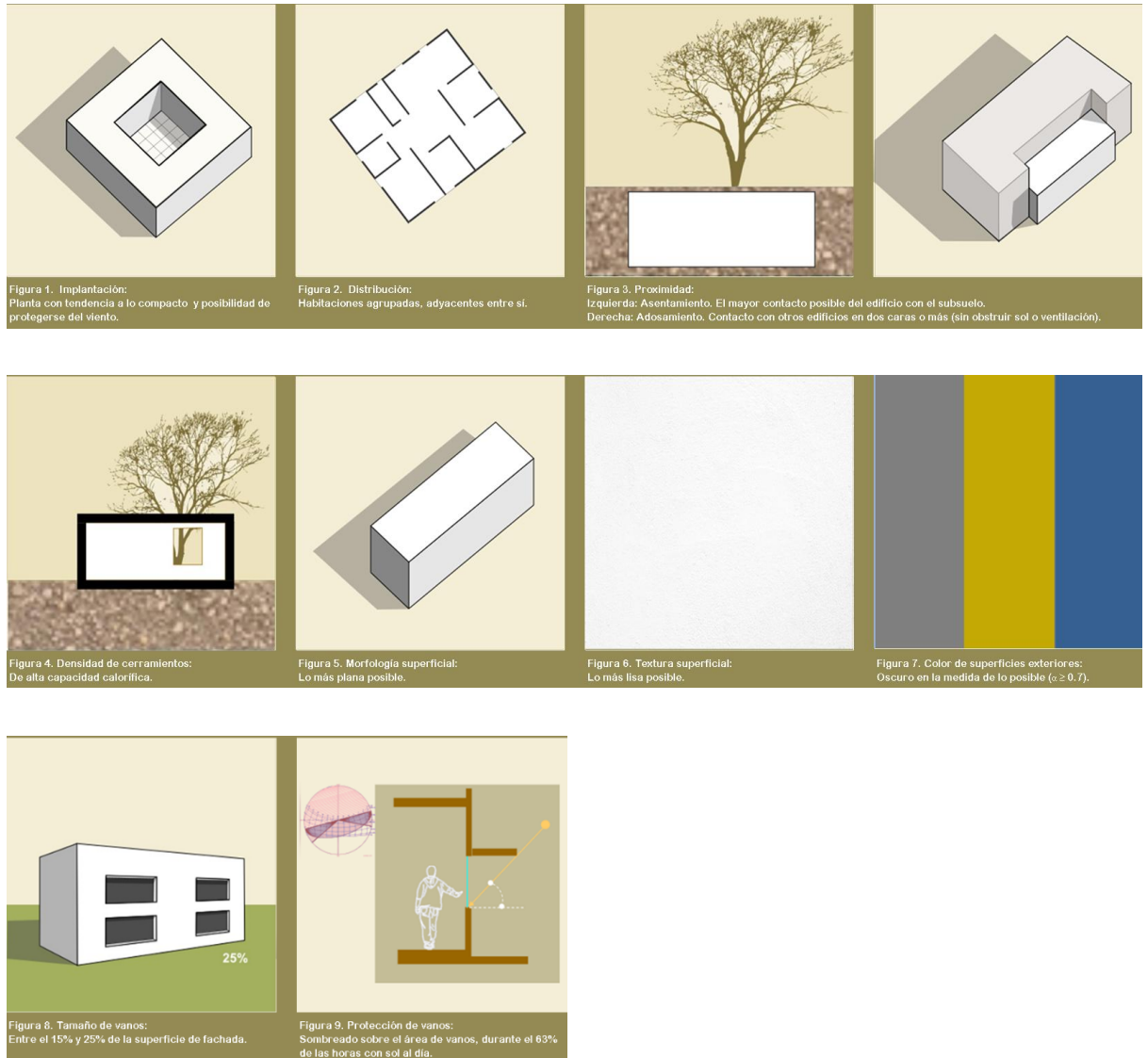


Ilustración 22. Resumen de recomendaciones de climatización.

III. Escenarios de cambio climático

Para el horizonte 2050, se prevé un incremento del 1% en las condiciones frías a lo largo del año, y una reducción en las condiciones neutras de la misma magnitud. En tanto que, para el fin de siglo, las condiciones neutras se incrementarían un 2% adicional, y las condiciones frías se reducirían en la misma magnitud.

Este cambio en las condiciones de sensación térmica se manifestará en una disminución en la demanda de horas grado de calentamiento (KH [Cal]), de 1% para 2050, y -4% para fin de siglo (tabla 23). En consecuencia, es oportuno prever acciones que reduzcan paulatinamente la ganancia solar, a fin de evitar el riesgo de sobrecalentamiento.

Horas-Grado Kelvin-Mes (Kh). Escenarios de cambio climático.													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACTUAL
Enfriamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 Kh mes
Calentamiento	588	517	540	540	563	556	584	563	568	588		655	6.261 Kh mes
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	2050
Enfriamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 Kh mes
Calentamiento	589	513	535	531	556	583	585	489	598	618	556	702	6.854 Kh mes
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	2100
Enfriamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 Kh mes
Calentamiento	582	507	541	532	555	544	574	418	557	571	550	638	6.569 Kh mes

Ilustración 23. Resumen de recomendaciones de climatización.

9. Estado del arte

El estudio de la arquitectura rural campesina ha cobrado relevancia en el contexto de la arquitectura bioclimática, al representar un conjunto de saberes empíricos y técnicas constructivas, que reflejan una relación directa entre el hábitat humano y las condiciones climáticas del territorio. En las últimas décadas, la investigación en torno al confort térmico y las estrategias pasivas de climatización ha permitido reevaluar las soluciones tradicionales como fuentes de innovación sostenible, en contraposición a los modelos constructivos estandarizados que, aunque industrializados, suelen ser ineficientes en contextos rurales y de montaña (Rojas & Altamirano, 2023). Así, el interés académico se orienta a comprender cómo los elementos tectónicos tradicionales entendidos como el sistema constructivo y su expresión material pueden ser integrados en diseños contemporáneos que garanticen el confort térmico, la eficiencia energética, la función, uso y símbolo que integran la vivienda rural campesina.

En este sentido, Rojas & Altamirano (2023) y de Soto-Chahua et al. (2025) aportan un cuerpo empírico y metodológico valioso, pues ambos abordan la relación entre confort térmico, materialidad y estrategias pasivas en contextos rurales latinoamericanos, permitiendo construir un horizonte de comprensión aplicable a la realidad campesina del sector de Miraflores (Riosucio, Caldas). El primer aspecto que emerge del análisis comparado de la literatura es la revalorización de los sistemas constructivos tradicionales como fuente de equilibrio térmico y expresión cultural.

En los estudios revisados, los sistemas constructivos tradicionales, particularmente los de tierra, madera y piedra, se reconocen como recursos con alto potencial de inercia térmica y baja huella ambiental, capaces de generar microclimas interiores estables frente a las fluctuaciones térmicas diarias. Rojas & Altamirano (2023), al estudiar dos tipologías de vivienda rural en la provincia de Cotopaxi, Ecuador, evidencian que la disposición espacial, el

espesor de los muros y la selección de materiales naturales (adobe y piedra) inciden de manera directa en la temperatura operativa interior, aumentando entre un 14 % y un 23 % respecto a edificaciones sin aislamiento. Sin embargo, los autores destacan que la mera presencia de materiales vernáculos no garantiza el confort térmico si no existe una adecuada gestión de la envolvente y una coherencia con la orientación solar y la ventilación natural.

Por su parte, Soto-Chahua et al. (2025) profundizan en el comportamiento térmico de materiales y sistemas constructivos en viviendas rurales peruanas, demostrando que la combinación de masa térmica y ventilación cruzada reduce significativamente las horas de discomfort. Su propuesta de vivienda integra techos ventilados, patios interiores y cerramientos mixtos en tierra, madera y fibras vegetales, configurando un equilibrio entre aislamiento y transpirabilidad. Estos hallazgos permiten identificar una tendencia metodológica compartida: la integración del conocimiento empírico rural campesino con herramientas tecnológicas de simulación térmica (DesignBuilder, Ecotect, diagramas de Givoni), lo que constituye una práctica de validación cruzada entre saber tradicional y conocimiento técnico contemporáneo.

Desde la perspectiva bioclimática, ambos estudios se alinean con los postulados de la norma ASHRAE 55 y la ISO 7730, en cuanto a la definición de confort térmico como una respuesta adaptativa. Esta visión resulta crucial para el análisis de la vivienda rural campesina, donde las prácticas cotidianas (uso de fogones, tiempos de ocupación, actividades agrícolas) modifican la percepción térmica del habitante y, por tanto, demandan una interpretación contextualizada de los umbrales de confort. En este sentido, la arquitectura rural se entiende como un sistema abierto, en el que la tectónica tradicional no solo cumple funciones estructurales o estéticas, sino también regulatorias del microclima interior, en coherencia con las dinámicas culturales y climáticas del territorio.

La revisión de estos estudios también revela un conjunto de principios bioclimáticos aplicables a la vivienda rural campesina:

1. *Gestión pasiva de la radiación solar mediante orientación de fachadas y uso de aleros profundos.*
2. *Control de ventilación natural con aberturas opuestas y lucernarios para extracción térmica.*
3. *Optimización de la masa térmica en la envolvente para amortiguar las oscilaciones diurnas.*

4. *Uso de aislamientos naturales compatibles con la disponibilidad local.*
5. *Configuración espacial funcional que prioriza zonas intermedias (patios, corredores, cullatas protegidas) como mediadores térmicos entre el interior y el exterior.*

Estos lineamientos, aunque derivados de contextos distintos al colombiano, ofrecen una base sólida para reinterpretar la vivienda rural campesina de Miraflores desde una lógica de diseño tectónico adaptativo, que articule conocimiento de los sabedores, de la bioclimática y conocimiento técnico contemporáneo.

No obstante, los autores también coinciden en señalar las limitaciones de la arquitectura rural tradicional en cuanto a eficiencia térmica y durabilidad. Rojas & Altamirano (2023) advierten que la falta de mantenimiento en estructuras de adobe y cubiertas de teja genera pérdidas térmicas y filtraciones, mientras que Soto-Chahua et al. (2025) resaltan la necesidad de incorporar nuevos materiales híbridos como recubrimientos estabilizados y paneles aislantes naturales que mejoren la respuesta térmica sin alterar la identidad constructiva. En consecuencia, el reto actual de la investigación en hábitat rural campesino radica en la integración controlada de innovación y tradición, asegurando compatibilidad física y simbólica entre técnicas constructivas y modos de vida de sus habitantes.

El conocimiento tradicional campesino transmitido por práctica y memoria constituye el “pretexto” que da sentido al proceso de reinterpretación contemporánea. Los estudios revisados actúan como el “texto” que evidencia la materialidad, los métodos y los resultados de dicha reinterpretación. Finalmente, el “horizonte de sentido” se configura en la posibilidad de un diseño bioclimático campesino que recupere la tectónica tradicional como componente activo del confort térmico, mediante estrategias de diseño pasivo y selección acertada de materiales y técnicas de construcción.

La síntesis de la literatura sugiere, además, un vacío de investigación en torno a la percepción térmica y el confort adaptativo de las comunidades campesinas colombianas, donde el confort no se define exclusivamente por valores métricos, sino por hábitos, ritmos y simbolismos asociados al habitar rural. Este componente sociocultural ha sido escasamente integrado en los modelos de simulación térmica, a pesar de su relevancia para la eficacia real de las estrategias bioclimáticas. Asimismo, se identifica la necesidad de instrumentación de campo en climas intermedios de montaña como Miraflores, con series de datos micro

climáticos que permitan calibrar los modelos normativos (ASHRAE, NTC 5316) con el comportamiento térmico real de las tipologías campesinas.

El estado del arte muestra que la arquitectura rural campesina es un campo fértil para la investigación bioclimática y tectónica, al contener en su estructura material y espacial una síntesis entre saber empírico y adaptación climática. Los trabajos de Rojas & Altamirano (2023) y Soto-Chahua et al. (2025) evidencian una tendencia hacia la revalorización de la materialidad tradicional, la medición científica del confort y la búsqueda de soluciones híbridas que mantengan la identidad cultural de la vivienda rural, a la vez que mejoran su desempeño térmico.

Para el caso de Miraflores (Riosucio, Caldas), estos antecedentes sustentan la necesidad de integrar los elementos tectónicos tradicionales como muros de bahareque, cubiertas de teja, entramados de madera y esterilla, patios y corredores en un diseño espacial bioclimático basado en principios de radiación controlada, ventilación natural e inercia térmica. Tal integración debe guiarse por un enfoque interdisciplinar, que combine simulación térmica (DesignBuilder o EnergyPlus) con observación empírica y participación comunitaria, en coherencia con la visión adaptativa del confort que promueven ASHRAE 55 y la ISO 7730.

Finalmente, este análisis hermenéutico permite comprender que la verdadera innovación en la vivienda rural campesina no radica en sustituir la tradición, sino en releerla técnicamente, integrando sus elementos tectónicos en un lenguaje de diseño que responda simultáneamente a las exigencias del clima, la cultura y la sostenibilidad contemporánea.

10. Metodología y herramientas

El presente proyecto adopta un enfoque etnoarquitectónico y bioclimático para el desarrollo de un modelo hipotético de vivienda rural en la vereda Miraflores, municipio de Riosucio (Caldas). Este enfoque integra la observación y el análisis del comportamiento térmico de las viviendas rurales según sus materiales de construcción.

Siguiendo a Gabriel Arboleda (2018), la *etnoarquitectura* se comprende como “un acercamiento etnográfico a la arquitectura, un acercamiento que asume el punto de vista del otro, más allá del propio”. Bajo esta perspectiva, la arquitectura vernácula es interpretada como una manifestación viva de adaptación ambiental y cultural, donde las soluciones constructivas responden a procesos históricos, sociales y climáticos específicos. En consonancia con Olgyay

(1963) y Givoni (1998), se asume que la arquitectura tradicional constituye una fuente empírica de conocimiento bioclimático, derivada de la interacción prolongada entre el hábitat humano y el entorno físico.

Por tanto, la metodología articula dos dimensiones complementarias:

- Una *dimensión cualitativa*, fundamentada en la observación etnográfica y la observación del habitar rural campesino.
- Una *dimensión cuantitativa*, centrada en la medición de variables térmicas y el análisis del desempeño energético mediante simulación computacional.

La investigación se estructura bajo un enfoque mixto, de carácter descriptivo–cuasiexperimental, cuyo propósito es evaluar el comportamiento térmico de viviendas rurales tradicionales frente a viviendas construidas con materiales convencionales, identificando las condiciones que favorecen el confort térmico y la eficiencia energética.

Se seleccionaron 12 viviendas representativas del lugar, 6 construidas con materiales tradicionales, principalmente bahareque, guadua y madera, 6 construidas con materiales convencionales, como bloque de concreto, ladrillo y cubierta de fibrocemento. Esta selección se realizó mediante muestreo intencional, considerando la accesibilidad, el estado de conservación y la relación con el cultivo de café, aspecto característico del lugar.

<i>Casa tradicional 1</i>	<i>Casa tradicional 2</i>
	

Casa tradicional 3



Casa tradicional 4



Casa tradicional 5



Casa tradicional 6



Casa convencional 7

Casa convencional 8



Casa convencional 9



Casa convencional 10



Casa convencional 11



Casa convencional 12



Fase I. Observación etnoarquitectónica y levantamiento arquitectónico:

En esta etapa se desarrollaron visitas de campo orientadas al análisis del contexto cultural y constructivo. Las actividades incluyeron:

- Levantamiento arquitectónico de las viviendas mediante registro planimétrico, fotográfico y descriptivo.
- Entrevistas semiestructuradas con los habitantes, enfocadas en la percepción del confort térmico, los hábitos de uso de los espacios y la relación simbólica con la vivienda.
- Registro de vestimenta y nivel de aislamiento (CLO), de acuerdo con la norma ASHRAE 55:2017, como parámetro de referencia para la evaluación del confort térmico adaptativo.
- Elaboración de fichas de observación etnoarquitectónica, que sistematizaron aspectos como materiales, técnicas constructivas, orientación, relación con la topografía, vegetación circundante y ventilación natural.

La ficha técnica se concibe como una herramienta metodológica integral, orientada al diagnóstico y análisis del comportamiento bioclimático de la vivienda rural campesina desde una perspectiva técnico-científica basada en la física de la edificación y en lineamientos como ASHRAE 55, ISO 7730 y los principios de la arquitectura bioclimática desarrollados por Olgyay, Givoni y Szokolay. Su estructura permite recopilar información general de la vivienda, antigüedad, número de habitantes y condiciones de ocupación para contextualizar las cargas internas y comprender cómo las dinámicas sociales influyen en la percepción térmica.

El registro del emplazamiento y la relación con el entorno permite analizar la orientación, la disposición del patio y la implantación volumétrica, variables fundamentales para evaluar la captación solar, la ventilación natural y el comportamiento del microclima inmediato. Asimismo, la caracterización de los elementos tectónicos cimentación, estructura, envolvente, cubierta, pisos y aberturas proporciona los datos necesarios para modelar la vivienda en simuladores energéticos como DesignBuilder/EnergyPlus, permitiendo estimar valores de transmitancia térmica, inercia y comportamiento higrotérmico según los materiales locales como bahareque, tapia, adobe o guadua.

Paralelamente, la evaluación del confort térmico, que integra mediciones de temperatura y humedad junto con la percepción de los habitantes, facilita una lectura adaptativa

coherente con los modelos descritos por ASHRAE, vinculando las condiciones físicas con las prácticas culturales como abrir ventanas, usar vegetación o emplear el fogón para regular la temperatura. La identificación del tipo de ventilación cruzada, unilateral o por calados evidencia el comportamiento del flujo de aire y las zonas de estancamiento térmico, insumo clave para futuras simulaciones CFD y para el diseño de mejoras pasivas. La ficha también documenta los elementos tradicionales, que revelan la pertinencia bioclimática del saber ancestral campesino y sus estrategias de adaptación al clima local, así como los aspectos socioculturales que permiten comprender la vivienda como un espacio productivo y social cuyos usos generan cargas internas y condicionan la ventilación e iluminación natural.

El registro de transformaciones de la vivienda, cambios de materiales, ampliaciones o adiciones recientes permite identificar rupturas o continuidades respecto a la lógica vernácula y su impacto en el desempeño térmico. El levantamiento gráfico y el registro fotográfico complementan el análisis espacial, permitiendo comprender rutas de ventilación, sombras, proporciones y comportamientos volumétricos que influyen en el desempeño pasivo. Finalmente, las observaciones adicionales recogen fenómenos no estructurados en los ítems anteriores y permiten afinar la comprensión holística del sistema vivienda, clima, habitante. En conjunto, la ficha técnica se configura como una herramienta rigurosa que integra datos cuantitativos y cualitativos para sustentar diagnósticos precisos y fundamentar propuestas de optimización bioclimática pertinentes para las condiciones rurales del territorio.

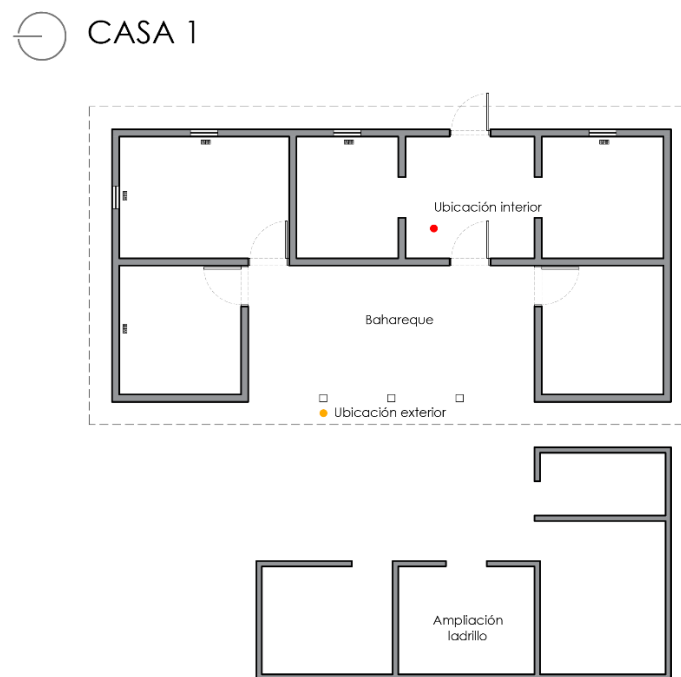
Fase II. Medición in situ de variables micro climáticas

Con el fin de caracterizar el desempeño térmico real de las viviendas, se efectuaron mediciones directas de temperatura del aire y humedad relativa usando como herramienta un *Termómetro higrómetro digital con sonda Htc-2*, cuyas especificaciones técnicas y rangos de precisión se presentan en el Anexo A. Previo a cada registro, el equipo fue calibrado y estabilizado durante un periodo de cinco (5) minutos, con el propósito de permitir su adaptación a las condiciones climáticas de cada espacio, para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos.

Las mediciones se realizaron tres veces al día (7:00 a.m., 12:00 p.m. y 4:00 p.m.) durante dos días en la semana, estas horas fueron elegidas con el fin de tomar las horas más representativas de las condiciones climáticas del día, siguiendo los lineamientos de la *NTC 4595 (Determinación de la temperatura y humedad relativa en ambientes interiores)* y la *ISO*

7726:1998 (*Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities*).

Las mediciones se realizaron en cada una de las viviendas en dos zonas representativas. La primera correspondió a un espacio interior, seleccionado entre la sala de estar o una habitación, en función de su uso predominante y permanencia de los ocupantes. La segunda medición se efectuó en un espacio de transición exterior: en el caso de las viviendas tradicionales, en los pasillos exteriores, y en el caso de las viviendas convencionales, en la puerta de acceso. La ubicación de los puntos de medición se presenta de manera gráfica por medio de una planta arquitectónica en el *Anexo B*.



Ejemplo de planta y lugar de medición:

Los datos recolectados fueron sistematizados en hojas de cálculo para su posterior análisis estadístico y correlación con las percepciones de confort reportadas por los usuarios.

Casos de estudio		Temp interior	HR	Temp exterior	HR	CLO	Temp interior	HR	Temp exterior	HR	CLO	Temp interior	HR	Temp exterior	HR	CLO
Materialidad	#Casa	7:00 am					12:00 pm					4:00 pm				
Casas de bahareque	Casa 1	21,8°	70%	21,9°	75%	M	24,7°	71%	26°	70%	B	25,2°	55%	28,6°	54%	B
	Casa 2	21,6°	75%	21,7°	75%	M	25°	76%	27°	70%	B	26,1°	59%	29,8°	59%	B
	Casa 3	21,3°	70%	21,9°	67%	M	24,5°	69%	25,7°	67%	B	26°	69%	27,6°	65%	B
	Casa 4	21,7°	70%	21,9°	75%	M	24,8°	70%	25,9	70%	B	25,5°	55%	28,4°	54%	B
	Casa 5	21,5°	74%	21,7°	75%	M	25°	75%	27,1°	70%	B	26,1°	65%	29,2°	58%	B
	Casa 6	21,6°	75%	21,8°	70%	B	24,7°	70%	26°	65%	B	25,5°	54%	28,7°	59%	B
Casa materiales convencionales	Casa 7	22,3°	67%	23°	68%	M	26,3°	59%	27,3°	65%	B	26,6°	61%	27,9°	63%	B
	Casa 8	21,4°	68%	22,2°	69%	M	25°	66%	28,7°	63%	B	29,3°	64%	26,6°	59%	B
	Casa 9	21,5°	71%	20,5°	69%	B	28°	60%	30°	60%	B	23,7°	61%	26,8°	56%	B
	Casa 10	22°	68%	22,8°	65%	B	26,5°	59%	27°	65%	B	26,2°	62%	27,5°	64%	B
	Casa 11	21,9°	68%	21,7°	69%	M	26,3°	58%	28,5°	64%	B	29,7°	64%	26,4°	59%	B
	Casa 12	21°	65%	20,6°	68%	M	28,5°	60%	29,9°	60%	B	28,1°	65%	27,1°	57%	B

Casos de estudio		Temp interior	HR	Temp exterior	HR	CLO	Temp interior	HR	Temp exterior	HR	CLO	Temp interior	HR	Temp exterior	HR	CLO
Materialidad	#Casa	7:00 am					12:00 pm					4:00 pm				
Casas de bahareque	Casa 1	21,2°	68%	22°	68%	M	23,1°	65%	25,9°	67%	B	23,6°	65%	28,5°	65%	B
	Casa 2	21°	70%	21,9°	67%	M	23,4°	65%	26,9°	65%	B	24,5°	70%	29,7°	64%	B
	Casa 3	20,7°	65%	21°	70%	M	22,9°	67%	25,6°	55%	B	24,4°	75%	27,5°	64%	B
	Casa 4	21,1°	70%	22,2°	65%	M	23,2°	64%	25,4°	55%	B	26,8°	61%	25,4°	55%	B
	Casa 5	20,9°	75%	21,9°	75%	M	23,4°	60%	27°	63%	B	24,5°	70%	29,1°	63%	B
	Casa 6	21°	65%	21,9°	75%	B	23,1°	62%	25,9°	59%	B	23,9°	68%	28,6°	65%	B
Casa materiales convencionales	Casa 7	21,7°	70%	22°	68%	M	25,6°	59%	27,5°	65%	B	26,3°	59%	27,5°	61%	B
	Casa 8	20,7°	65%	21,9°	70%	M	25,8°	52%	27,1°	59%	B	24°	59%	33,3°	57%	B
	Casa 9	21,8°	70%	22°	69%	B	26,4°	64%	25,7°	62%	B	25,4°	63%	27,2°	69%	B
	Casa 10	21,3°	70%	21,7°	75%	B	23,3°	67%	26,8°	64%	B	26°	58%	27°	60%	B
	Casa 11	21,2°	69%	22,5°	69%	M	26°	65%	27,5°	60%	A	24,5°	60%	29°	59%	B
	Casa 12	20,3°	65%	21,1°	65%	M	25,1°	58%	27,8°	67%	A	25,8°	62%	27°	60%	B

Tabla 1: Mediciones micro climáticas.

Las mediciones microclimáticas realizadas en las 12 viviendas muestran diferencias claras en su respuesta térmica frente a las condiciones ambientales propias de Riosucio, Caldas, caracterizado por un clima templado-húmedo con variaciones moderadas a lo largo del día. En términos generales, las viviendas construidas en bahareque presentan una menor amplitud térmica entre la mañana, el mediodía y la tarde, lo que evidencia una mayor estabilidad interior frente a las fluctuaciones externas. Por el contrario, las viviendas edificadas con materiales convencionales registran incrementos más pronunciados de temperatura al mediodía y en la tarde, junto con variaciones más amplias en la humedad relativa, reflejando una mayor susceptibilidad a los cambios atmosféricos.

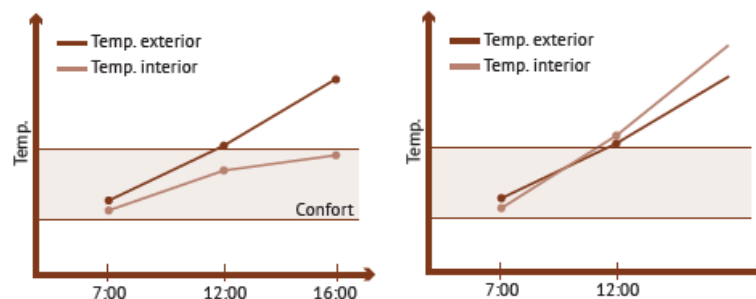


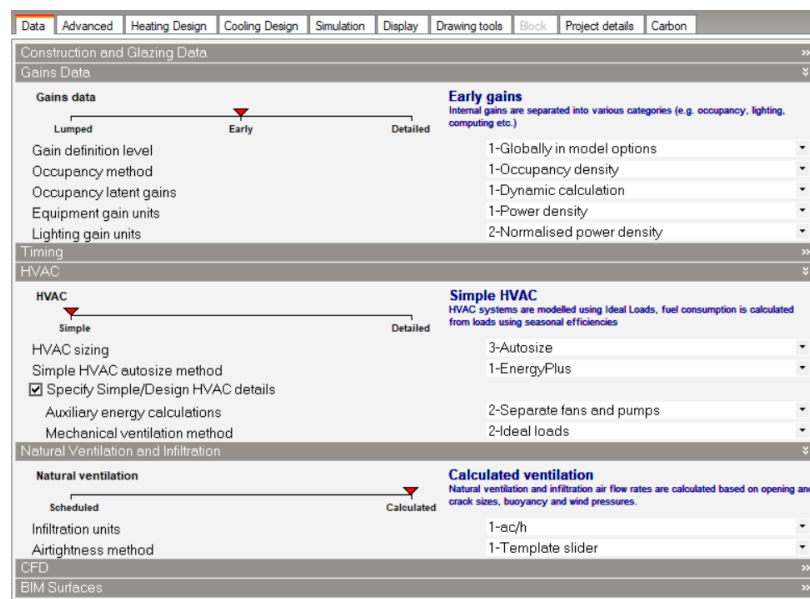
Gráfico diferencias horarias Casa tradicional y Casa convencional

Fase III. Simulación y análisis

La tercera fase metodológica corresponde a la evaluación del desempeño térmico y energético de las viviendas seleccionadas, mediante simulación computacional en el software DesignBuilder v7, que utiliza como motor de cálculo EnergyPlus. Esta herramienta fue escogida por su capacidad de integrar variables termofísicas de los materiales, condiciones climáticas locales y patrones de ocupación, proporcionando resultados precisos sobre la respuesta higrotérmica de las edificaciones en condiciones de ventilación natural.

El objetivo de esta fase fue evaluar el comportamiento térmico de las viviendas tradicionales (bahareque) frente a las viviendas convencionales (ladrillo), considerando la influencia de sus sistemas constructivos, materiales, y condiciones reales de uso y ocupación. También, se modelaron los elementos de protección solar existentes tales como aleros, voladizos, cortasoles y vegetación inmediata, considerando sus dimensiones reales y efectos sobre la radiación incidente.

La configuración del modelo en DesignBuilder se realizó definiendo un nivel de detalle “Early” para las ganancias internas, lo que permitió separar las cargas térmicas en categorías generales como ocupación, equipos e iluminación, utilizando densidad de ocupación, cálculo dinámico de ganancias latentes, densidad de potencia para equipos y densidad de potencia normalizada para iluminación.



Configuración de ganancias internas, ventilación natural y sistema HVAC en el modelo térmico de DesignBuilder

El sistema HVAC se estableció como Simple HVAC, basado en cargas ideales (Ideal Loads), con el dimensionamiento automático gestionado mediante EnergyPlus, con el fin de evaluar el comportamiento térmico del edificio sin introducir sistemas mecánicos reales. Asimismo, la ventilación natural se configuró bajo el método de ventilación calculada, permitiendo que los caudales de aire se determinen a partir del tamaño de las aberturas, la ocupación y las presiones inducidas por viento y flotación térmica; la infiltración se expresó en renovaciones de aire por hora (ach/h) y la hermeticidad se controló mediante un template slider, estableciendo así un modelo coherente para analizar el desempeño térmico pasivo de la vivienda bajo condiciones de ventilación natural.

Ventilación calculada

El análisis de la ventilación, se priorizó el comportamiento pasivo de ventilación natural, por lo que se desactivaron sistemas mecánicos de climatización. Se activó el módulo de ventilación natural (Natural Ventilation Model) de DesignBuilder, configurando seis (6) cálculos por hora para garantizar la precisión temporal del flujo de aire (simulación transitoria).

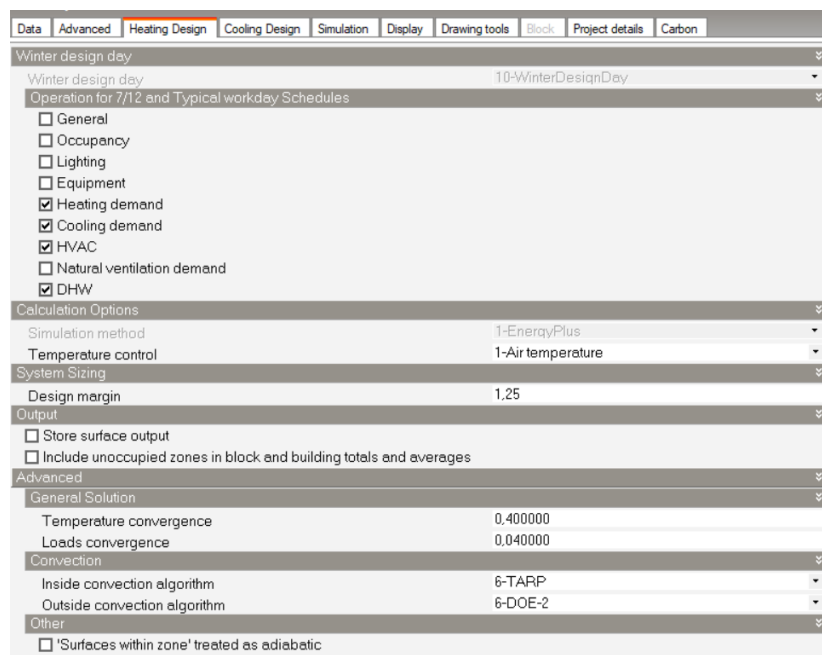
Las aperturas se programaron con base en la relación ventana/pared observada (WWR) y el sentido predominante del viento según la rosa de vientos local. Se evaluaron tres escenarios:

1. Ventilación mínima (ventanas cerradas)
2. Ventilación media (ventanas 100 % abiertas)
3. Ventilación cruzada completa

Asimismo, el módulo de Heating Design, se definió como método de simulación EnergyPlus y para establecer el control de temperatura del aire como variable de referencia para el cálculo de las demandas térmicas. Se activó bajo un esquema operativo de ocupación 7/12 y horarios típicos de día laboral.

El dimensionamiento del sistema se realizó incorporando un factor de margen de diseño de 1,25, con el fin de considerar incertidumbres asociadas a condiciones climáticas extremas y variaciones operativas. A nivel numérico, se definieron criterios de convergencia térmica y de cargas que garantizan la estabilidad del proceso de cálculo, junto con la selección de algoritmos de convección interior TARP y exterior DOE-2, ampliamente utilizados en simulaciones

energéticas dinámicas, permitiendo una representación consistente de los intercambios convectivos entre el aire y las superficies de la envolvente.

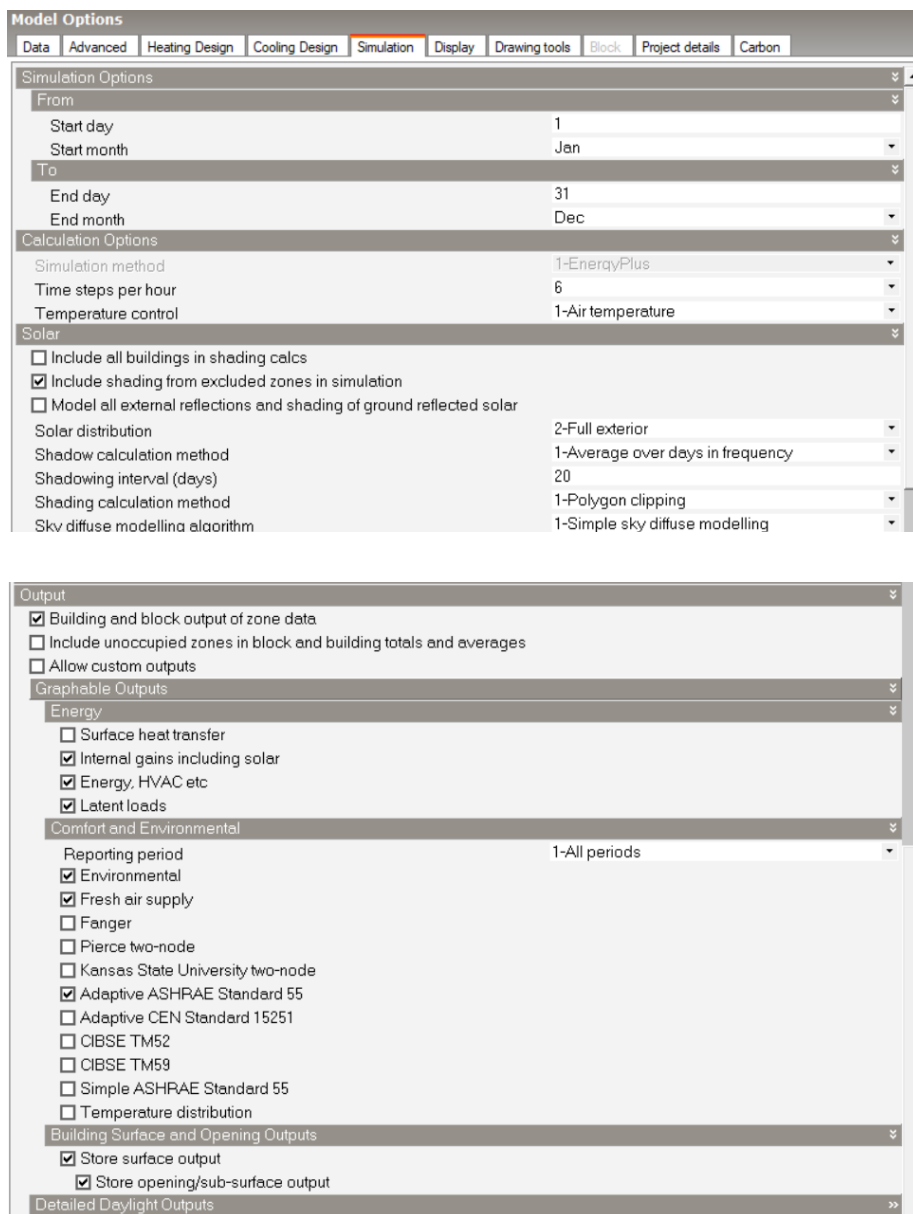


Configuración de módulo de Heating Design

La simulación térmica se configuró en el módulo Simulation para definir un periodo anual completo, desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre, con el método de cálculo dinámico EnergyPlus y un paso temporal de seis intervalos por hora, lo que permitió capturar con mayor precisión las variaciones horarias del comportamiento térmico.

El control térmico se estableció a partir de la temperatura del aire interior, y se activó el modelado de la radiación solar para considerar la distribución solar en todo el exterior, incorporando las sombras proyectadas por zonas excluidas del modelo y utilizando el método de polygon clipping para el cálculo de sombreadamientos, junto con un algoritmo simplificado para la radiación difusa del cielo. En cuanto a los resultados, se habilitó la generación de salidas gráficas energéticas y ambientales, incluyendo ganancias internas con aporte solar, cargas latentes, consumo energético y variables ambientales, así como el análisis de confort térmico mediante el modelo adaptativo de la norma ASHRAE 55, lo que facilitó almacenar adicionalmente los resultados de superficies y vanos.

Esta configuración permitió evaluar de manera integral el desempeño térmico pasivo de la vivienda y su respuesta frente a las condiciones climáticas a lo largo del año.

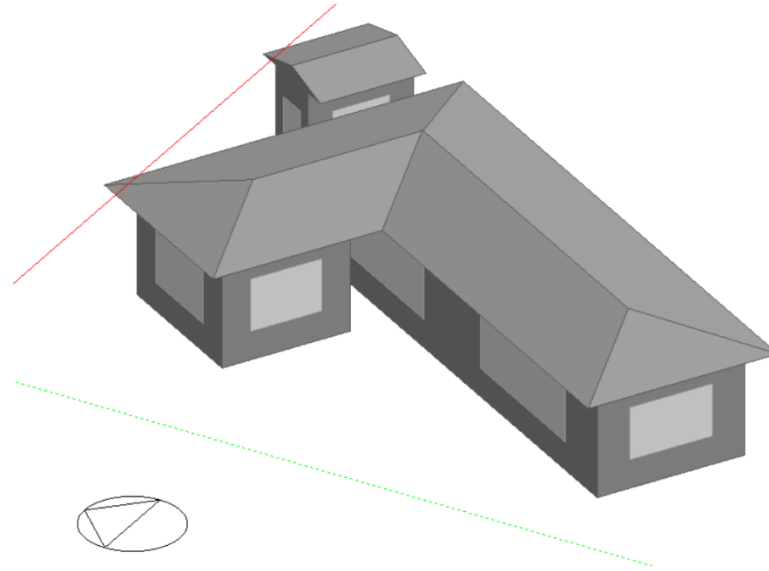


Configuración de módulo de simulación térmica

Fase IV: Modelado geométrico y definición del entorno climático

Cada una de las 12 viviendas fue modelada a partir de la información obtenida mediante levantamientos arquitectónicos realizados in situ, garantizando la fidelidad geométrica y espacial de las simulaciones. En los modelos se reprodujeron con precisión las dimensiones de los espacios interiores, la orientación, la disposición de vanos, así como la presencia y configuración de aleros y demás dispositivos de protección solar, tales como cubiertas,

persianas y elementos de arborización próxima. Esta caracterización detallada permitió representar de manera adecuada las condiciones reales de exposición solar y comportamiento térmico de cada vivienda. Los levantamientos arquitectónicos correspondientes a cada caso de estudio, tal como fueron incorporados en el programa de simulación, se presentan de forma detallada en el Anexo B.



Levantamiento 3D de la casa 02 en Designbuilder

El modelo climático se configuró con base en los datos del archivo EPW (EnergyPlus Weather File) correspondiente a la estación meteorológica más cercana al municipio de Riosucio, Caldas, garantizando la precisión de las variables de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, conforme a los registros históricos del IDEAM y a las recomendaciones de la ASHRAE Fundamentals (2017).

Configuración de materiales y sistemas constructivos

En este apartado fue importante la definición del valor de transmitancia térmica (U) constituye un insumo fundamental para la correcta representación del comportamiento térmico de la envolvente en el entorno de simulación DesignBuilder. Este parámetro permite modelar de manera cuantitativa el flujo de calor por conducción a través de los cerramientos opacos, estableciendo una relación directa entre las propiedades físico-térmicas de los materiales y el desempeño energético del edificio.

Sistema	R total (m ² K/W)	U = K (W/m ² K)
Bahareque	0,52	1,92
Bloque arcilla	0,34	2,94

De acuerdo con la norma ISO 6946 y con los fundamentos establecidos en ASHRAE, el valor U se define como el inverso de la resistencia térmica total del sistema constructivo ($U=1/R_{total}$), integrando las resistencias térmicas de cada una de las capas que conforman el elemento, así como las resistencias superficiales interior y exterior. En el contexto de DesignBuilder, esta caracterización se realiza mediante la configuración de cada material que compone el sistema constructivo, donde cada capa es definida a partir de su espesor, conductividad térmica, densidad y calor específico, permitiendo una simulación dinámica del intercambio térmico.

Para cada vivienda se configuraron los materiales que componen la envolvente térmica (muros, cubiertas, pisos y carpinterías), especificando sus propiedades termo físicas fundamentales: Conductividad térmica (λ) [W/m·K], Calor específico (Cp) [J/kg·K], Densidad (ρ) [kg/m³].

SISTEMA CONSTRUCTIVO BAHAREQUE				
Capa N°	Material	Espesor (m)	λ (W/m·K)	R (m ² K/W)
1	Pintura + estuco	0,005	0,87	0,006
2	Repello cemento	0,01	1,4	0,007
3	Barro + cañabrava	0,025	0,35	0,071
4	Cámara de aire (no ventilada, vertical)	0,10–0,12	—	0,18
5	Barro + cañabrava	0,025	0,35	0,071
6	Repello cemento	0,01	1,4	0,007
7	Pintura + estuco	0,005	0,87	0,006

SISTEMA CONSTRUCTIVO BLOQUE ARCILLA				
N°	Material	Espesor (m)	λ (W/m·K)	R (m ² K/W)
1	Pintura + estuco	0,005	0,87	0,006
2	Repello cemento	0,01	1,4	0,007
3	Bloque arcilla macizo	0,1	0,72	0,139
4	Repello cemento	0,01	1,4	0,007
5	Pintura + estuco	0,005	0,87	0,006

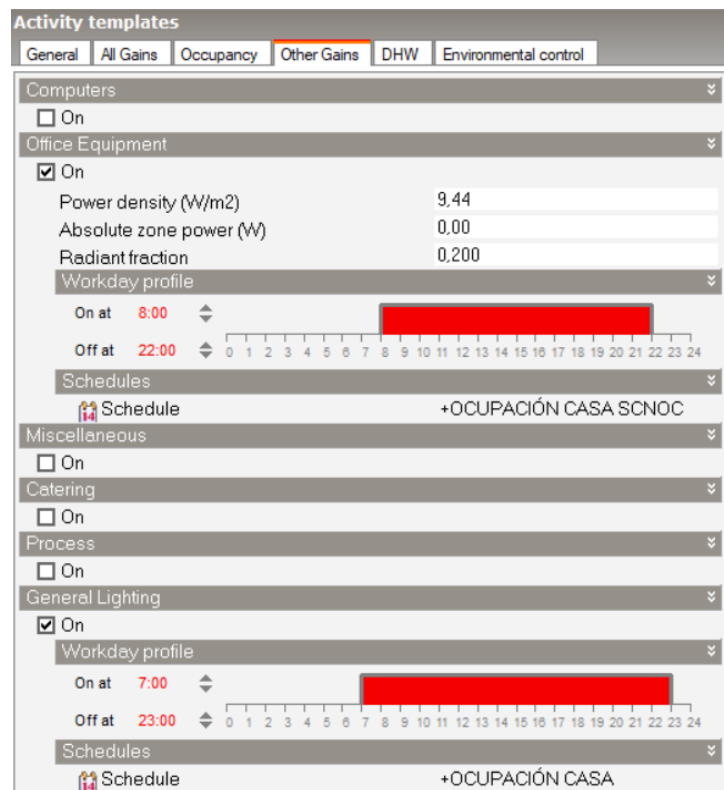
En el caso del bahareque, se consideró su composición multicapa (Pintura+estuco, barro+cañabrava, cámara de aire, barro+cañabrava y pintura+estuco), cuya conductividad térmica se ubicó entre 0,35 y 1,40 W/m·K.

Para las viviendas de bloque de arcilla, la conductividad se estableció en un rango de 0,72 a 1,40 W/m·K, con densidades aproximadas de 1600 a 1800 kg/m³.

La cubierta se modeló según su sistema predominante: teja de barro sobre estructura de madera para las viviendas tradicionales, y cubierta metálica con estructura liviana en las viviendas convencionales. Estos parámetros resultan determinantes en la transmitancia térmica (U-value) y la inercia térmica, que influyen directamente en la estabilidad térmica interior.

Estos valores fueron incorporados en el modelo energético como parte de la definición de la envolvente térmica, permitiendo que DesignBuilder simule de forma coherente el desempeño térmico de cada sistema bajo las condiciones climáticas locales y los escenarios de ventilación natural definidos para el proyecto.

Configuración de la actividad y cargas internas de la vivienda



Configuración de ganancias internas por equipos e iluminación en la plantilla de actividad de la vivienda en DesignBuilder

En la plantilla de actividad asociada a la vivienda se configuraron las ganancias internas por uso y equipamiento dentro del módulo *Other Gains* de DesignBuilder, activando las cargas correspondientes a equipos eléctricos e iluminación general. Para los equipos se definió una densidad de potencia de 9,44 W/m², con una fracción radiante del 20 %, representativa del aporte térmico sensible al espacio interior, y se estableció un perfil horario de funcionamiento entre las 08:00 y las 22:00, vinculado al calendario de ocupación de la vivienda. En el caso de la iluminación general, se asignó un horario operativo entre las 07:00 y las 23:00, asociado igualmente a un esquema de ocupación residencial. Estas configuraciones permitieron modelar de manera realista las ganancias térmicas internas derivadas del uso cotidiano de la vivienda, asegurando coherencia entre los perfiles de ocupación y la generación de cargas internas durante el ciclo diario de simulación.

Para estimar las cargas internas derivadas del uso cotidiano de las viviendas, se calculó la densidad de potencia interna (Power Density, W/m²), correspondiente a la sumatoria de la potencia eléctrica de todos los equipos presentes en cada vivienda dividida entre el área total construida. El promedio obtenido para las viviendas rurales, de aproximadamente 70 m², permitió asignar un valor representativo de 3,5 a 4,0 W/m², coherente con los perfiles de uso residencial de baja densidad energética descritos por Lechner (2015).

Asimismo, se configuraron las rutinas de ocupación y uso en función de los patrones etnográficos identificados durante la fase de campo. Se establecieron horarios diferenciados entre semana y fines de semana:

- Días laborales: predominio de desocupación parcial (habitantes fuera del hogar durante el día, con retorno en la tarde).
- Fines de semana: ocupación continua por parte de adultos mayores y presencia intermitente de otros miembros del núcleo familiar.

Esta configuración de la rutina permitió modelar la interacción térmica real entre el metabolismo humano (ganancia sensible y latente), la ventilación natural y la respuesta de los materiales en distintas condiciones de carga interna.

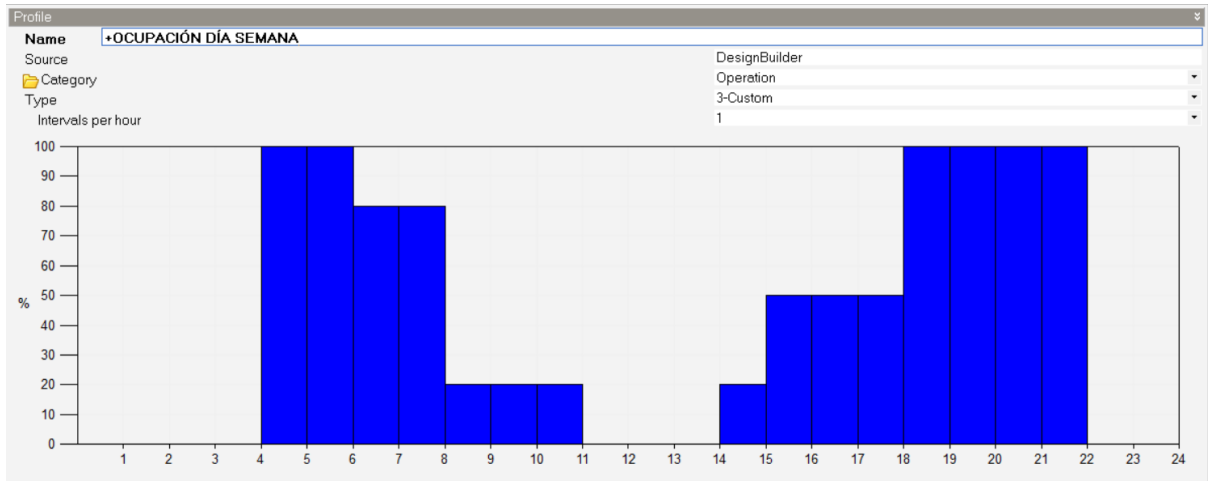


Diagrama día ocupación diaria implementados en las simulaciones de Desingbuilder

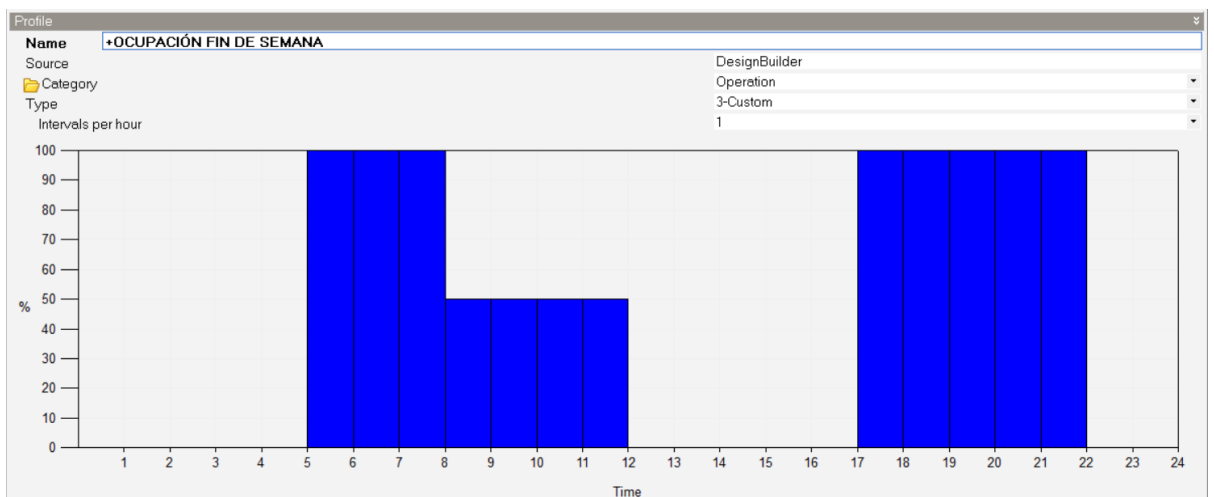


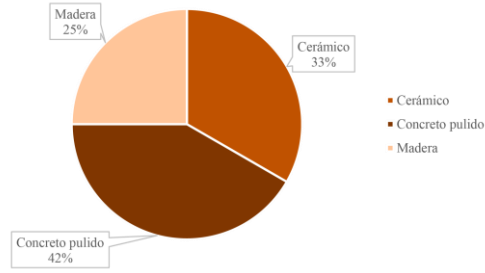
Diagrama día ocupación fin de semana implementados en las simulaciones de Desingbuilder

11. Resultados

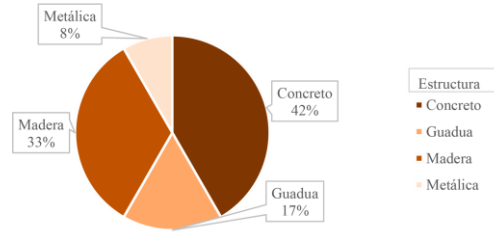
Los resultados y tabulaciones obtenidos a partir de la ficha técnica permiten consolidar, de manera sistemática, la información cuantitativa y cualitativa recopilada durante el proceso de caracterización de la vivienda rural campesina. A través de la organización de datos en tablas, gráficos y categorías comparativas, es posible identificar patrones constructivos, condiciones bioclimáticas, dinámicas de uso y niveles de confort térmico que emergen del análisis integrado del emplazamiento, los materiales, la envolvente y las percepciones de los habitantes. En la siguiente tabla se muestra la tabulación de resultados:

Elementos tectónicos y materiales

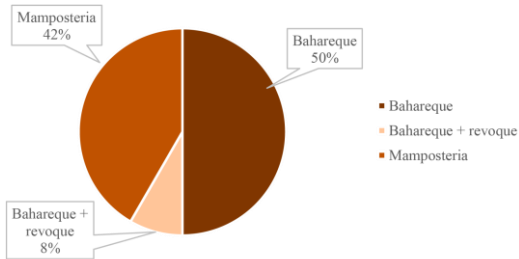
Materialidad pisos



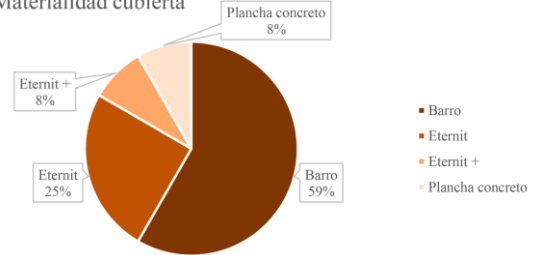
Materialidad estructura



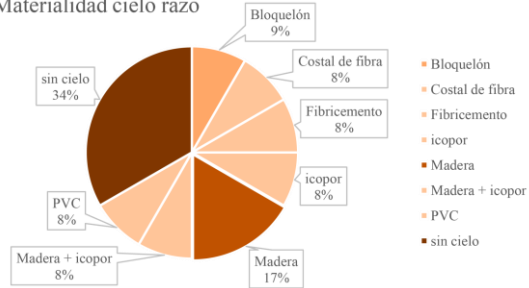
Materialidad muros



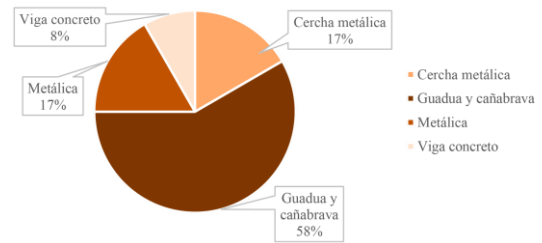
Materialidad cubierta



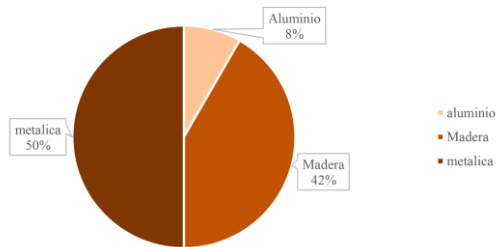
Materialidad cielo raso



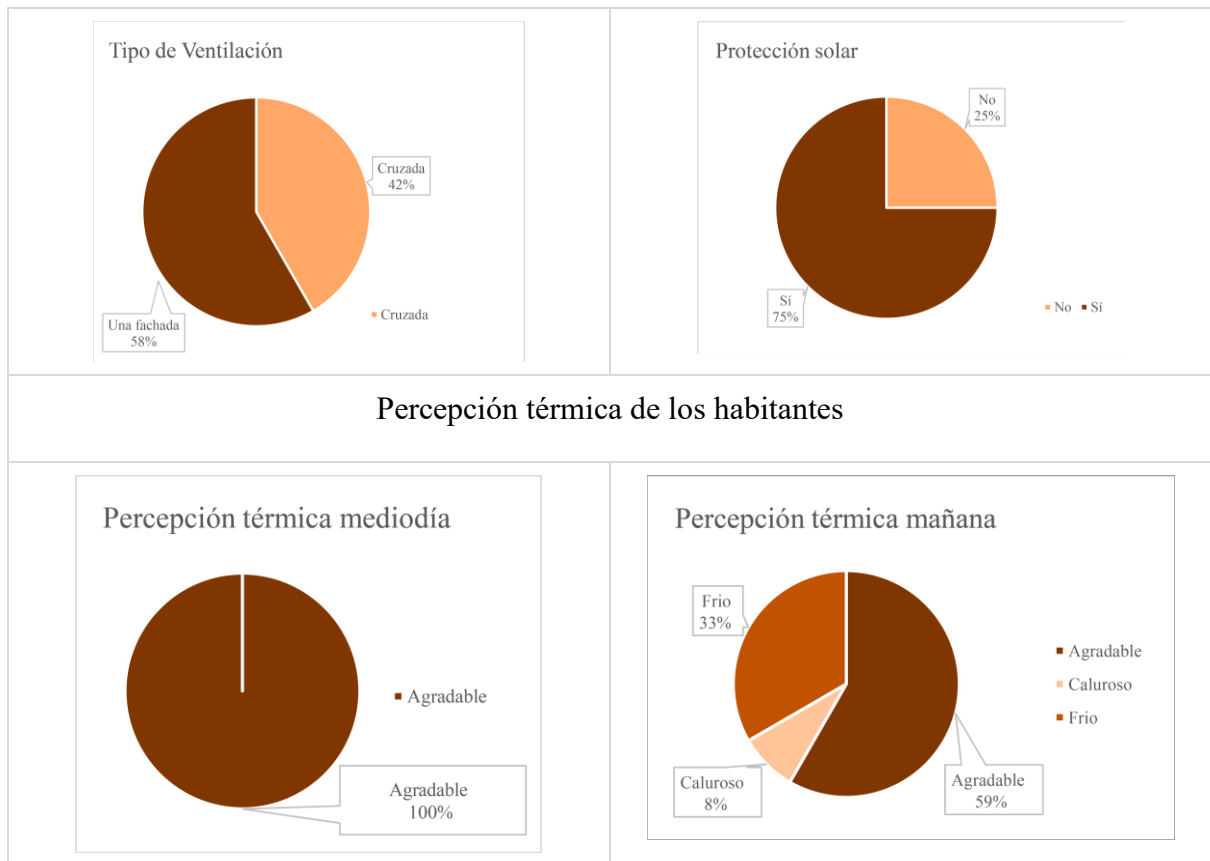
Estructura cielo raso



Materialidad puertas y ventanas



Uso de estrategias pasivas



11.1 Resultados de las simulaciones en Desingbuilder

Después de simular cada una de las casas en el programa Desingbuilder, se decide trabajar con la temperatura operativa del espacio seleccionado. Para tener una mejor interpretación se llevan estos datos de cada hora del año a archivo Excel, para posteriormente visualizarlos través de un gráfico de dispersión.

Este gráfico de dispersión representa la temperatura operativa (TO) en función del tiempo (Cada hora del año). Cada punto del gráfico corresponde a una hora específica y permite identificar el comportamiento térmico del espacio analizado a lo largo del periodo simulado o monitoreado. En este caso, el punto rojo representa el superávit, las horas de confort por encima del rango de confort, el punto verde las horas del año dentro del rango de confort y el punto azul las horas en que no se está dentro del rango de confort establecido.

Indicador y criterio de confort: se trabajó con temperatura operativa (TO) por hora del año y se clasificaron las 8.760 horas respecto al rango adaptativo ASHRAE 55 (edificios

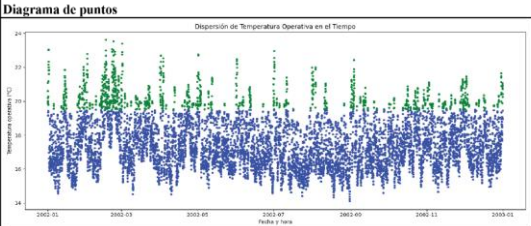
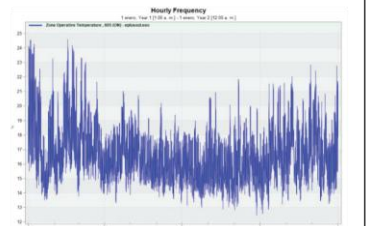
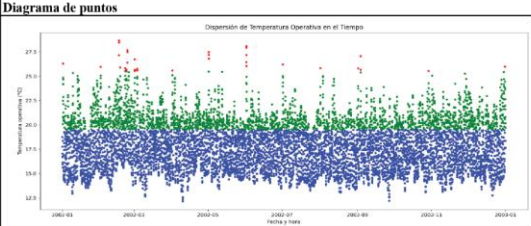
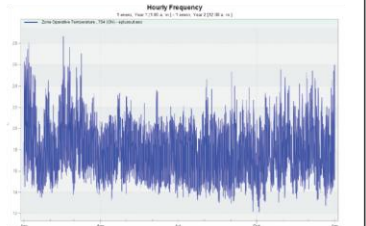
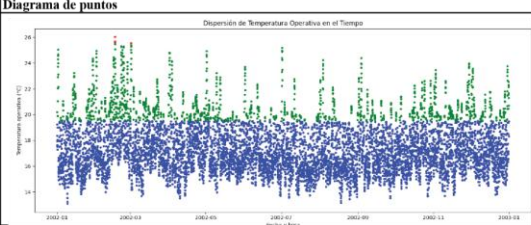
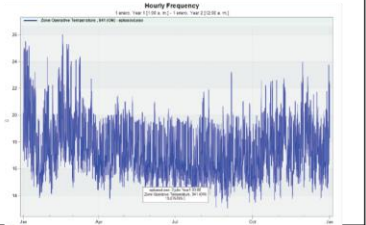
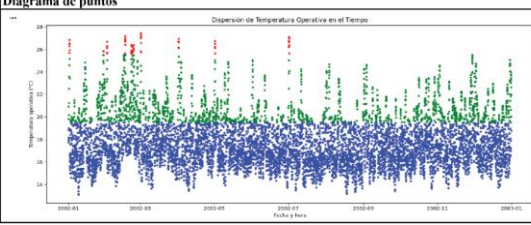
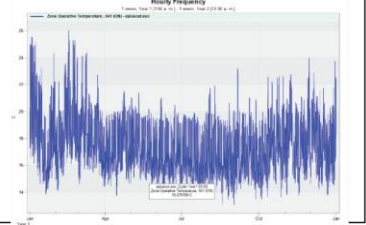
naturalmente ventilados): 80% aceptabilidad entre 19,9–26,9 °C; neutralidad local 23,4 °C (De Dear & Brager, 1998). Cada hora se codificó como:

Déficit (Rosa oscuro): por debajo de 19,9 °C

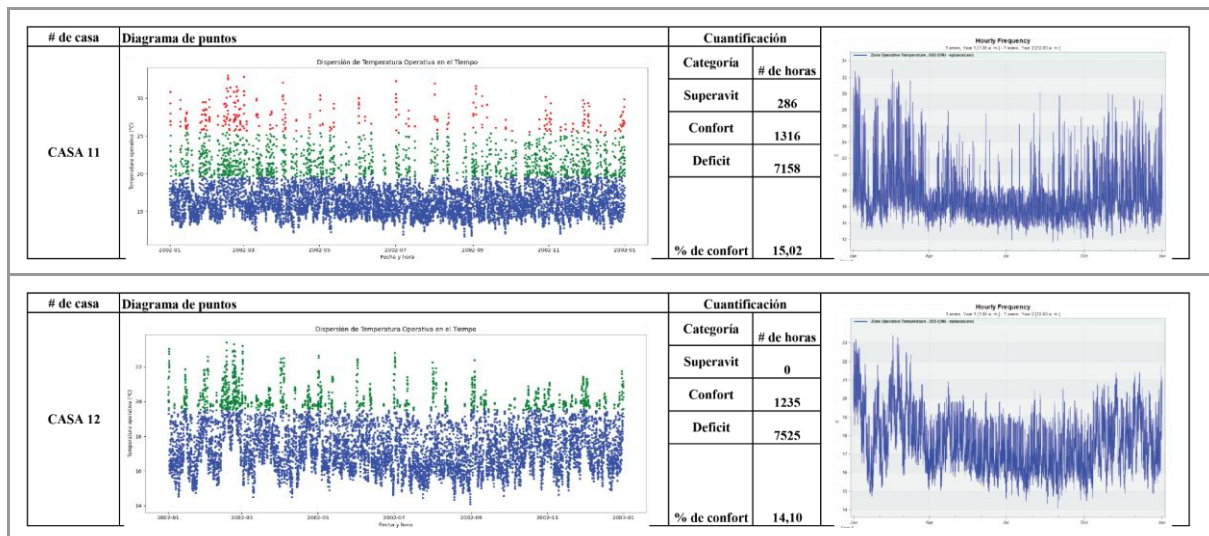
Confort (Rojo): dentro de 19,9–26,9 °C

Superávit (Rosa claro): por encima de 26,9 °C Los datos se exportaron a Excel para graficar la nube de puntos (TO vs. hora anual) y contabilizar horas en cada categoría.

Gráfico de dispersión (Superavit, confort y deficit)

# de casa	Diagrama de puntos	Cuantificación	Hourly Frequency										
CASA 01		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Categoría</th> <th># de horas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Superavit</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Confort</td> <td>1218</td> </tr> <tr> <td>Deficit</td> <td>7542</td> </tr> <tr> <td>% de confort</td> <td>13,90</td> </tr> </tbody> </table>	Categoría	# de horas	Superavit	0	Confort	1218	Deficit	7542	% de confort	13,90	
Categoría	# de horas												
Superavit	0												
Confort	1218												
Deficit	7542												
% de confort	13,90												
CASA 02		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Categoría</th> <th># de horas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Superavit</td> <td>33</td> </tr> <tr> <td>Confort</td> <td>2491</td> </tr> <tr> <td>Deficit</td> <td>6236</td> </tr> <tr> <td>% de confort</td> <td>28,44</td> </tr> </tbody> </table>	Categoría	# de horas	Superavit	33	Confort	2491	Deficit	6236	% de confort	28,44	
Categoría	# de horas												
Superavit	33												
Confort	2491												
Deficit	6236												
% de confort	28,44												
CASA 03		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Categoría</th> <th># de horas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Superavit</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Confort</td> <td>1527</td> </tr> <tr> <td>Deficit</td> <td>7229</td> </tr> <tr> <td>% de confort</td> <td>17,43</td> </tr> </tbody> </table>	Categoría	# de horas	Superavit	4	Confort	1527	Deficit	7229	% de confort	17,43	
Categoría	# de horas												
Superavit	4												
Confort	1527												
Deficit	7229												
% de confort	17,43												
CASA 04		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Categoría</th> <th># de horas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Superavit</td> <td>58</td> </tr> <tr> <td>Confort</td> <td>1901</td> </tr> <tr> <td>Deficit</td> <td>6801</td> </tr> <tr> <td>% de confort</td> <td>21,70</td> </tr> </tbody> </table>	Categoría	# de horas	Superavit	58	Confort	1901	Deficit	6801	% de confort	21,70	
Categoría	# de horas												
Superavit	58												
Confort	1901												
Deficit	6801												
% de confort	21,70												

# de casa	Diagrama de puntos	Cuantificación		Hourly Frequency
		Categoría	# de horas	
CASA 05		Superavit	4	
		Confort	1465	
		Deficit	7291	
		% de confort	16,72	
# de casa	Diagrama de puntos	Cuantificación		Hourly Frequency
		Categoría	# de horas	
CASA 06		Superavit	9	
		Confort	1770	
		Deficit	6981	
		% de confort	20,21	
# de casa	Diagrama de puntos	Cuantificación		Hourly Frequency
		Categoría	# de horas	
CASA 07		Superavit	0	
		Confort	1966	
		Deficit	6794	
		% de confort	22,44	
# de casa	Diagrama de puntos	Cuantificación		Hourly Frequency
		Categoría	# de horas	
CASA 08		Superavit	0	
		Confort	1423	
		Deficit	7337	
		% de confort	16,24	
# de casa	Diagrama de puntos	Cuantificación		Hourly Frequency
		Categoría	# de horas	
CASA 09		Superavit	0	
		Confort	1326	
		Deficit	7434	
		% de confort	15,14	
# de casa	Diagrama de puntos	Cuantificación		Hourly Frequency
		Categoría	# de horas	
CASA 10		Superavit	286	
		Confort	1316	
		Deficit	7158	
		% de confort	15,02	



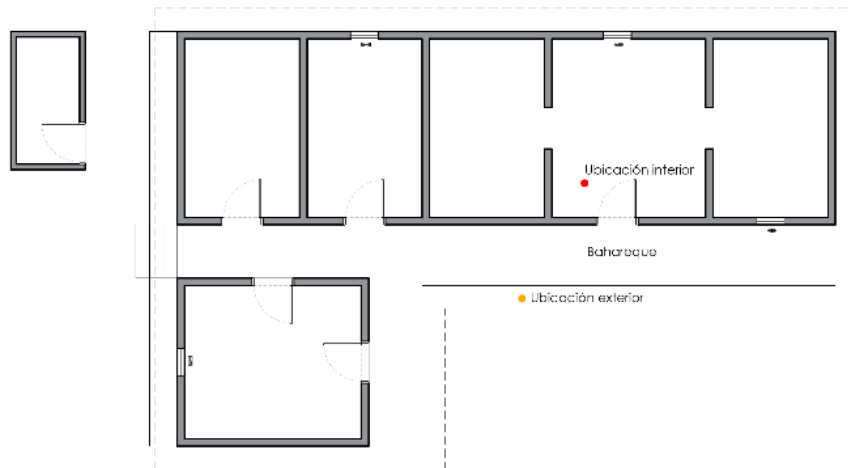
Nota: El gráfico de la derecha son las horas operativas de cada modelo de Desingbuilder.

Las gráficas de dispersión de temperatura operativa y su respectiva cuantificación horaria permiten evaluar el desempeño térmico pasivo de ambas viviendas a lo largo del año, identificando la proporción de horas en confort térmico, así como aquellas asociadas a déficit y superávit térmico, condiciones directamente relacionadas con la configuración de los sistemas constructivos y su transmitancia térmica (valor U).

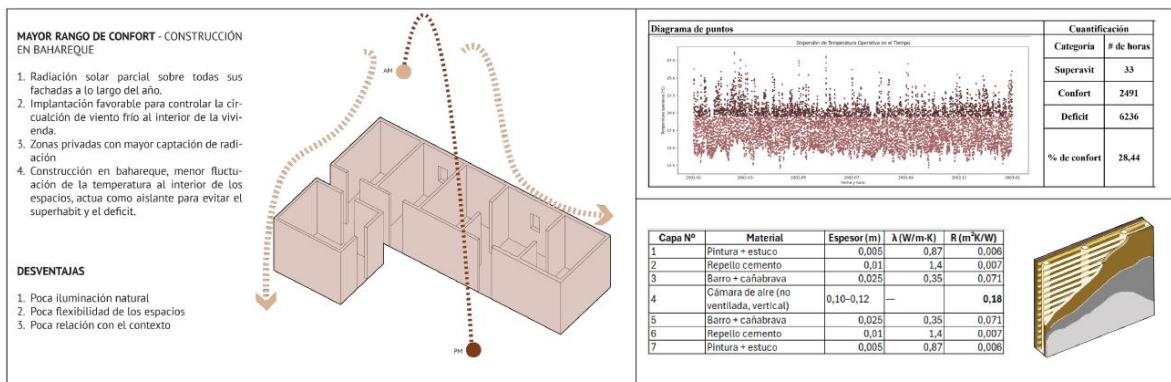
Este gráfico de dispersión permitió saber exactamente las horas de confort y déficit durante un año, lo que facilitó calcular el porcentaje de confort de cada una de las casas. De esta manera se encontró cuál de las 12 casas tenía el mayor porcentaje en horas de confort, en este caso fueron la casa tradicional 2 y la casa convencional 7, y cuales casas tenían el menor porcentaje de horas en confort.

Para entender mejor las características morfológicas y de orientación de las casas, se compararon la CASA 02 (mayor porcentaje en confort) vs CASA 12 (menor porcentaje en confort):

CASA 2



Planta arquitectónica casa 02



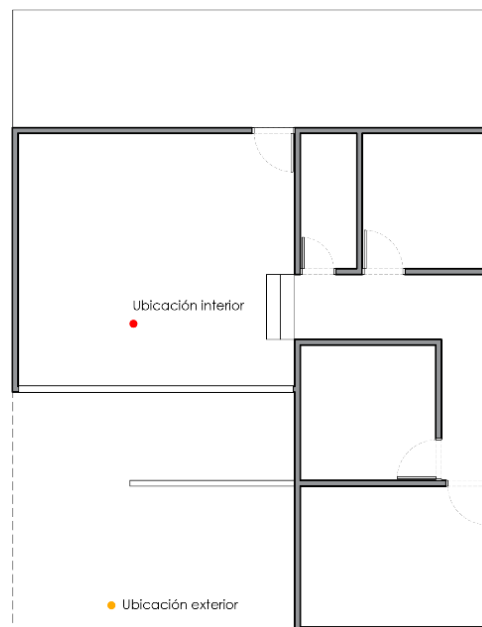
Análisis comparativo Casa 02

La CASA 02 presenta 2.491 horas en confort, lo que equivale a un 28,44 % del total anual, evidenciando una mayor capacidad del sistema constructivo para mantener la temperatura operativa dentro del rango de confort definido. En el diagrama de dispersión, esto se refleja en una concentración significativa de puntos dentro de la franja de confort, con una distribución relativamente estable a lo largo del año. La CASA 02 presenta una planta longitudinal, con una clara organización lineal de los espacios y un pasillo interior que permite el flujo de ventilación natural.

Esta configuración favorece una relación controlada entre superficie envolvente y volumen interior, reduciendo el área expuesta a pérdidas térmicas, aspecto clave en edificaciones naturalmente ventiladas ubicadas en climas templados–fríos o de alta variabilidad térmica diaria. Su orientación es 45% norte, donde el eje principal de la edificación se desarrolla predominantemente en sentido oriente–occidente, esta orientación resulta favorable en climas tropicales y templados porque: Reduce la exposición directa a radiación solar de baja altura en fachadas extensas, permite un mejor control de las ganancias solares mediante vanos más contenidos en fachadas oriente y occidente.

En contraste, la CASA 12 alcanza únicamente 1.235 horas en confort, correspondientes al 14,10 %, es decir, aproximadamente la mitad del tiempo de confort registrado en la CASA 02. Visualmente, la nube de puntos muestra una menor densidad dentro del rango comfortable, lo que indica una menor eficiencia térmica pasiva.

☉ CASA 12



Planta arquitectónica casa 12

La CASA 12 presenta una configuración espacial más cuadrada en comparación con la CASA 02, lo cual implica una mayor relación superficie–volumen (A/V). Presenta una orientación menos controlada desde el punto de vista bioclimático, con una mayor exposición de fachadas en direcciones oriente y occidente, sin una clara jerarquía longitudinal protegida, este factor incrementa el área de intercambio térmico con el exterior, favoreciendo las pérdidas

de calor por conducción, especialmente en climas con temperaturas medias bajas o alta amplitud térmica diaria. Esta condición geométrica se refleja directamente en los resultados de simulación, donde se evidencia un predominio marcado de horas en déficit térmico, con una menor capacidad del volumen construido para conservar el calor acumulado durante el día.

12. Propuesta de diseño

El resultado del proceso de diseño es la recopilación de toda la información obtenida en campo de la Vereda Miraflores en Riosucio Caldas, la lectura integral del territorio y el resultado de las simulaciones térmicas con Desigbuilder, esto permitió tener varios factores sobre la vivienda rural campesina y sus habitantes, lo cual llevó a verla como un sistema arquitectónico que coexiste en un contexto climático, topográfico, productivo y sociocultural específico.



Localización de la Vereda Miraflores en Riosucio Caldas

El proceso del café y su integración arquitectónica en la vivienda rural

El café, como sistema productivo campesino es una cadena de procesos postcosecha que condicionan la organización espacial, temporal y climática del habitar rural. Entre estas etapas, el secado del grano constituye un momento crítico, ya que de él depende en gran medida la calidad final del café, su estabilidad microbiológica y su valor comercial.



1. Cosechar



2. Selección del grano



3. Despulpar el grano



4. Secado del grano

Esquema del proceso del café

Tras la recolección y el despulpado, el café requiere reducir su contenido de humedad desde valores cercanos al 50–55 % hasta aproximadamente 10–12 %, rango que garantiza una conservación adecuada. Este proceso demanda condiciones térmicas específicas, con temperaturas elevadas y controladas, comúnmente entre 40 y 45 °C, acompañadas de ventilación moderada, evitando tanto el secado excesivamente lento que favorece la fermentación indeseada como el secado agresivo, que deteriora el grano.

Desde el punto de vista arquitectónico, la incorporación del proceso de secado del café dentro de la vivienda responde a la intención de integrar el espacio doméstico con la actividad productiva de la vida rural, recuperando una lógica propia del hábitat rural campesino, en la cual habitar y producir no constituyen funciones independientes, sino sistemas interdependientes que se articulan espacial y térmicamente.

Esta integración permite reducir desplazamientos y tiempos improductivos asociados al manejo postcosecha, incrementa el control sobre el proceso de secado, al situarlo en un espacio directamente vinculado a la vivienda. Asimismo, posibilita el aprovechamiento inmediato de las condiciones climáticas, particularmente de la radiación solar, fortalece la autonomía productiva del núcleo familiar, disminuyendo la dependencia de infraestructuras externas o soluciones energéticamente intensivas. En este sentido, la vivienda pasa a ser una infraestructura productiva climáticamente activa, capaz de responder simultáneamente a las necesidades de confort humano y a los requerimientos térmicos específicos del cultivo del café.

El secado del café constituye un principio bioclimático rector del diseño arquitectónico de la vivienda rural propuesta, en tanto orienta la configuración espacial, formal y material del proyecto hacia el aprovechamiento de estrategias pasivas como un recurso climático. La vivienda se concibe, como un invernadero que actúa como masa térmica, donde la organización por niveles, la orientación y la selección de materiales responden simultáneamente a los requerimientos del confort humano adaptativo y a las condiciones térmicas específicas del proceso de secado del café.

La intención era evitar que la unidad productiva se percibiera como un elemento añadido, el espacio de secado determina la lógica del conjunto arquitectónico, generando un efecto invernadero que permite captar, acumular y contener el calor en el nivel superior hasta 45°C, mientras se comporta como una masa térmica que calienta lentamente el nivel habitable para lograr mantenerlo dentro de los rangos de confort establecidos. De este modo, el diseño

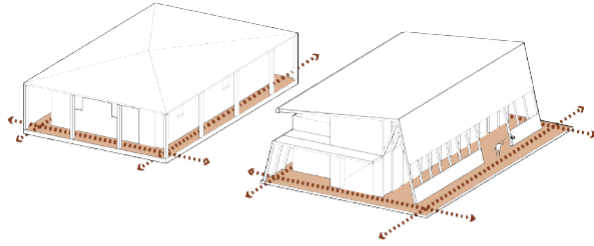
de la vivienda rural unifica el habitar con las necesidades agrícolas campesinas y se convierte en una arquitectura bioclimática pasiva, en la que forma, las estrategias pasivas y el clima se articulan de manera coherente para responder a las dinámicas del habitar campesino y a los principios contemporáneos de sostenibilidad. Posteriormente se dará mayor énfasis y se mostrará gráficamente la intencionalidad proyectual.

Con base en el carácter rural y naturalmente ventilado de la vivienda, se adoptó el modelo de confort adaptativo de la ASHRAE Standard 55 como marco conceptual para la toma de decisiones de diseño. A partir de la temperatura exterior media prevalente, se definió una temperatura de neutralidad de 23,4 °C y un rango de confort térmico del 80 % de aceptabilidad entre 19,9 °C y 26,9 °C.

Este rango fue asumido no como un valor absoluto, sino como un intervalo operativo flexible, reconociendo los procesos de adaptación fisiológica, conductual y cultural propios del habitar rural campesino. En consecuencia, el diseño buscó maximizar la permanencia de la temperatura operativa interior dentro de dicho rango mediante estrategias pasivas integradas.

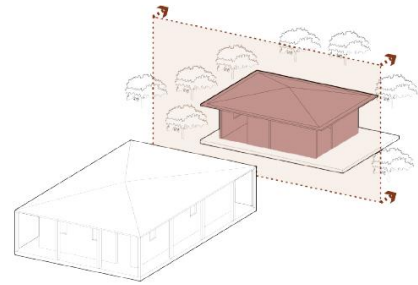
La implantación de la vivienda se definió y analizó a partir del análisis de la orientación solar de la Casa 02, la cual obtuvo mayor rango de horas en confort, además se evaluaron otras orientaciones en los programas mencionados anteriormente y la orientación longitudinal oriente–occidente, fue la que más ayudó a reducir la exposición de fachadas extensas a la radiación solar de baja altura, favorecer un control más eficiente de las ganancias solares diurnas y minimizar pérdidas térmicas asociadas a orientaciones críticas.

Desde una perspectiva morfológica y tipológica, la vivienda se concibió a partir de una reinterpretación crítica de los elementos arquitectónicos fundamentales identificados en las viviendas rurales analizadas. Entre estos, se destaca el pasillo perimetral o zaguán, cuya condición de espacio intermedio refuerza la relación interior–exterior y posibilita la generación de áreas de permanencia y transición climática. En la propuesta arquitectónica, este elemento no solo cumple un rol espacial y social, sino que se consolida como un eje de articulación funcional al establecer una conexión directa con las áreas destinadas a la postproducción del café, integrando así el habitar doméstico con la actividad productiva



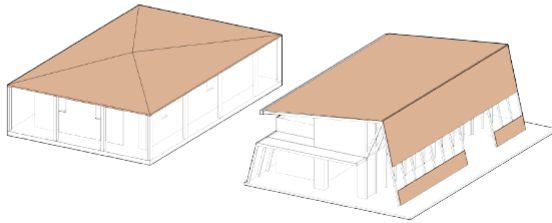
Pasillos perimetrales - Zaguán

Pasillos perimetrales como elemento estructurador del proyecto, del recorrido a la permanencia y la producción.



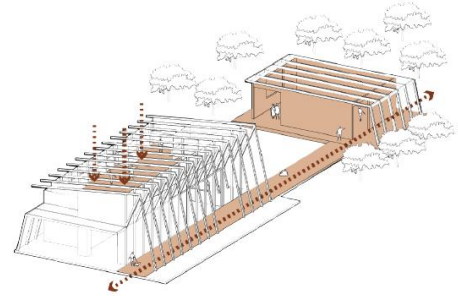
Producción agrícola (Actual)

Espacios de producción agrícola separada de espacios habitables, menor capacidad de almacenamiento.



Cubierta

La cubierta como envolvente de la fachada, se integra para reforzar los espacios de transición entre la vivienda y el exterior.



Producción agrícola (propuesta)

Integrar el proceso agrícola a la vivienda - aprovechamiento de 2do piso para secado de café y acumulación de calor para la noche.

Elementos de la vivienda rural campesina en la propuesta de diseño

Un segundo aspecto determinante corresponde a la unidad de producción agrícola del café, la cual, en la vivienda rural tradicional, suele disponerse de manera segregada del núcleo habitacional. En el proyecto, dicha unidad se integra deliberadamente a la vivienda, no solo como una respuesta funcional y cultural, sino también como una estrategia pasiva de diseño arquitectónico, al favorecer procesos de ventilación cruzada, control solar y masa térmica en coherencia con los principios de la arquitectura bioclimática y el confort adaptativo.

Finalmente, la cubierta se concibe como un elemento envolvente que trasciende su función de protección climática, extendiéndose para enmarcar los espacios de transición entre el interior y el exterior. Esta configuración contribuye al control de la radiación solar y la protección frente a la precipitación.

Estrategias de climatización pasiva:
 cerramientos con baja U en adobe y bahareque con cámara de aire para reducir pérdidas nocturnas de temperatura y aumentar la ganancia térmica durante el día.



Control solar: aleros y pieles en guadua/esterilla que permiten mantener un control óptimo de las ganancias internas por radiación.



Ventilación natural regulada: ventilación cruzada en todas las escalas del proyecto, permitiendo al usuario regular la temperatura interna de acuerdo a la percepción de confort. Permite o restringe la circulación de vientos predominantes en el sector.



Masa térmica: al cerrar las ventanas aumenta la ganancia térmica interna, la losa del segundo nivel funciona como una masa térmica que transfiere calor al interior durante la noche.



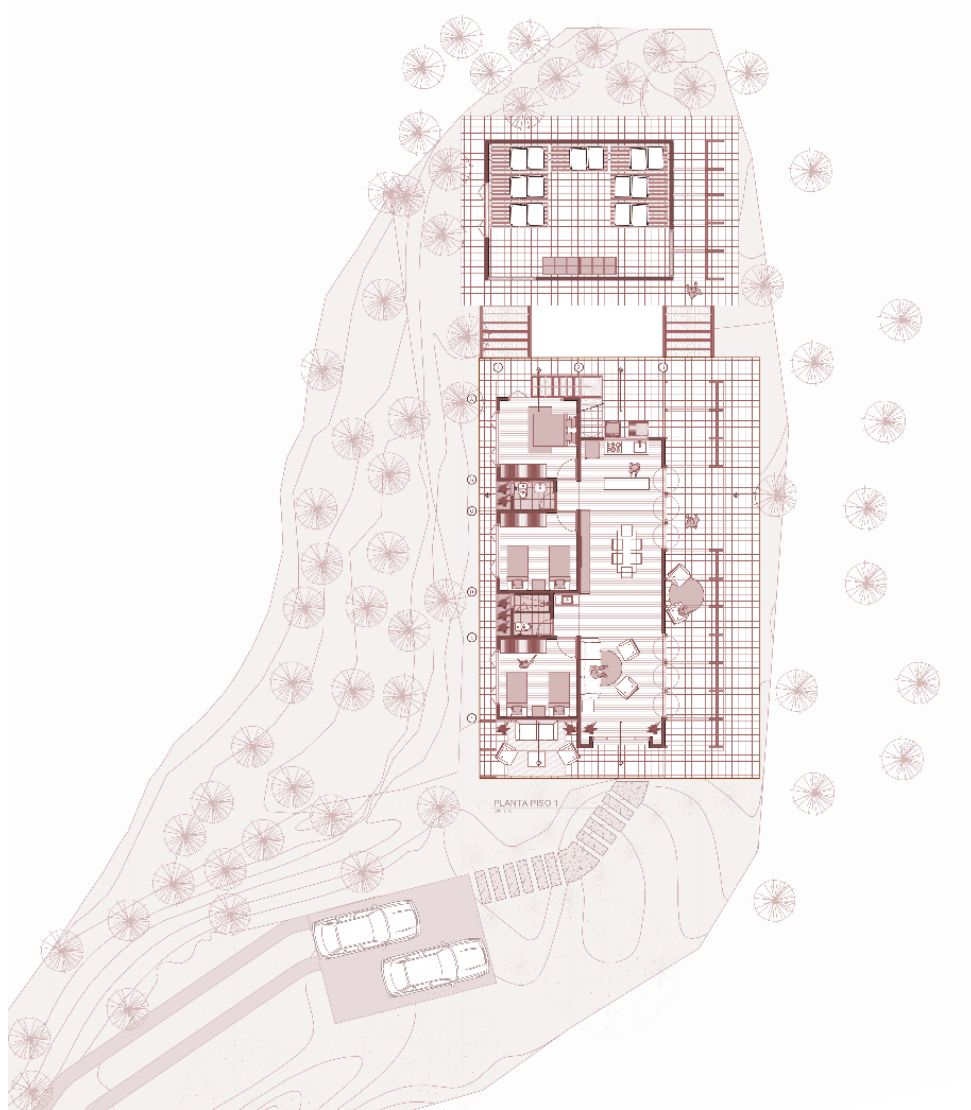
Nota: Se evaluó térmicamente la lona plástica perimetral frente al vidrio. Los resultados indicaron desempeños comparables en el régimen objetivo de secado; la decisión final privilegia lona plástica por criterios económicos y de viabilidad local, manteniendo aperturas para ventilación de alivio térmico y control de humedad.

Estrategias pasivas implementadas

El proyecto incorpora un conjunto integral de estrategias de climatización pasiva orientadas a optimizar el confort térmico y la eficiencia energética. Se emplean cerramientos de baja transmitancia térmica, con dobles acristalamientos y dispositivos de protección como aleros, quiebrasoles y pieles en guadua o esterilla, que permiten controlar las ganancias solares por radiación y reducir las pérdidas térmicas nocturnas, al tiempo que se favorece la captación de calor durante el día. La ventilación natural, mediante ventilación cruzada en las distintas escalas de la casa, posibilita al usuario ajustar las condiciones térmicas interiores según su percepción de confort, permitiendo además conducir o restringir la acción de los vientos predominantes del lugar. Complementariamente, la incorporación de masa térmica, especialmente en la losa del segundo nivel, contribuye a la inercia térmica del sistema, almacenando calor durante las horas de mayor radiación y liberándolo progresivamente durante la noche, estabilizando así la temperatura interior. Finalmente, las decisiones constructivas se respaldan en evaluaciones térmicas comparativas, priorizando soluciones viables en el contexto local, como el uso de lona plástica frente al vidrio, que garantizan un adecuado desempeño térmico, control de humedad y economía.

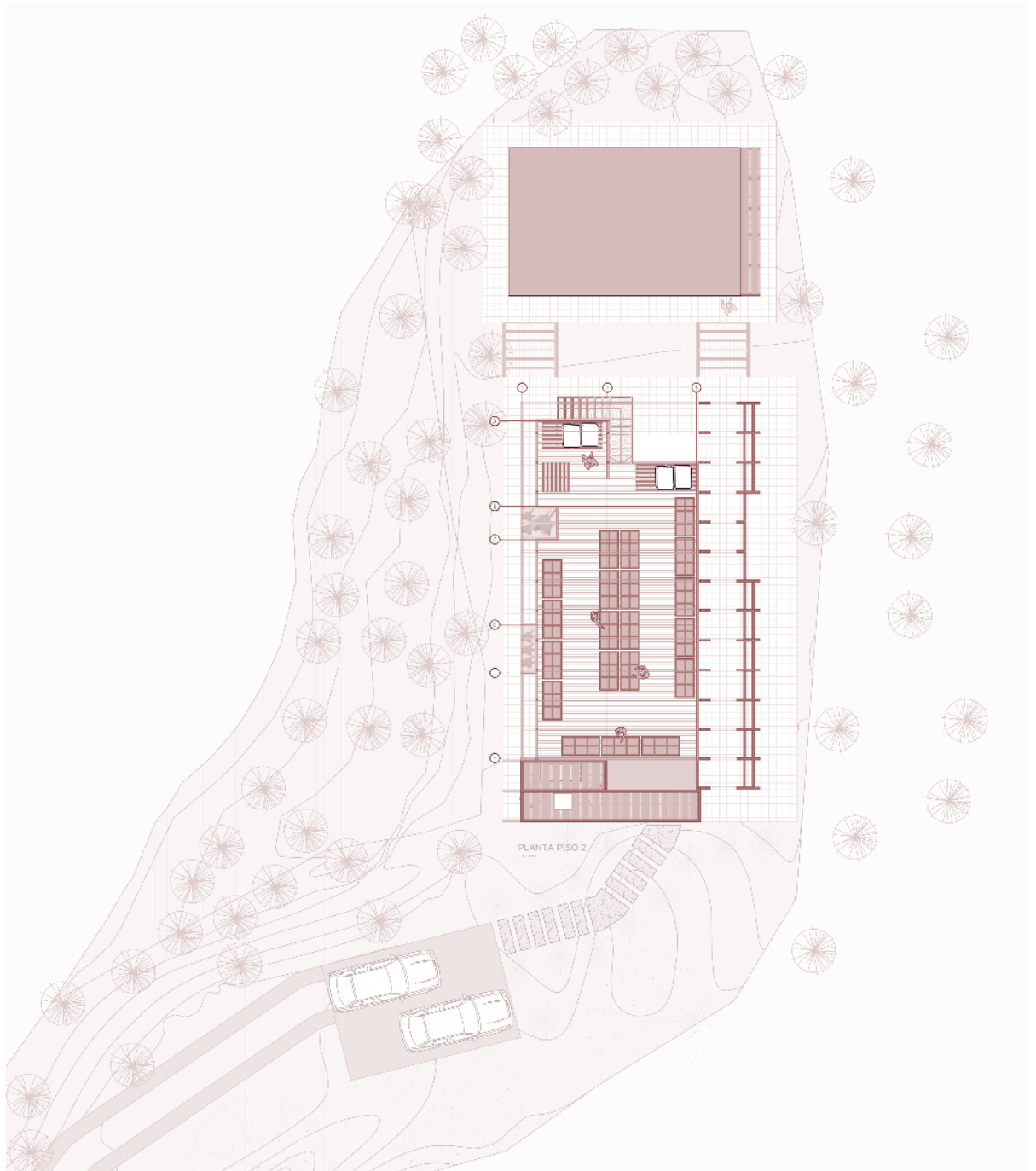
La implantación de la vivienda se resolvió mediante una relación respetuosa con la topografía existente, adaptándose a la pendiente natural del terreno, lo que permitió minimizar los movimientos de tierra, reducir el impacto ambiental y favorecer una integración armónica con el paisaje, coherente con los principios de sostenibilidad territorial y diseño bioclimático contextual.

La organización espacial se estructuró a partir de la jerarquización de espacios según su uso: espacios de con mayor permanencia durante el día ubicados hacia el oriente, con el fin de captar los primeros rayos del sol. En segundo lugar, los espacios con mayor permanencia en horas de la tarde y noche fueron ubicados hacia el occidente, para que a través de la inercia térmica de los materiales propuestos estos espacios logren absorber, almacenar y liberar calor en las horas de la noche.

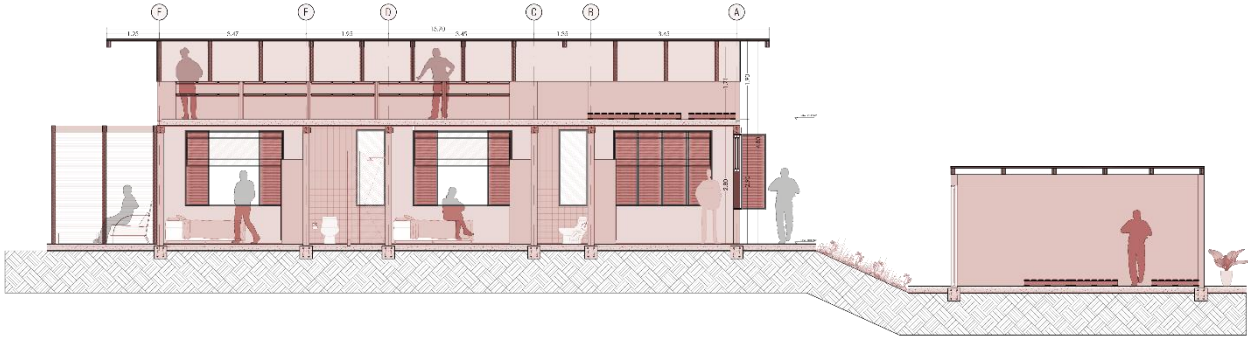


Planta arquitectónica piso 1: unidad habitacional

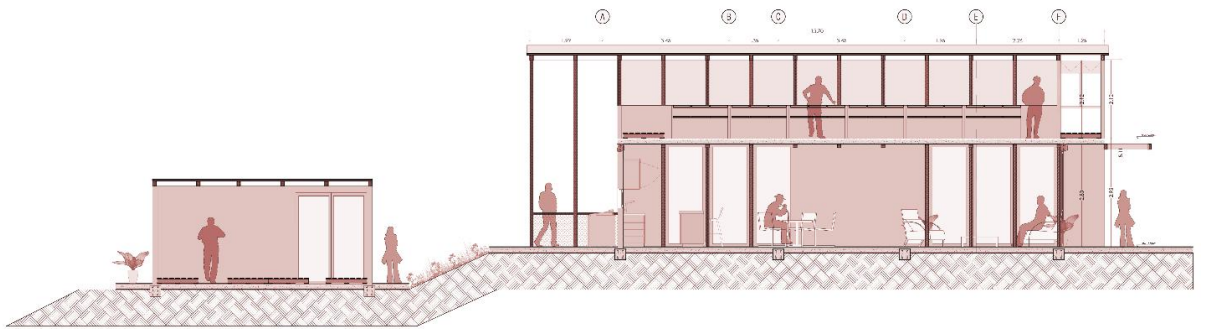
La organización espacial del segundo piso se dispone para la postproducción del café, específicamente del café, donde se ubicarán las mesas de secado, almacenamiento y bodega de herramientas. Esta segunda planta tiene la intencionalidad de funcionar como invernadero actuando como masa térmica, que absorbe, almacena y libera el calor hacia el primer piso, lo que permite mantener en el rango del confort a los habitantes de la vivienda, al tiempo que mantiene la temperatura adecuada en el segundo piso para el secado del café.



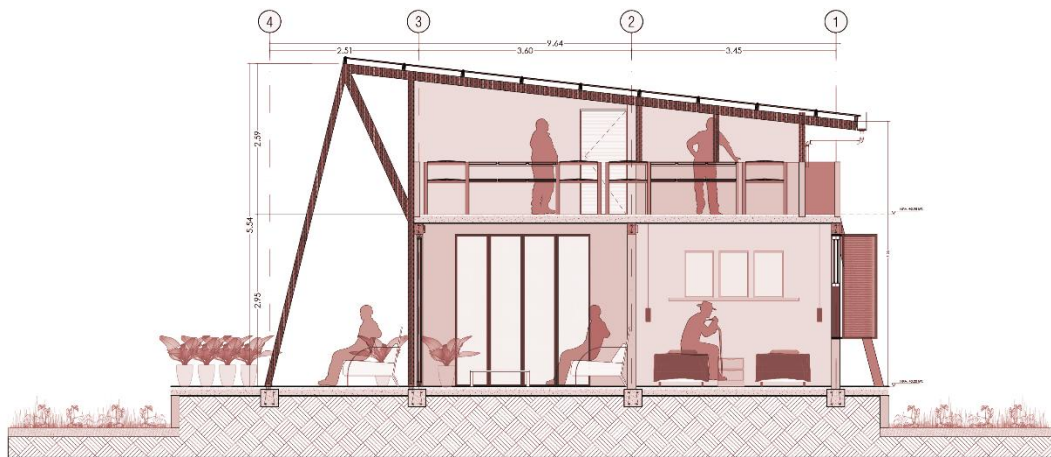
Planta arquitectónica piso 2: Secado del café



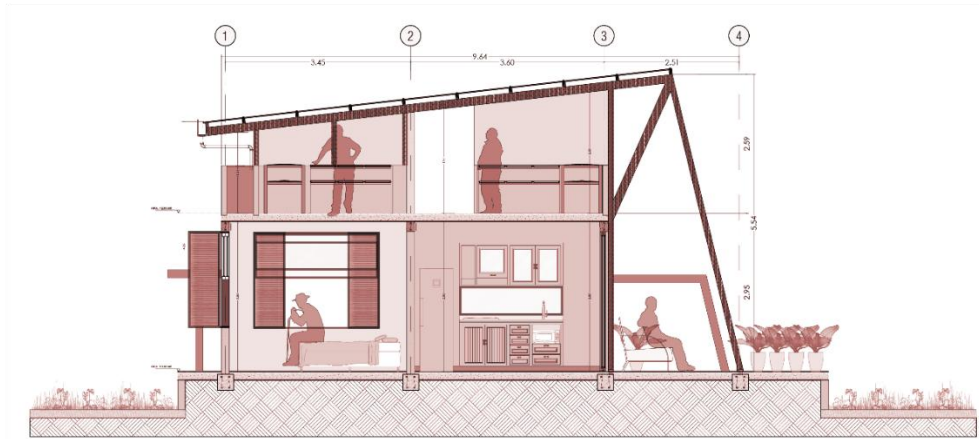
Corte arquitectónico longitudinal 01



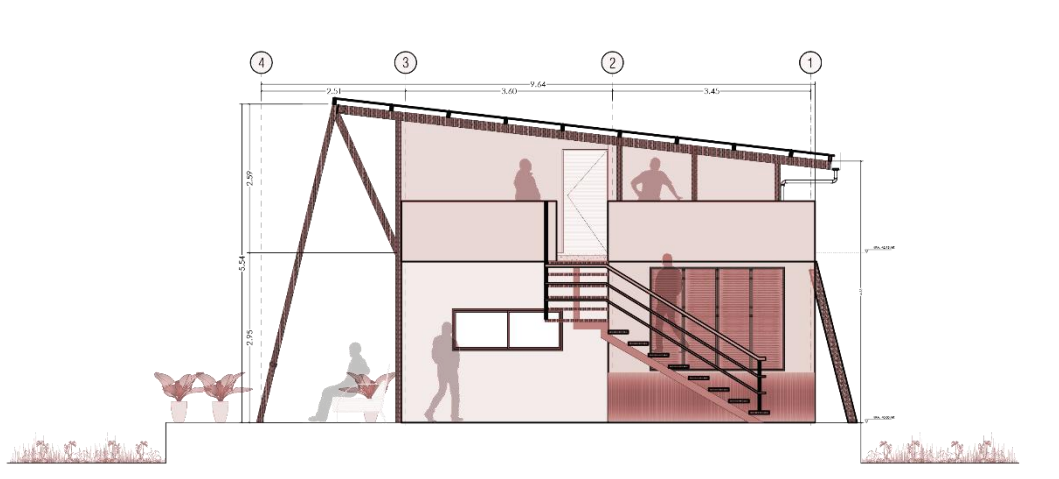
Corte arquitectónico longitudinal 02



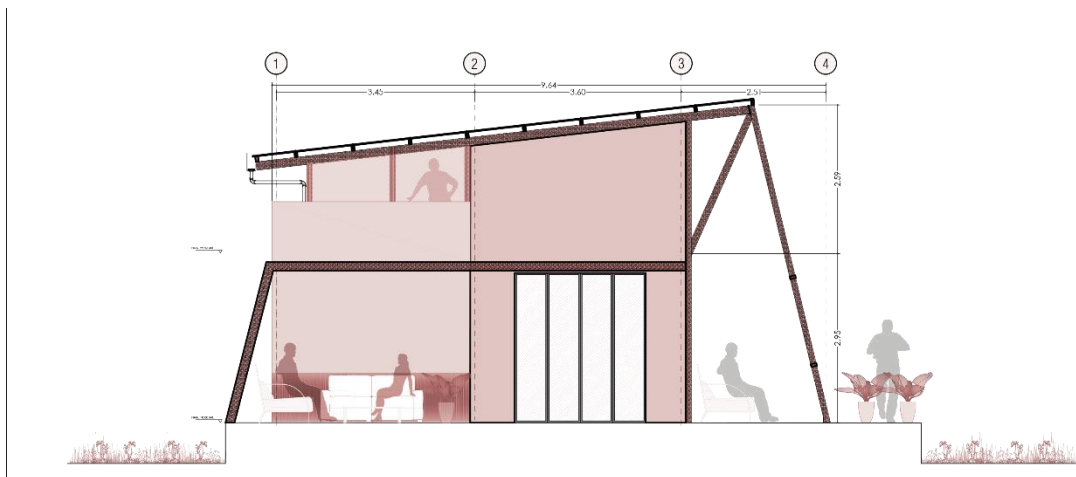
Corte arquitectónico transversal 03



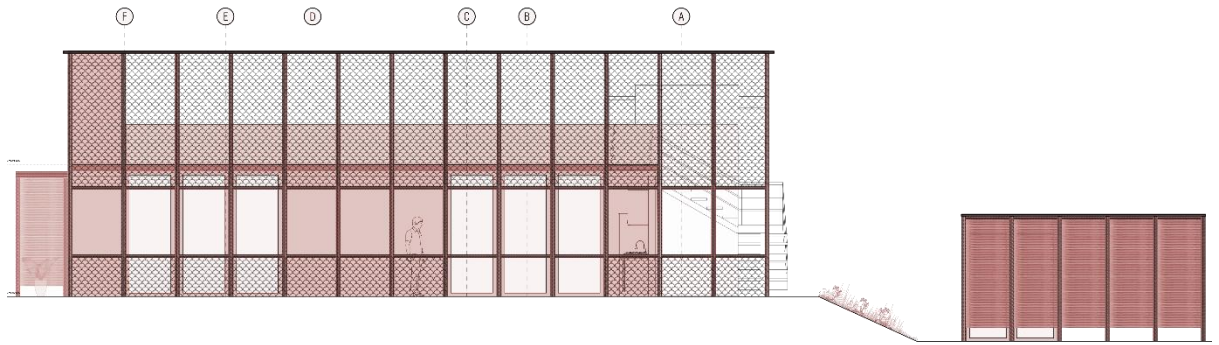
Corte arquitectónico transversal 04



Fachada noreste



Fachada suroeste



Fachada sureste



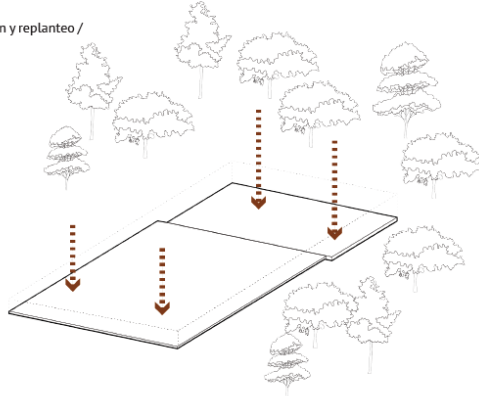
Fachada noroeste

La elección del sistema constructivo se fundamentó en criterios integrales de desempeño térmico, disponibilidad de materiales locales y coherencia cultural, priorizando el uso de bahareque y adobe, sistemas reconocidos por su bajo valor de transmitancia térmica (U) y su capacidad para amortiguar las oscilaciones térmicas propias del clima templado.

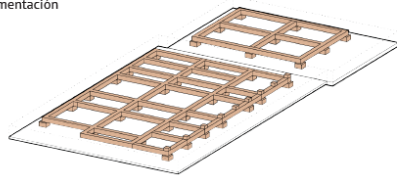
Esta selección se apoyó en los resultados de las simulaciones térmicas de las viviendas analizadas en campo, en las cuales ambos sistemas constructivos evidenciaron un alto número de horas dentro del rango de confort térmico. En este sentido, la investigación no busca establecer una jerarquía entre sistemas “mejores” o “peores”, sino demostrar que ambos pueden funcionar de manera complementaria, siempre que su aplicación responda de forma coherente a la relación entre la temperatura de neutralidad y el rango de confort definidos a partir del modelo de confort adaptativo. Estos parámetros fueron incorporados explícitamente en el modelo de simulación energética desarrollado en DesignBuilder, garantizando la coherencia entre las decisiones proyectuales y su evaluación térmica, así como la validez del análisis comparativo desde una perspectiva bioclimática.

Sistema constructivo: Se eligen sistemas tradicionales por su bajo valor U y alta inercia térmica, coherentes con el clima templado-húmedo de montaña. Se subraya que no hay jerarquía excluyente entre adobe y bahareque: se emplean de forma complementaria según función, orientación y requerimiento de inercia.

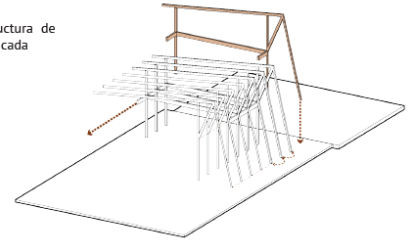
Etapa 01
Localización y replanteo / excavación



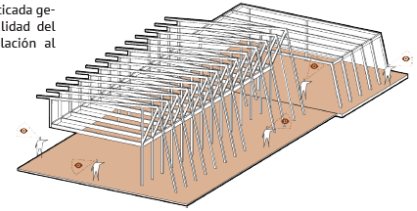
Etapa 02
Fundición de zapatas y vigas de cimentación



Etapa 03
Instalación estructura de madera prefabricada

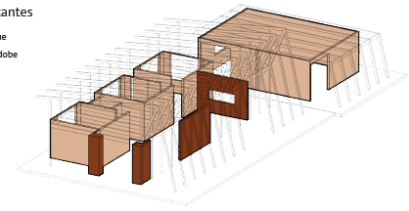


Etapa 04
Estructura apuntalada genera la espacialidad del proyecto en relación al exterior



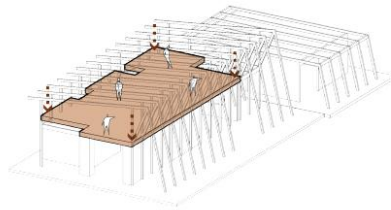
Etapa 05
Instalación de muros divisorios y portantes

■ Muros en bahareque
■ Muros en bloque adobe

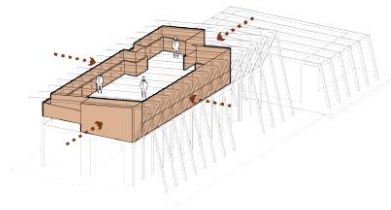


Proceso constructivo de la vivienda rural propuesta

Etapa 06
Fundición de losa maciza en concreto - Masa térmica



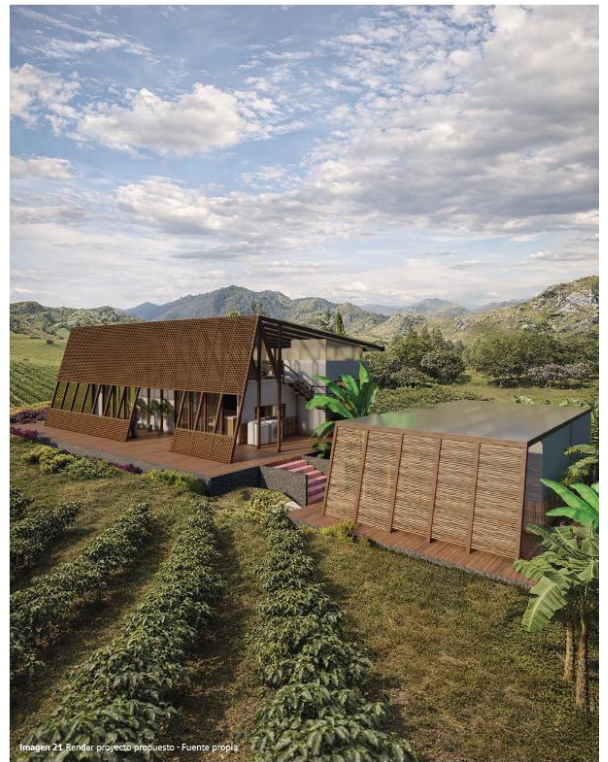
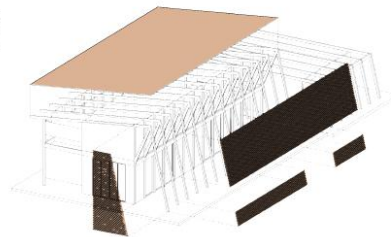
Etapa 07
Cerramiento 2do nivel en lona plastica (invernadero)



Etapa 08
Instalación de cubierta y membrana en fachada (elementos culturales de la zona)



Membrana en guadua traslapada realizada por los habitantes del sector

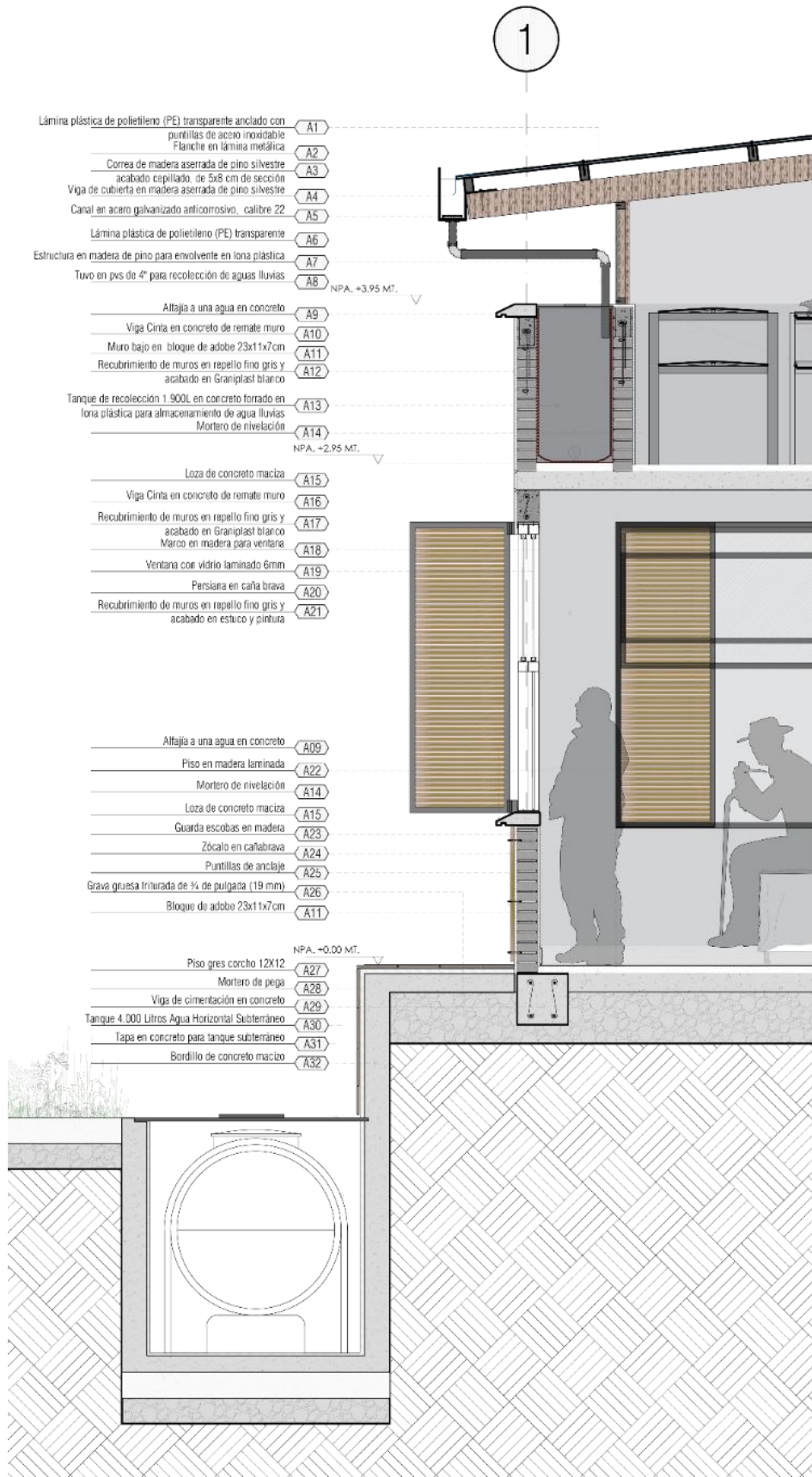


Proceso constructivo de la vivienda rural propuesta

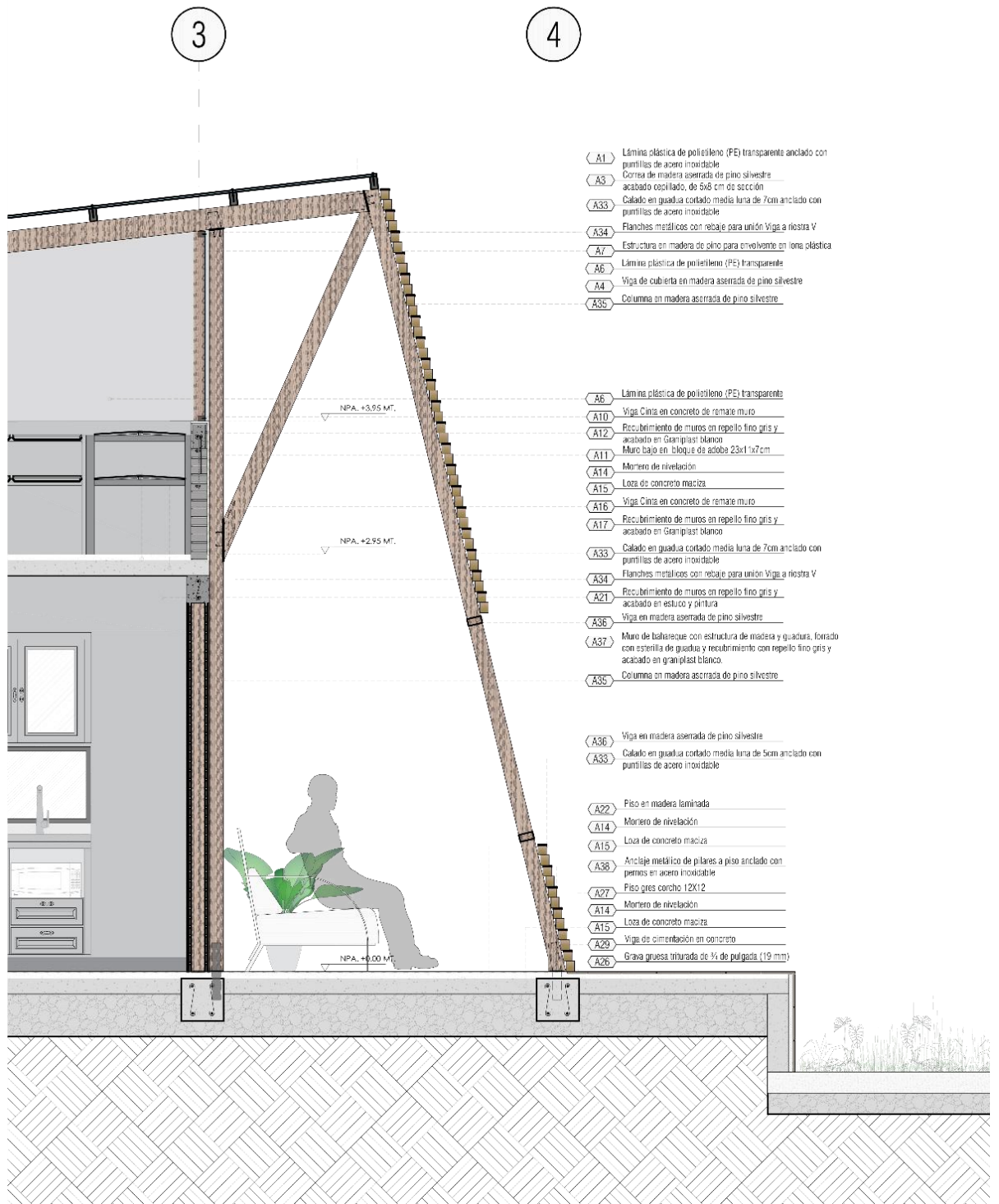
Las imágenes ilustran la configuración del sistema constructivo propuesto, en el cual se articulan muros portantes en bloque de adobe, con acabados de repello, estuco y pintura, destinados al bloque de habitaciones, y un sistema estructural porticado en madera y bahareque para la zona social. Esta estrategia constructiva responde tanto a criterios estructurales como bioclimáticos, permitiendo la integración de la cubierta en correspondencia con la modulación de los espacios interiores. Asimismo, se incorporan elementos constructivos y formales representativos de la arquitectura rural campesina, particularmente la guadua, empleada en el diseño de fachadas y de la envolvente arquitectónica. Dichos elementos cumplen una función fundamental, al actuar como dispositivos de control de la radiación solar directa y de protección frente a las condiciones climáticas exteriores, contribuyendo al mejoramiento del desempeño térmico interior de la vivienda y al confort de los habitantes.

En coherencia con lo anterior, el diseño arquitectónico incorpora de manera integrada un conjunto de estrategias pasivas orientadas al control térmico, entre las cuales destaca la optimización de la envolvente arquitectónica mediante el uso de cerramientos con bajo valor de transmitancia térmica (U), como el adobe y el bahareque. Estos sistemas constructivos se disponen en el primer nivel, correspondiente al área habitacional, con el objetivo de reducir las pérdidas térmicas durante las horas de menor temperatura y favorecer condiciones de estabilidad higrotérmica interior. De forma complementaria, se integran espacios de transición climática, tales como pasillos de permanencia, que actúan como amortiguadores térmicos entre el ambiente exterior y los espacios interiores.

Para el segundo nivel, destinado a la zona de secado del café, se proponen cerramientos perimetrales en lona plástica, combinados con aperturas estratégicamente dispuestas para la ventilación natural regulada, permitiendo modular el intercambio térmico y de aire entre el interior y el exterior según las condiciones climáticas. Este material fue evaluado comparativamente frente a soluciones en vidrio, obteniendo resultados de desempeño térmico similares; no obstante, el criterio económico resultó determinante en la selección final, priorizándose la lona plástica por su menor costo y viabilidad constructiva en el contexto del proyecto.



Corte por fachada Noroeste



Corte por fachada Sureste

Estas estrategias fueron concebidas y aplicadas de manera sinérgica, evitando soluciones aisladas o tecnologías ajenas al contexto rural, y reforzando una aproximación

bioclimática integral, coherente con las estrategias pasivas desde la arquitectura y la sostenibilidad del hábitat rural.

Como parte de la estrategia de sostenibilidad pasiva del proyecto, se priorizó el aprovechamiento de la iluminación natural mediante decisiones morfológicas, espaciales y de control solar integradas al diseño arquitectónico.

La vivienda propuesta muestra un desempeño lumínico optimizado, con valores de **DF** superiores al 2 %, e incluso incrementados en áreas centrales, lo que favorece una distribución más homogénea de la luz natural. La **DA** se sitúa en rangos entre el 60 y el 70 % del tiempo anual con iluminancias mínimas de 300 lux, reflejando una mayor autonomía lumínica frente a la tipología de referencia. El indicador **UDI** se concentra predominantemente en el intervalo de 100 a 2.000 lux, asegurando condiciones adecuadas de confort visual a lo largo del año. Asimismo, el **ASE** se mantiene controlado por debajo del umbral del 10 % del área útil, evidenciando un adecuado control de la radiación solar directa y una mitigación efectiva de deslumbramientos y cargas térmicas asociadas.

Iluminación vivienda propuesta

DF: Min 4.63% / Max 5.18%
promedio 4.73% condición lumínica óptima, no requiere de iluminación artificial para su uso.

ASE: 0% en ningún momento del año los espacios están expuestos a más de 1000 Lux, por lo que no presenta problemas de deslumbramiento.

UDI: 80% del año los espacios se encuentran iluminados uniformemente de manera natural.

DA: 82% del tiempo logramos mantener niveles de iluminación óptimos por encima de los 300lux.

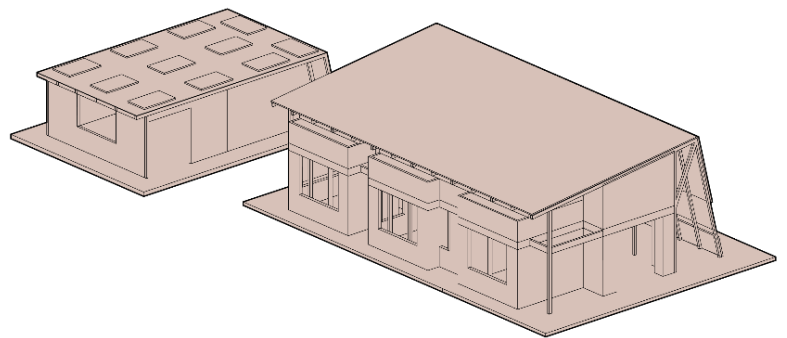


Gráfico iluminación vivienda propuesta.

La integración del proceso de secado del café dentro de la vivienda responde a un enfoque bioclimático integral, en el cual la arquitectura se concibe como un dispositivo climático pasivo, capaz de aprovechar de manera eficiente la radiación solar disponible para satisfacer una necesidad productiva específica, sin recurrir a sistemas activos. En este sentido, el espacio destinado al secado se configura como un invernadero solar, diseñado para

maximizar la ganancia térmica mediante una elevada exposición a la radiación solar, el empleo de materiales de alta transmisividad, como la lona plástica, y la reducción controlada de las pérdidas convectivas a través de la regulación del flujo de aire. Como resultado de esta estrategia, el recinto puede alcanzar temperaturas del orden de 45 °C, adecuadas para el proceso de secado del café.

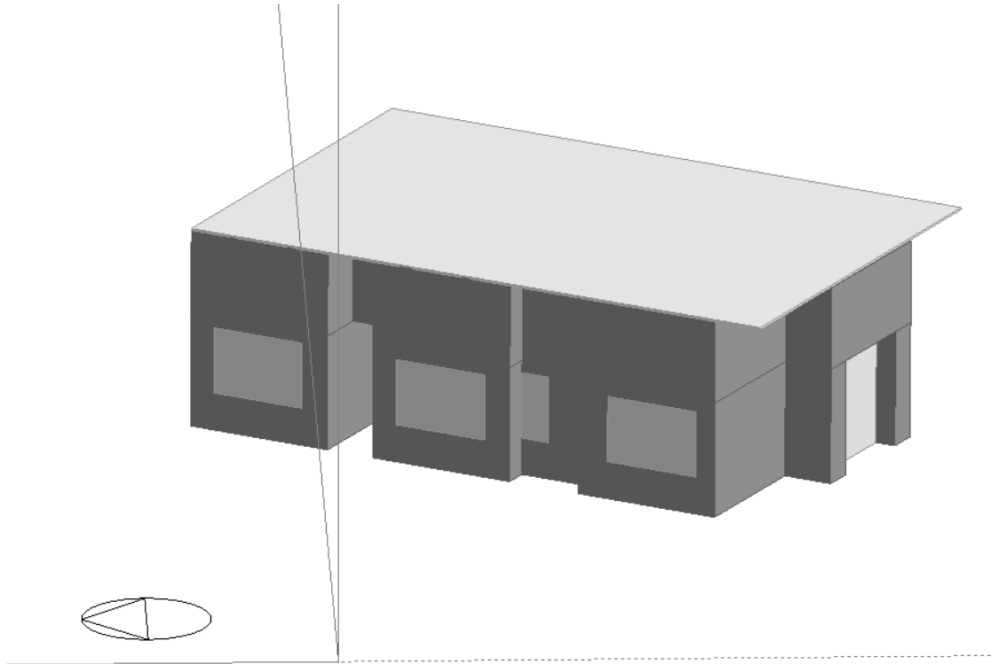
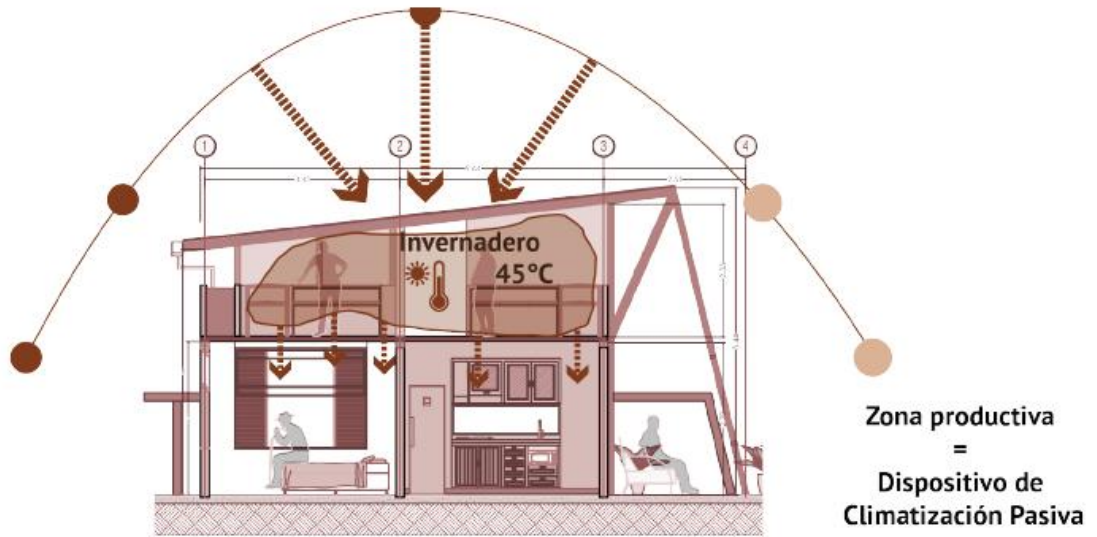


Imagen modelada 3D de la propuesta Desingbuilder.

Adicionalmente, a partir del análisis realizado en campo y del apoyo de herramientas digitales de evaluación climática, se identificó que, para alcanzar y mantener condiciones de confort térmico durante las horas nocturnas y de madrugada, resulta indispensable conservar el calor acumulado durante el día. En consecuencia, el segundo nivel no solo cumple una función productiva, sino que actúa como un elemento de captación, almacenamiento y liberación térmica, transfiriendo calor hacia la zona habitacional ubicada en el primer nivel. Este intercambio térmico contribuye a que, durante los periodos de menor temperatura exterior, los espacios interiores alcancen valores compatibles con el rango de confort, en coherencia con los principios de la arquitectura bioclimática y el enfoque de confort adaptativo establecido por la ASHRAE 55 para edificaciones naturalmente ventiladas.



Masa Térmica - Calentar los espacios interiores durante la noche

Gráfico efecto invernadero y masa térmica



Vista interior del invernadero

Este espacio opera bajo el principio del efecto invernadero, permitiendo elevar la temperatura interior hasta valores cercanos a 45 °C durante las horas de mayor radiación, generando así las condiciones térmicas óptimas para un secado eficiente y homogéneo del café, en coherencia con los requerimientos del proceso postcosecha y con los principios de la arquitectura bioclimática aplicada al hábitat rural.

Como parte del rigor metodológico, el diseño fue evaluado mediante simulación térmica en DesignBuilder, utilizando archivos climáticos representativos y parámetros definidos conforme a ASHRAE.

La simulación permitió verificar la permanencia de la temperatura operativa dentro del rango de confort adaptativo, lo que permitió ver el aumento de las horas de confort a 4003, lo que equivale a un 45,70% del total anual, evidenciando una mayor capacidad del sistema constructivo para mantener la temperatura operativa dentro del rango de confort definido. Este proceso reafirmó la pertinencia del enfoque bioclimático adoptado.

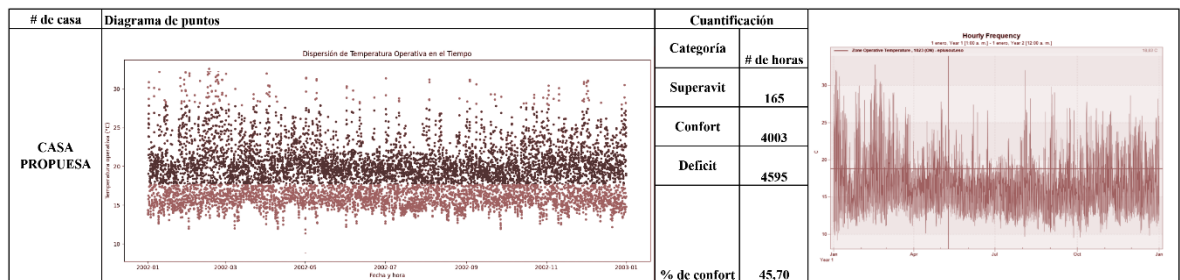


Diagrama de puntos temperatura anual casa propuesta

La comparación entre la CASA 12, identificada como la de peor desempeño térmico, y la casa propuesta evidencia un mejoramiento sustancial en las condiciones de confort térmico anual. Mientras la CASA 12 registra 1.235 horas anuales en confort, equivalentes al 14,10 % del total anual, la propuesta alcanza 4.003 horas en confort, lo que representa un 45,70 % del año. Esto implica un incremento absoluto de 31,6 puntos porcentuales en las horas de confort anual. En términos relativos, el desempeño térmico de la vivienda propuesta representa un aumento aproximado del 224 % respecto a la condición inicial de la CASA 12. Este resultado pone en evidencia la efectividad de las estrategias bioclimáticas incorporadas en la propuesta arquitectónica, particularmente en la optimización de la envolvente, el aprovechamiento de la ganancia solar y la gestión pasiva del calor, en coherencia con los criterios de confort adaptativo establecidos por la ASHRAE 55 para edificaciones naturalmente ventiladas.

Comparación del desempeño térmico anual			
Vivienda	Horas anuales en confort	Horas anuales en disconfort	Porcentaje anual de confort
CASA 12	1.235 h	7.525 h	14,10%
Casa propuesta	4.003 h	4.595 h	45,70%
Variación	+2.768 h	-2.930 h	+31,6 p.p.

El análisis integral del desempeño térmico anual demuestra que la implementación conjunta del invernadero solar y de sistemas constructivos de alta masa térmica constituye una estrategia pasiva altamente eficaz para la mejora sostenida del confort térmico en climas fríos y húmedos de montaña, como el de Manizales, Caldas. El invernadero opera como un dispositivo bioclimático de captación y concentración de radiación solar, capaz de generar excedentes térmicos significativos durante las horas diurnas, mientras que la masa térmica de materiales como el adobe y el bahare almacena el calor captado y liberándolo de manera gradual hacia los espacios interiores en los periodos de menor temperatura exterior. Esta interacción sinérgica permite desplazar térmicamente la curva de temperaturas interiores, reduciendo la amplitud térmica diaria y mitigando de forma efectiva los episodios de desconfort nocturno y de madrugada.

Los resultados cuantitativos evidencian que dicha estrategia no solo incrementa de manera significativa las horas anuales dentro del rango de confort, sino que además disminuye la dependencia de sistemas activos de calefacción, reforzando el carácter energéticamente eficiente y ambientalmente responsable de la propuesta. En coherencia con los principios de la arquitectura bioclimática clásica (Olgyay, Givoni) y con el enfoque contemporáneo de confort adaptativo establecido por la ASHRAE 55, el estudio confirma que la correcta articulación entre captación solar, inercia térmica y control de pérdidas constituye un criterio proyectual determinante para el diseño de vivienda rural y productiva, validando la arquitectura como un sistema climático pasivo capaz de responder de manera eficaz a las condiciones locales y a las necesidades de sus habitantes.

Como estrategia de sostenibilidad ambiental y autosuficiencia para la vivienda rural, se planteó el aprovechamiento racional de los recursos solares y pluviales disponibles en el sitio, integrándolos al diseño arquitectónico como sistemas activos complementarios al enfoque bioclimático. El sistema fotovoltaico se dimensiona a partir de un consumo promedio diario de 15 kWh para una vivienda de cuatro personas; considerando una producción unitaria estimada de 1,5 kWh/día por panel de 300 Wp asumiendo un promedio de 5 horas sol pico, se requiere un arreglo aproximado de 10 paneles para cubrir la demanda energética básica. Esta aproximación es consistente con los criterios de balance energético promovidos por ASHRAE y por certificaciones como EDGE y LEED, que priorizan la reducción de la demanda antes que la sobreinstalación de sistemas activos. La ficha técnica del panel solar se encuentra en el Anexo A.

De manera complementaria, el esquema incorpora un sistema de recolección de aguas lluvias que capta y conduce el recurso hacia tanques de almacenamiento con una capacidad total cercana a 5.800 litros, destinados principalmente al riego y a usos no potables, con un volumen operativo aproximado de 4.000 litros.

Esta estrategia responde a principios de gestión hídrica sostenible y resiliencia climática, reduciendo la presión sobre fuentes convencionales y fortaleciendo la autonomía del hábitat rural. En conjunto, ambos sistemas refuerzan un enfoque de diseño ambientalmente responsable, alineado con la física de la edificación, la eficiencia en el uso de recursos y los postulados del diseño pasivo adaptado al contexto climático local.

Especificaciones Generales

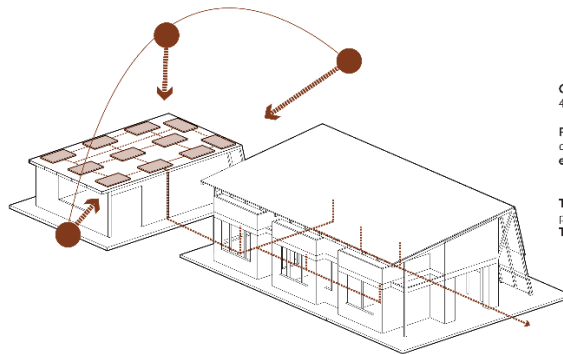
Modelo: Trina Solar TSM-500DD14A(I)
Tipo de panel: Monocristalino
Potencia nominal: 500 W
Tensión de circuito abierto (Voc): 45.5 V
Corriente de cortocircuito (Isc): 9.05 A
Tensión máxima del sistema: 1000 V DC
Eficiencia del panel: 18.5%

Dimensiones

Dimensiones del panel: 1650 mm x 992 mm x 35 mm
 Peso: 19.5 kg

Rendimiento

Coefficiente de temperatura (Pmax): -0.39 %/°C
 Coeficiente de temperatura (Voc): -0.51 %/°C
 Coeficiente de temperatura (Isc): 0.05 %/°C



Consumo promedio: de 15 kWh/día para una vivienda de 4 personas.

Producción diaria de un panel: Panel de 300W y un promedio de 5 horas de sol al día = $300W \cdot 5h = 1.5 \text{ kWh/panel/día}$.

Total de paneles = Consumo diario / Producción diaria por panel
Total de paneles = 15 kWh / 1.5 kWh/panel = 10 paneles.

Especificaciones Generales

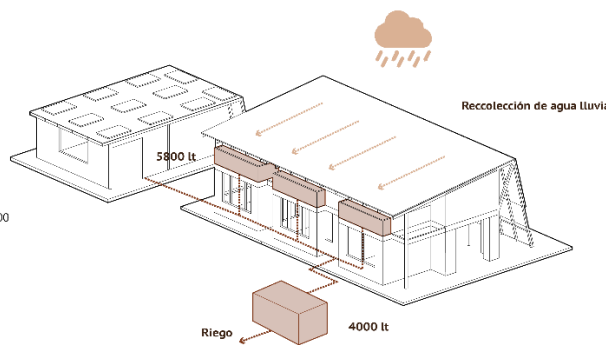
Tanque de almacenamiento O1:
 3 tanques de 1933 litros = 5800 litros

Tanque O2: subterráneo
 1 tanque de 4000 litros

capacidad de almacenamiento máxima: 9800 litros

Consumo promedio/día= 800 litros/día

Autonomía: 9800 litros / 800 litros/día
 12 días de autonomía en verano



Recolección de agua lluvia

Precipitación anual: 3000mm
 Área de cubierta: 137 m²
 Coeficiente de escorrentía: 0.8

$V = 137 \text{ m}^2 \times 5 \text{ m}$
 $V = 411 \text{ m}^3 \times 0.8$
V = 328.8m³

Recolección anual proyectada: **328.800 litros**
 Consumo de 800lt/día

Autonomía= 328.800 lt / 800lt/día = 410 días

Gráfico aprovechamiento racional de los recursos solares y pluviales.



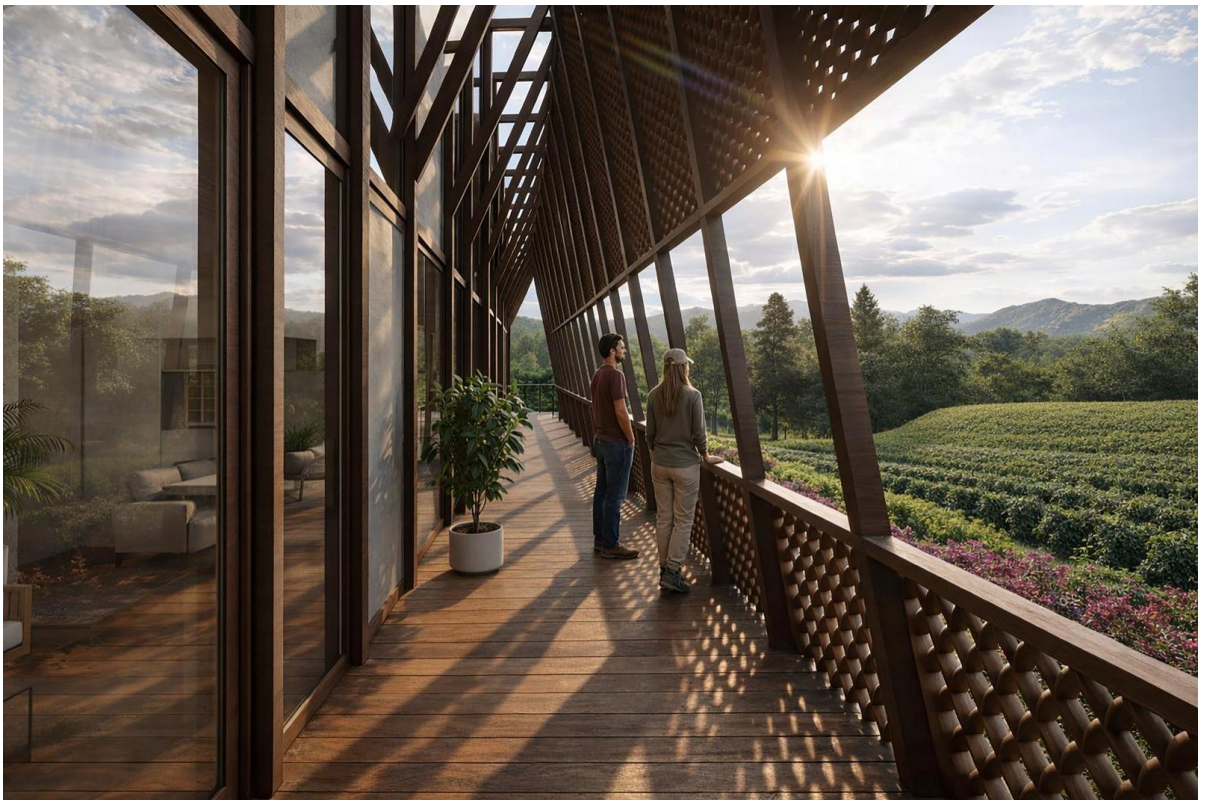
Fachada sureste de la vivienda propuesta



Fachada suroeste de la vivienda propuesta



Fachada Suroeste, hora 7:00am



Fachada suroeste, hora 9:00am



Espacio interior de la vivienda, sala- comedor



Espacio interior, secado del café segundo piso.



Bodega de almacenamiento de café.

13. Discusiones

Los resultados de la presente investigación dialogan de manera directa con los hallazgos reportados por Rojas y Altamirano (2023), en su estudio sobre el confort térmico en dos tipologías de vivienda rural en la región andina del Ecuador, particularmente en la provincia de Cotopaxi. Ambos trabajos se desarrollan en climas tropicales de montaña, caracterizados por bajas temperaturas nocturnas, alta humedad relativa y amplitudes térmicas moderadas, condiciones que inciden de forma determinante en el desempeño térmico de la vivienda rural y en la percepción de confort de sus habitantes.

Estos autores evidencian que la optimización de la materialidad y de la envolvente arquitectónica, a partir de ajustes en cerramientos y carpinterías, genera incrementos significativos en la temperatura operativa interior y reducciones en las horas de desconfort térmico. Estos resultados coinciden con los obtenidos en la presente investigación, donde el uso articulado de sistemas constructivos tradicionales de alta inercia térmica, como el adobe y el bahareque, permitió mejorar sustancialmente el desempeño térmico anual del modelo de vivienda propuesto. En ambos casos, se confirma que la materialidad de casas tradicionales, cuando es evaluada y reinterpretada desde criterios técnicos y bioclimáticos, posee un alto potencial para contribuir al confort térmico sin recurrir a sistemas activos de climatización.

Desde el punto de vista metodológico, Rojas y Altamirano emplean un enfoque mixto que combina mediciones in situ, simulaciones térmicas y encuestas a los usuarios, lo que permite incorporar la dimensión perceptual del confort térmico. Si bien la presente investigación se centra principalmente en el análisis cuantitativo del desempeño térmico mediante herramientas digitales como Desingbuilder, los resultados obtenidos se alinean con el enfoque adaptativo del confort térmico, al evidenciar que las estrategias pasivas y la configuración espacial influyen directamente en la capacidad de los habitantes para mantener condiciones aceptables de habitabilidad.

Asimismo, ambos estudios coinciden en señalar la existencia de vacíos de investigación en el hábitat rural campesino, especialmente en lo relacionado con la integración de criterios bioclimáticos, técnicos y culturales en el diseño de la vivienda. Mientras que Rojas y Altamirano destacan la necesidad de fortalecer el conocimiento sobre el comportamiento térmico de las tipologías rurales existentes, la presente investigación amplía este enfoque al incorporar la unidad productiva el secado del café como parte activa de la arquitectura. Esta integración permite concebir la vivienda no solo como un espacio de resguardo térmico, sino como un dispositivo climático y productivo, capaz de aprovechar la radiación solar mediante el efecto invernadero y de redistribuir el calor hacia los espacios habitacionales a través de la masa térmica, contribuyendo de manera directa al incremento de las horas anuales dentro del rango de confort.

Una de las principales limitaciones de la presente investigación se relaciona con la disponibilidad de información climática estandarizada para la localidad de estudio. En particular, no se dispone actualmente de un archivo climático en formato EPW (EnergyPlus Weather) específico para el municipio de Riosucio, Caldas, lo cual restringe la representación exacta de las condiciones microclimáticas locales en los procesos de simulación energética y térmica. Ante esta ausencia, fue necesario emplear el archivo EPW correspondiente a la ciudad de Manizales, seleccionado por su proximidad geográfica, su semejanza en altitud, y su pertenencia a un contexto climático de montaña con características térmicas e higrométricas comparables. No obstante, esta sustitución puede introducir desviaciones en la estimación de variables climáticas clave, factores que inciden directamente en la evaluación del confort térmico según los criterios establecidos por la ASHRAE 55. En consecuencia, si bien el uso del EPW de Manizales resulta metodológicamente válido como aproximación regional, los resultados obtenidos deben interpretarse como tendencias comparativas y no como valores

absolutos, reconociendo que un archivo climático específico de Riosucio permitiría una calibración más precisa del desempeño térmico del modelo propuesto.

Finalmente, tanto el estudio ecuatoriano como la presente investigación reconocen limitaciones asociadas a la disponibilidad de información climática específica a escala local, lo cual subraya la necesidad de profundizar en la generación de datos microclimáticos y en el desarrollo de herramientas de simulación ajustadas a contextos rurales. En este sentido, los resultados obtenidos deben entenderse como tendencias comparativas robustas que evidencian el impacto positivo del diseño bioclimático, al tiempo que abren líneas futuras de investigación orientadas a fortalecer la precisión climática, la incorporación de la percepción del usuario y la replicabilidad de los modelos propuestos en otros territorios rurales de clima tropical de montaña.

14. Conclusiones

En correspondencia con el objetivo general, la investigación permitió diseñar un modelo de vivienda rural campesina fundamentado en el análisis del desempeño térmico de los elementos tectónicos tradicionales, demostrando que la arquitectura rural campesina, cuando es reinterpretada desde criterios de la bioclimática y confort adaptativo, posee un alto potencial para mejorar las condiciones de habitabilidad y confort térmico.

El modelo de vivienda propuesto integra de manera estratégica sistemas constructivos tradicionales como el adobe, el bahareque y la madera, los cuales se articulan con estrategias de diseño pasivo, destacándose el invernadero solar localizado en el segundo nivel. Este nivel funciona como un dispositivo de captación y acumulación térmica, permitiendo almacenar el calor generado durante las horas diurnas y liberarlo de forma gradual hacia el espacio habitacional durante las horas nocturnas y de madrugada, periodos críticos en términos de desconfort térmico por las bajas temperaturas. La interacción entre la masa térmica de los sistemas constructivos y la ganancia solar controlada ha permitido incrementar de manera significativa las horas anuales dentro del rango de confort térmico, evidenciando la buena respuesta de la estrategia bioclimática pasiva implementada para mejorar la habitabilidad de la vivienda rural en el contexto climático analizado.

En relación con el primer objetivo, se concluye que la vivienda rural campesina no puede entenderse únicamente como un objeto físico, sino como una estructura cultural compleja, donde confluyen funciones habitacionales y productivas, usos cotidianos y

significados simbólicos profundamente arraigados al territorio. La caracterización de estos componentes permitió formular un modelo arquitectónico coherente con el habitar rural, respetando las lógicas espaciales, los materiales locales y las prácticas constructivas tradicionales, lo que refuerza la pertinencia social y cultural de la propuesta.

Respecto al segundo objetivo, el análisis del desempeño térmico de los elementos tectónicos y espaciales tradicionales evidenció que sistemas como el adobe y el bahareque presentan condiciones favorables de inercia térmica y masa térmica, capaces de amortiguar las oscilaciones térmicas diarias propias de los climas fríos y húmedos de montaña. Las simulaciones y evaluaciones realizadas demostraron que la correcta disposición, espesor y articulación de estos sistemas constructivos incide de manera directa en la reducción de las pérdidas térmicas y en la mejora del confort interior, validando su uso como una estrategia pasiva eficiente en este contexto climático específico.

Finalmente, en cumplimiento del tercer objetivo, el examen de las condiciones climáticas y ambientales que inciden en el confort térmico de la vivienda rural permitió identificar un conjunto de estrategias arquitectónicas bioclimáticas prioritarias, entre las que destacan el aprovechamiento de la radiación solar mediante invernaderos, la incorporación de masa térmica, el control de la ventilación natural y el uso de espacios de transición climática. La integración de estas estrategias en el modelo de vivienda rural propuesto evidenció que es posible mejorar sustancialmente el confort térmico anual sin recurrir a sistemas activos, consolidando la arquitectura como un dispositivo climático pasivo capaz de responder de manera eficiente a las condiciones locales y a las necesidades de los habitantes rurales.

En concordancia con los debates contemporáneos sobre el hábitat rural campesino, la presente investigación aporta evidencia de que el mejoramiento del confort térmico no puede abordarse únicamente desde la optimización físico-técnica de la envolvente arquitectónica, sino que requiere una integración controlada entre innovación y tradición. Si bien estudios recientes han señalado vacíos en la comprensión integral del confort térmico en contextos rurales de clima tropical, particularmente en lo relativo a la incorporación de dimensiones socioculturales y adaptativas (Rojas & Altamirano, 2023; Soto-Chahua et al., 2025), los resultados obtenidos demuestran que la reinterpretación de sistemas constructivos tradicionales articulados con estrategias pasivas contemporáneas permite responder de manera simultánea a las condiciones climáticas y a las prácticas agrícolas rurales. En este sentido, el modelo de vivienda propuesto no solo mejora cuantitativamente las horas anuales de confort térmico, sino que también

reconoce y potencia las formas de uso, percepción y apropiación del espacio propias del contexto rural, contribuyendo a una comprensión más integral del confort térmico como un fenómeno físico, cultural y adaptativo. Esta aproximación refuerza la pertinencia de enfoques de diseño bioclimático que trascienden la eficiencia energética y sitúan al habitante y al territorio como variables centrales del desempeño ambiental de la vivienda.

De este modo, el diseño de viviendas rurales articuladas funcional y espacialmente a la unidad productiva del hábitat rural campesino constituye una estrategia con potencial para fortalecer la permanencia de la población en el territorio rural. Al integrar actividades productivas como el secado del café dentro del sistema habitacional, la vivienda trasciende su condición meramente residencial para convertirse en una arquitectura territorial activa, capaz de mejorar simultáneamente las condiciones de confort térmico, la eficiencia energética y la productividad agrícola. Esta articulación entre habitar y producir no solo optimiza el aprovechamiento de los recursos climáticos locales mediante estrategias pasivas, sino que también revaloriza las prácticas campesinas y genera oportunidades económicas endógenas, contribuyendo a reducir los factores de desplazamiento hacia el hábitat urbano.

En consecuencia, el modelo propuesto se perfila como una alternativa arquitectónica y bioclimática que, al mejorar el confort térmico y las prácticas agrícolas de la ruralidad, puede incentivar a los habitantes del campo a construir proyectos de vida en su propio territorio, contrarrestando, desde el diseño, las dinámicas de migración rural-urbana evidenciadas en las estadísticas nacionales e internacionales citadas anteriormente.



15. Bibliografía

ASHRAE. (2021). Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Brager, G. S., & De Dear, R. J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: A literature review. *Energy and Buildings*, 27(1), 83–96. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4)

Casas Rodríguez, D., & Matíz Vega, L. L. (2018). Prototipo de vivienda social bioclimática y sostenible en el municipio de Quibdó [Trabajo de grado]. Universidad La Gran Colombia.

De Dear, R. J., & Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104(1), 145–167.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (s. f.). Censos históricos de población (1918, 1938, 1951): Cabecera y resto.

Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press.

Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>

Frampton, K. (1995). *Studies in tectonic culture: The poetics of construction in nineteenth and twentieth century architecture*. MIT Press.

Givoni, B. (1969). *Man, climate, and architecture*. Elsevier.

Gómez-Azpetia, G. (DR). (2023). *Bioclimarq*. [Archivo de Excel].

Humphreys, M. A., & Nicol, J. F. (1998). Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transactions*, 104(1), 991–1004.

ISO. (2005). 7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of PMV and PPD. International Organization for Standardization.

Mandrini, M. R., Cejas, N., & Bazán, A. (2018). Erradicación de ranchos ¿Erradicación de saberes? Reflexiones sobre políticas habitacionales para sectores subalternos en Argentina. *Estudios del Hábitat*, 16(2), 45–62.

McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2020). *Política de vivienda rural*.

Municipio de Riosucio. (2009). Documento técnico de soporte del Plan Básico de Ordenamiento Territorial – PBOT – Municipio de Riosucio, Caldas. Alcaldía de Riosucio.

Oliver, P. (2006). *Built to meet needs: Cultural issues in vernacular architecture*. Architectural Press.

Olgyay, V. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press.

Rojas, M. A., & Altamirano, R. (2023). Thermal comfort in two housing typologies in the Andean Region of Ecuador: Cotopaxi Province. *IJASEIT*, 13(5).

Rudofsky, B. (1964). *Architecture without architects: A short introduction to non-pedigreed architecture*. Museum of Modern Art.

Ruiz Torres, R. P., & Castañeda Nolasco, G. (2013). Comportamiento y confort térmico de vivienda en la ciudad rural sustentable Nuevo Juan del Grijalva, Chiapas, México. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 2(2), 134–148. <https://doi.org/10.31644/IMASD.2.2013.a07>

Sánchez Amaya, C. A., & García Cardona, A. A. (2021). Diseño de vivienda rural bioclimática para clima frío-húmedo andino: Caso de estudio Facatativá-Colombia. *Arquitek*, 18, 81–103. <https://doi.org/10.47796/ra.2020i18.440>

Semper, G. (2004). *Style in the technical and tectonic arts, or, Practical aesthetics*. Getty Research Institute. (Obra original publicada en 1851)

Serra, R., & Coch, H. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Edicions UPC.

Soto-Chahua, J., Acuña-Portocarrero, G., & Otárola-Santiváñez, J. E. (2025). Evaluation of building materials and proposal to improve thermal comfort in rural housing. *Civil Engineering and Architecture*, 13(1), 118–143.

Szokolay, S. V. (2004). *Introduction to architectural science: The basis of sustainable design*. Architectural Press.

Triana, M. A., De Vecchi, R., & Lamberts, R. (2020). Building design for hot and humid climate in a changing world. En N. Enteria, H. Awbi & M. Santamouris (Eds.), *Building in hot and humid regions*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7519-4_3

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). *World Urbanization Prospects 2022 (Online Edition)*. <https://population.un.org/wup/>

World Bank. (n. d.). *Rural population (% of total) – Colombia (SP.RUR.TOTL.ZS)*.