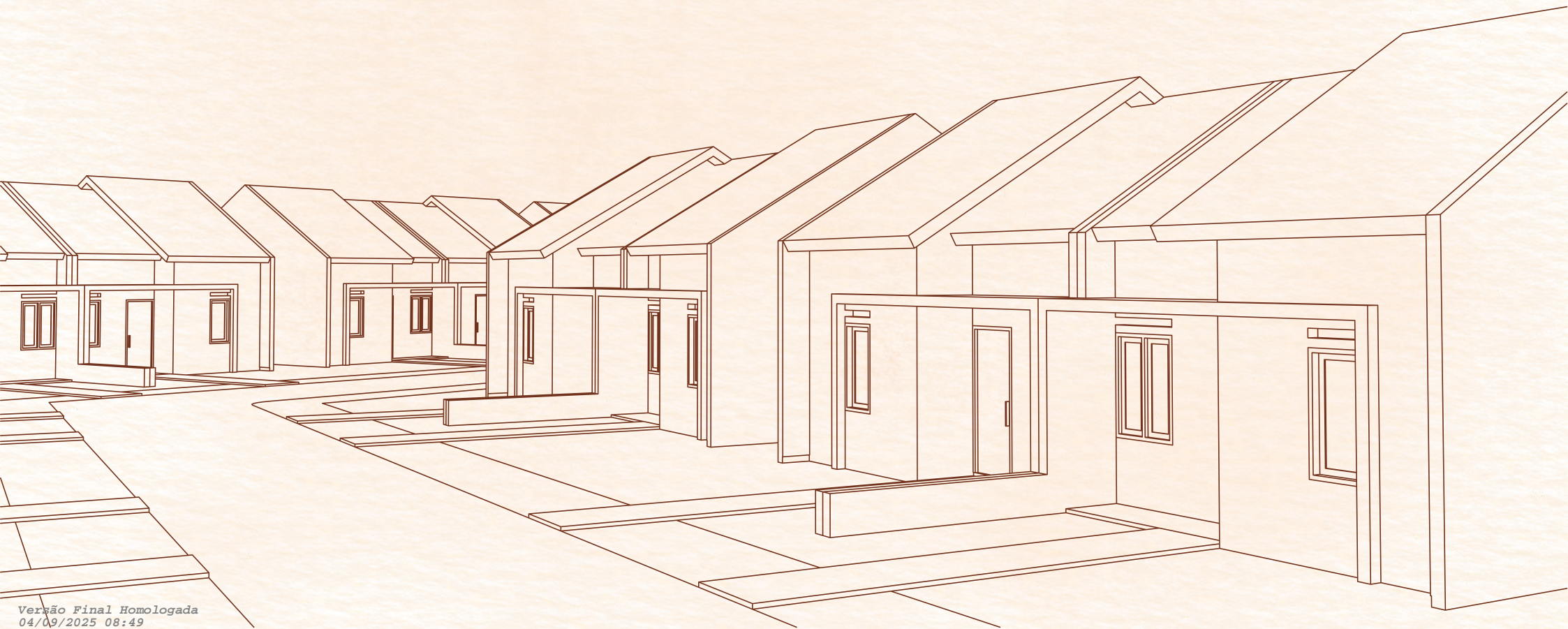


# Revestimiento de tierra como técnica pasiva de aislamiento térmico en muros: caso de estudio en Foz de Iguazú





# Revestimiento de tierra como técnica pasiva de aislamiento térmico en muros: caso de estudio en Foz de Iguazú

Stalyn Joel Crespín Arteaga

Foz de Iguazú  
2025





# Revestimiento de tierra como técnica pasiva de aislamiento térmico en muros: caso de estudio en Foz de Iguazú

Stalyn Joel Crespín Arteaga

Trabajo de Conclusión del Curso presentado al Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio de la Universidad Federal de Integración Latinoamericana, como requisito parcial para obtener el título de Licenciatura en Arquitectura y Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Egon Vettorazzi

Coorientadora: Arq. Leila Paschoalloto

Foz de Iguazú  
2025



# Agradecimientos

En primer lugar, elevo mi agradecimiento a Dios por haberme concedido salud y bienestar a lo largo de este camino, permitiéndome alcanzar este logro tan anhelado. A Él le debo la oportunidad de tener a mi lado a la persona más importante en mi vida: mi madre, Miriam Arteaga Reyes. Sin su apoyo incondicional, este sueño no sería una realidad. De ella aprendí el verdadero significado de la resiliencia; siento un profundo orgullo al ver todo lo que ha superado, y cómo, a pesar de no tener ya obligación de hacerlo, sigue luchando incansablemente por su familia. Su corazón grande y su inmensa bondad la hacen verdaderamente única.

Quiero también expresar mi gratitud a mi compañera de vida, Margine Ileana Toledo Pérez. Llegaste a mi vida en un momento en que la soledad comenzaba a instalarse, y con tu presencia me rescataste. Paso a paso, construimos juntos un camino, hasta que la vida nos dio la más hermosa sorpresa: nuestra primera hija, Mila. Tú llegaste para iluminar aún más nuestras vidas. Ahora somos una familia que no busca la perfección ni sigue los patrones impuestos por la sociedad, sino que se construye cada día con amor, autenticidad y la alegría de ser nosotros mismos.

Mi más sincero agradecimiento a mi profesor orientador, Dr. Egon Vettorazzi. Su dedicación en la transmisión de conocimientos, su guía y su constante motivación fueron pilares para la concepción y desarrollo de este trabajo. Su paciencia y sabiduría fueron un faro que iluminó cada paso del camino.

Asimismo, extiendo mi gratitud a mi coorientadora, Arq. Leila Paschoalloto. Su visión, entusiasmo y profundo conocimiento fueron una inspiración constante, marcando el rumbo y la pasión por llevar a cabo esta investigación. Su apoyo fue importante para materializar las ideas y superar los desafíos.

Finalmente, mi sincero agradecimiento a Teodoro López. Más que un compañero y colega, ha sido un gran amigo. Su apoyo constante fue importante y sin él, este trayecto hasta este momento habría sido considerablemente más difícil.

A todos ustedes, y a cada persona que, de una u otra forma, contribuyó a este proceso, mi más profundo agradecimiento. Este logro es también suyo, y representa un paso más en mi desarrollo personal y profesional. Gracias por ser parte de esta historia.




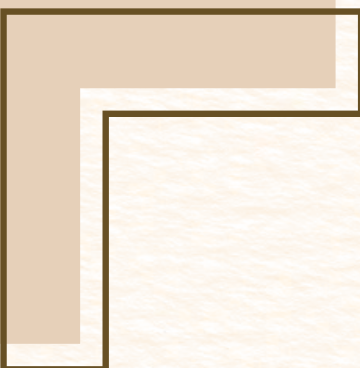
# Dedicatoria

A la fortaleza que me precede, a la raíz de mi existencia: a mi amada madre, Miriam Arteaga Reyes. Tu resiliencia y tu inmenso corazón han sido la luz que guía mis pasos, el cimiento inquebrantable que sostuvo este sueño.

A mi refugio y mi inspiración, a la compañera de vida que transformó mi andar: a Margine Ileana Toledo Pérez. Tu amor me rescató y juntos hemos tejido un presente lleno de luz.

Y a la más pura de mis alegrías, el amanecer de cada día: a nuestra pequeña Mila. Que este trabajo sea una semilla más en el jardín de tu futuro, un reflejo del amor y el esfuerzo que construimos para ti.





*“Si la tierra amasada es verdaderamente ecológica, es porque el tiempo puede deshacerla por completo, permitiendo que se reutilice una y otra vez. Tal vez, no dejar huellas ni residuos imborrables sea la nueva ambición de la arquitectura.”*

# Motivación personal y contextualización del tema

Mi trayectoria académica en Brasil comenzó en 2019, cuando llegué a Foz do Iguaçu para cursar estudios en la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana (UNILA). Desde entonces, he experimentado de manera directa los desafíos del confort térmico en las edificaciones locales. En cada vivienda en la que he residido, el desempeño térmico ha sido insuficiente frente al clima característico de la región, y los sistemas activos de climatización, como los ventiladores, no han logrado mitigar de forma eficaz las altas temperaturas y la humedad.

Esta vivencia personal se transformó en la principal motivación de esta investigación. A lo largo de mi formación, enfoqué mi atención en alternativas eficientes y accesibles que mejoren el comportamiento térmico de las viviendas sin requerir intervenciones estructurales complejas ni costosas. Prioricé soluciones que pudieran integrarse a las construcciones existentes y que fueran viables para poblaciones con recursos limitados, especialmente en contextos de autoconstrucción.

La elección de este tema responde no solo a una inquietud académica, sino también a una convicción profunda: la arquitectura puede y debe mejorar la calidad de vida. Este trabajo representa mi contribución a la búsqueda de caminos más sostenibles y humanos en el ámbito constructivo, con el objetivo de ofrecer bienestar real a los habitantes de Foz do Iguaçu y a comunidades con condiciones similares.

# Resumen

Este trabajo de investigación evalúa el desempeño térmico de muros de albañilería convencional mediante la incorporación de paneles y acabado de tierra en Foz de Iguazú, una región con un clima subtropical desafiante que impone significativas demandas energéticas para climatización. Ante la creciente dependencia de sistemas activos y la pérdida de técnicas constructivas vernáculas, la investigación propone la revalorización de la tierra como material con propiedades de inercia térmica pasiva. Se llevó a cabo un estudio dual: por un lado, se intervino una pared en una vivienda real con revestimiento de tierra (taipa de mano) para analizar su influencia en la variación de temperatura superficial, el retardo térmico y la atenuación del calor. Por otro lado, se construyeron y monitorearon prototipos experimentales: una pared convencional de referencia, una con panel de taipa de mano y otra con un panel de tierra prefabricado, para comparar su comportamiento térmico en condiciones controladas. Los resultados del estudio en prototipos demostraron que los paneles de tierra, especialmente la técnica de taipa de mano, mejoraron significativamente la inercia térmica de los muros, reduciendo la amplitud térmica diaria y retrasando la transmisión de calor hacia el interior. El prototipo de taipa de mano (prototipo 2) exhibió la menor amplitud térmica promedio (9,87 °C), indicando una mayor capacidad para almacenar y retardar la transferencia de calor en comparación con el prototipo convencional (12,14 °C). El panel prefabricado (prototipo 3) también mostró una mejora intermedia (10,88 °C). En la residencia real, la intervención con taipa de mano (pau a pique), redujo la amplitud térmica promedio de la superficie interna del muro en aproximadamente un 18,9 % en comparación con el muro sin intervención, con un desfase térmico promedio de 1 hora y 30 minutos. Estos hallazgos resaltan el potencial de los revestimientos de tierra como estrategia pasiva eficiente para mejorar el confort térmico en viviendas, reduciendo la dependencia energética y contribuyendo a una arquitectura más sostenible y adaptada al clima local.

**Palabras clave:** Confort térmico, revestimiento de tierra, albañilería liviana, inercia térmica, taipa de mano (pau a pique).

# Resumo

Este trabalho de pesquisa avalia o desempenho térmico de paredes de alvenaria convencional por meio da incorporação de painéis e reboco de terra em Foz do Iguaçu, uma região com um clima subtropical desafiador que impõe significativas demandas energéticas para climatização. Diante da crescente dependência de sistemas ativos e da perda de técnicas construtivas vernáculas, a pesquisa propõe a revalorização da terra como material com propriedades de inércia térmica passiva. Foi realizado um estudo dual: por um lado, uma parede em uma residência real foi intervencionada com revestimento de terra (taipa de mão) para analisar sua influência na variação de temperatura superficial, no retardo térmico e na atenuação do calor. Por outro lado, protótipos experimentais foram construídos e monitorados: uma parede convencional de referência, uma com painel de taipa de mão e outra com um painel de terra pré-fabricado para comparar seu comportamento térmico em condições controladas. Os resultados do estudo em protótipos demonstraram que os painéis de terra, especialmente a técnica de taipa de mão, melhoraram significativamente a inércia térmica das paredes, reduzindo a amplitude térmica diária e atrasando a transmissão de calor para o interior. O protótipo de taipa de mão (protótipo 2) exibiu a menor amplitude térmica média (9,87 °C), indicando uma maior capacidade de armazenar e retardar a transferência de calor em comparação com o protótipo convencional (12,14 °C). O painel pré-fabricado (protótipo 3) também mostrou uma melhora intermediária (10,88 °C). Na residência real, a intervenção com taipa de mão (pau a pique), reduziu a amplitude térmica média da superfície interna da parede em aproximadamente 18,9% em comparação com a parede sem intervenção, com um atraso térmico médio de 1 hora e 30 minutos. Esses achados destacam o potencial dos revestimentos de terra como estratégia passiva eficiente para melhorar o conforto térmico em habitações, reduzindo a dependência energética e contribuindo para uma arquitetura mais sustentável e adaptada ao clima local.

**Palavras chave:** Conforto térmico, revestimento de terra, alvenaria leve, inércia térmica, taipa de mão (pau a pique)

# Índice

## Capítulo 1 - *Donde el calor despierta la pregunta*

*“Toda incomodidad guarda una oportunidad de transformación. Aquí comienza el recorrido por la arquitectura que escucha”.*

- Introducción
- Justificación
- Objetivo General
- Objetivos Específicos

# Introducción

La arquitectura, en su esencia, busca concebir y dar forma a espacios que enriquezcan la experiencia humana y mejoren la calidad de vida de sus habitantes. Más allá de la mera creación de estructuras físicas, esta disciplina abarca una profunda comprensión de los aspectos técnicos, históricos, culturales y estéticos del entorno. Los arquitectos y urbanistas desempeñan un papel crucial al adaptar estos espacios a las cambiantes necesidades sociales, impulsando una evolución constante donde la innovación y la integración armónica con el entorno son imperativas.

En Brasil, la Constitución Federal de 1988, modificada por la Emenda Constitucional nº 26/2000, incluyó el derecho a la vivienda en el artículo 6º, consolidándolo como un derecho social fundamental vinculado a la dignidad de la persona humana (Brasil, 2000). Sin embargo, en la práctica, el acceso a una vivienda adecuada sigue condicionado a las posibilidades financieras de las familias, que a menudo se ven obligadas a recurrir a la autoconstrucción con materiales convencionales y de bajo costo. Este proceso, realizado generalmente sin la debida asesoría técnica, compromete aspectos esenciales como la orientación de los espacios en relación con la incidencia solar y el desempeño térmico de las viviendas (Cavalcanti; Alvim, 2020).

Este desafío se acentúa en climas subtropicales, como el de Foz de Iguazú. Esta ciudad, ubicada en la triple frontera entre Brasil, Argentina y Paraguay, se caracteriza por veranos cálidos y húmedos (superando los 30 °C) e inviernos suaves pero ocasionalmente fríos (mínimas cercanas a 0 °C).

Esta variabilidad climática, junto con la alta humedad, impone desafíos al confort térmico y la eficiencia energética en viviendas de construcción convencional, que dependen excesivamente de sistemas activos de climatización. (Weather spark, 2025)

En este contexto, el uso de materiales alternativos y técnicas constructivas tradicionales, como los revestimientos de tierra, emerge como una estrategia viable y sostenible para mejorar el desempeño térmico de las viviendas sin recurrir a sistemas activos. Específicamente, la técnica de taipa de mano, utilizada ancestralmente, ha demostrado poseer propiedades térmicas favorables, como alta inercia y baja conductividad, lo que la convierte en una opción para revestimientos con propiedades termoaislantes.

Con este trabajo se buscó evaluar el desempeño térmico de muros de albañilería convencional con y sin la incorporación de paneles de tierra utilizando técnicas como Pau a pique (taipa de mano) y paneles prefabricados como estrategias pasivas para la mejora del confort térmico de las viviendas en Foz de Iguazú.

Por un lado, se realizó un estudio de caso en una vivienda real de Foz de Iguazú (zona bioclimática 3), donde se analizó una pared convencional intervenida con un revestimiento de tierra para verificar variaciones de temperatura superficial, retardo térmico y atenuación del calor. Por otro lado, se llevó a cabo un estudio comparativo en prototipos experimentales, incluyendo una pared convencional de referencia, una con panel de taipa de mano y una con un panel de tierra prefabricado. Esta metodología combinada buscó generar datos relevantes para futuras aplicaciones de bajo costo y bajo impacto ambiental en la arquitectura habitacional brasileña.

# Justificación

El sector de la construcción afronta un desafío ambiental crítico. El avance industrial y tecnológico ha priorizado materiales con alta energía incorporada, contaminantes en su producción y transporte, y difíciles de reciclar, como el hormigón, el vidrio, el acero y el ladrillo (Zeltia, 2011). Este sector consume aproximadamente el 40% de la energía global, gran parte destinada a la climatización y al ciclo de vida de los materiales (Low Tech Magazine, 2011).

En este contexto, las tecnologías constructivas con tierra emergen como una alternativa sostenible, destacando por su alta eficiencia energética durante la construcción y el uso. Los muros de tapia o adobe, por ejemplo, demuestran una notable regulación térmica. Estudios del congreso TerraBrasil 2014 confirmaron que muros de adobe de 0.30 m a 0.60 m en Puno (Perú) mantienen diferencias de temperatura interna mínimas (2.5 a 4.8 °C) en condiciones extremas, y la tapia de 0.40 m presenta un retraso térmico de al menos 11 horas (TerraBrasil 2014).

Estas pruebas validan su capacidad para mejorar el confort térmico sin sistemas mecánicos. La necesidad de estas soluciones es patente en climas cálidos y húmedos como el de Foz de Iguazú (Zona Bioclimática 3, ABNT NBR 15220-3, 2005). Según COPEL, Foz de Iguazú registra el consumo eléctrico residencial más alto de Paraná (223 kWh/mes frente a 161 kWh/mes promedio estatal), principalmente por el uso de aire acondicionado.

Esto subraya la urgencia de proponer alternativas para el confort térmico que, basándose en técnicas pasivas como la masa térmica y la ventilación natural, reduzcan la dependencia energética. Paradójicamente, en la triple frontera, se ha perdido la continuidad del legado técnico-constructivo indígena.

Comunidades rurales, como los quilombolas, han adoptado técnicas estandarizadas de mampostería y hormigón (Cunha y Bastos, 2017), reflejando un desplazamiento cultural y técnico que impacta la identidad y la relación con el entorno. Por tanto, esta investigación busca revalorizar la tierra como material constructivo principal. Las tecnologías que la incorporan son amigables con el ambiente y el paisaje, aptas para viviendas y como material con propiedades de inercia térmica pasiva en construcciones convencionales; una necesidad creciente en Foz de Iguazú.

La escasa utilización de tecnologías constructivas basadas en tierra en el contexto local evidencia una brecha en términos de conocimiento técnico e innovación. Esta realidad respalda la necesidad de desarrollar un estudio orientado a la implementación de paneles de tapia como estrategia pasiva para mejorar el confort térmico en las edificaciones. En este sentido, el principal aporte de este trabajo consiste en proponer una solución basada en materiales y técnicas tradicionales que favorezca el bienestar térmico de los habitantes, evaluando su eficacia a partir de la sensación térmica estimada en el interior de la vivienda.

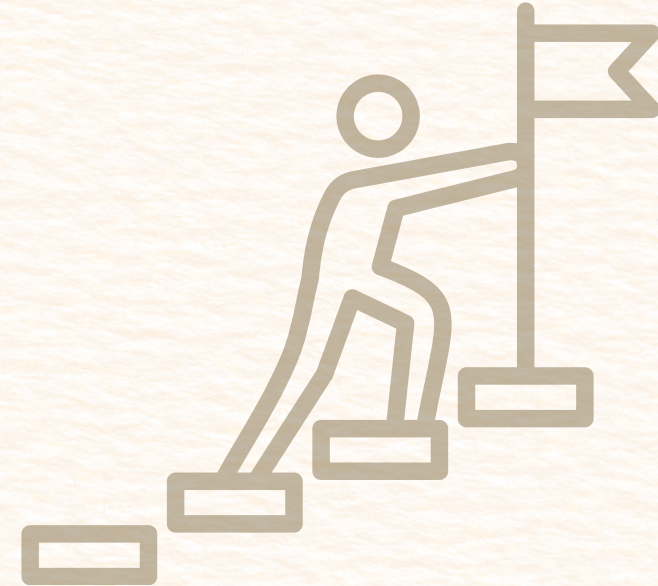
# Objetivos

## Objetivo General

Evaluar el desempeño térmico de muros de albañilería convencional con y sin la incorporación de paneles de tierra utilizando técnicas como pau a pique (taipa de mano) y paneles prefabricados como estrategias pasivas para la mejora del confort térmico de las viviendas en Foz de Iguazú.

## Objetivos Específicos

- Caracterizar las condiciones climáticas de Foz de Iguazú y describir las particularidades constructivas de la vivienda de estudio, identificando sus puntos críticos de ganancia y pérdida de calor.
- Cuantificar el comportamiento térmico de una pared convencional existente en la vivienda real antes y después de la aplicación de un revestimiento de tierra, analizando la variación de temperatura superficial, el retardo térmico y la atenuación del calor.
- Construir y monitorear prototipos experimentales de paredes que representen la construcción convencional, un panel de taipa de mano y un panel de tierra prefabricado, para comparar su desempeño térmico en condiciones controladas.
- Analizar el impacto de la inercia térmica proporcionada por los paneles de tierra en la estabilización de las temperaturas internas de los prototipos, comparando la efectividad de la taipa de mano tradicional frente a la solución prefabricada.
- Proponer recomendaciones de diseño y construcción para la integración de soluciones de tierra en viviendas de Foz de Iguazú, buscando mejorar el confort térmico pasivo y la eficiencia energética.



# Capítulo 2 - *La raíz de la necesidad*

*"Cuando el entorno incomoda, la arquitectura responde. Este capítulo revela el porqué de nuestra búsqueda".*

- Marco Teórico
- Transferencia de calor
- Confort Térmico
- Factores Ambientales
- Factores Personales
- Modelos de Confort Térmico
- La Importancia del Confort Térmico en el Proyecto Arquitectónico

## Transferencia de calor

La transferencia de calor es un fenómeno físico que describe el movimiento de la energía térmica de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura. En paredes, este proceso ocurre predominantemente por conducción, convección y radiación, dependiendo de las características del material y del ambiente (Incropera et al., 2011).

**Conducción:** Mecanismo primario de transferencia de calor a través del material sólido de la pared, donde la energía se transmite por colisiones moleculares. La tasa de conducción se rige por la ley de Fourier (Incropera et al., 2011).

**Convección:** Ocurre en las superficies internas y externas de la pared, involucrando la transferencia de calor entre la superficie sólida y un fluido (aire o agua) en movimiento. Puede ser natural (debido a diferencias de densidad) o forzada (inducida por ventiladores o bombas) (Cengel; Ghajar, 2015).

**Radiación:** Transferencia de energía por ondas electromagnéticas. En paredes, la radiación es relevante principalmente en las superficies expuestas a fuentes de calor radiante, como el sol o calentadores (Cengel; Ghajar, 2015).



Figura 1. Ilustración de transferencia de calor Fuente: [www.multiconfort.com.mx](http://www.multiconfort.com.mx)

## Propiedades de los Materiales

**Conductividad Térmica:** Materiales con baja conductividad térmica son buenos aislantes (ej: lana de roca, poliestireno extruido), mientras que materiales con alta conductividad son buenos conductores (ej: metales) (Incropera et al., 2011).

**Capacidad Térmica Específica:** Se relaciona con la capacidad del material para almacenar energía térmica. Materiales con alta capacidad térmica pueden atenuar fluctuaciones de temperatura (Cengel; Ghajar, 2015).

**Densidad:** Afecta la inercia térmica del material, es decir, su capacidad de resistir cambios de temperatura (Cengel; Ghajar, 2015)

**Emisividad:** Define la capacidad de una superficie de emitir y absorber radiación térmica (Holman, 2002).

## Condiciones de Contorno

**Diferencia de Temperatura:** La principal fuerza motriz para la transferencia de calor es la diferencia de temperatura entre los ambientes interno y externo (Incropera et al., 2011).

**Velocidad del Aire:** Afecta el coeficiente de convección en las superficies de la pared. Vientos fuertes aumentan la transferencia de calor por convección (Cengel; Ghajar, 2015).

**Radiación Solar:** La incidencia de radiación solar en la superficie externa de la pared puede aumentar significativamente la carga térmica (Holman, 2002).

**Humedad:** La presencia de humedad, ya sea en el material de la pared o en el aire adyacente, puede alterar las propiedades térmicas y los mecanismos de transferencia de calor, incluyendo la posibilidad de condensación (ASHRAE, 2017).

## Confort térmico

El confort térmico es un pilar esencial para la calidad de vida y el bienestar en ambientes construidos. No se trata solo de la ausencia de incomodidad, sino de un estado de satisfacción que impacta directamente la salud, la productividad y la percepción general de un espacio.

El confort térmico se define ampliamente como "la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico". Esta definición resalta el carácter subjetivo de la sensación térmica, que va más allá de meros valores de temperatura y humedad. Implica una compleja interacción entre factores ambientales, personales y fisiológicos. (Lamberts et al. 2016)

Frota y Schiffer (2015, p. 23) amplían esta comprensión, afirmando que:

"El confort térmico es un estado de equilibrio entre el cuerpo humano y el ambiente, donde los intercambios de calor entre el individuo y el medio ocurren de forma que no generen sensación de frío o calor excesivo, promoviendo bienestar y condiciones ideales para la realización de actividades". [Traducción propia]

La percepción de confort térmico varía de persona a persona, influenciada por factores como la edad, el sexo, el nivel de actividad metabólica, la aclimatación y la vestimenta, para comprender el confort térmico en su totalidad, es crucial analizar los factores que lo influyen, divididos en ambientales y personales.

## Factores Ambientales

Los factores ambientales son las características físicas del entorno que afectan los intercambios de calor entre el cuerpo humano y el ambiente. Diversos factores ambientales influyen en este equilibrio térmico. La temperatura del aire es fundamental, ya que determina la cantidad de calor que el cuerpo pierde por convección (ABNT NBR 16401-2:2008). La temperatura radiante media, que considera la temperatura de las superficies circundantes, también juega un papel crucial, ya que el cuerpo puede absorber o emitir calor hacia estas superficies (ISO 7730, 2005).

La velocidad del aire, por otro lado, facilita la evaporación del sudor y la disipación del calor corporal, contribuyendo al enfriamiento. Sin embargo, corrientes de aire excesivas pueden resultar incómodas, especialmente en ambientes fríos (Coutinho, 2005).

Estas variables ambientales interactúan con factores personales, como la vestimenta y el nivel de actividad física, para determinar el confort térmico de un individuo (ABNT NBR 16401-2:2008).

**Temperatura del aire:** Es la medida de la intensidad de la energía térmica en el aire. Es el factor más comúnmente asociado al confort térmico, pero no el único.

**Temperatura radiante media:** Se refiere a la temperatura promedio de las superficies del ambiente (paredes, techo, piso, objetos) que irradian calor hacia el cuerpo o absorben calor de él. En un día soleado, incluso con el aire fresco, la alta temperatura radiante del sol puede causar sensación de calor. Lamberts, Dutra y Pereira (2014, p. 38) destacan que:

"La temperatura radiante media tiene un impacto significativo en el confort térmico, especialmente en ambientes donde hay grandes diferencias de temperatura entre las superficies y el aire". [Traducción propia]

**Velocidad del aire:** El movimiento del aire (ventilación) ayuda a disipar el calor del cuerpo por convección y a evaporar el sudor, contribuyendo al enfriamiento. Sin embargo, corrientes de aire excesivas en invierno pueden causar incomodidad. Una investigación de iniciación científica de Souza (2022, p. 15) sobre ambientes de oficina observó que:

"La velocidad del aire adecuada es crucial para la disipación de calor, pero el exceso puede provocar incomodidad localizada, especialmente en áreas climatizadas". [Traducción propia]

## Factores Personales

Los factores personales son aquellos que dependen de las características y condiciones individuales de cada persona, y que influyen directamente en la percepción del confort térmico. Entre los más relevantes se encuentran la tasa metabólica, que refleja la cantidad de calor generado por la actividad física del cuerpo; el nivel de vestimenta, que determina la capacidad de retener o disipar calor; y la climatización, entendida como el uso de sistemas de calefacción, refrigeración o ventilación personal que permiten al individuo ajustar su entorno inmediato según sus necesidades térmicas. La interacción de estos factores con el entorno ambiental es fundamental para entender cómo se experimenta el confort térmico en distintas situaciones (Coutinho, 2005; ABNT NBR 16401-2:2008; ISO 7730, 2005).

**Tasa metabólica:** Es la cantidad de calor producida por el cuerpo humano en función de la actividad que se está realizando. Una persona en reposo produce menos calor que una persona caminando o practicando ejercicio físico. (Coutinho, 2005).

**Nivel de vestimenta:** La resistencia térmica de la ropa (medida en clo es una unidad que mide el aislamiento térmico de la ropa) influye en la capacidad del cuerpo para intercambiar calor con el ambiente. La ropa ligera es adecuada para climas cálidos, mientras que la ropa pesada aísla el cuerpo en climas fríos. (ABNT NBR 16401-2:2008).

**Aclimatación:** La capacidad del cuerpo para adaptarse a diferentes condiciones climáticas con el tiempo. Una persona acostumbrada a un clima cálido puede tener una zona de confort diferente a la de una acostumbrada a un clima frío. (ISO 7730, 2005).

## Modelos de Confort Térmico

Se han desarrollado varios modelos para predecir el confort térmico, siendo los más prominentes el modelo de Fanger (PMV/PPD) y los modelos adaptativos.

**Modelo de Fanger (PMV/PPD):** Se basa en principios de balance energético y evaluaciones experimentales. El PMV (Predicted Mean Vote) predice la sensación térmica promedio de un gran grupo de personas en una escala de -3 (frío) a +3 (caliente).

El PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) estima el porcentaje de personas insatisfechas con el ambiente térmico. Según Lamberts, Dutra y Pereira (2014, p. 45):

"El modelo PMV/PPD es ampliamente utilizado en normas internacionales y proyectos de sistemas de climatización, proporcionando una base para el dimensionamiento de ambientes con confort térmico". [Traducción propia]

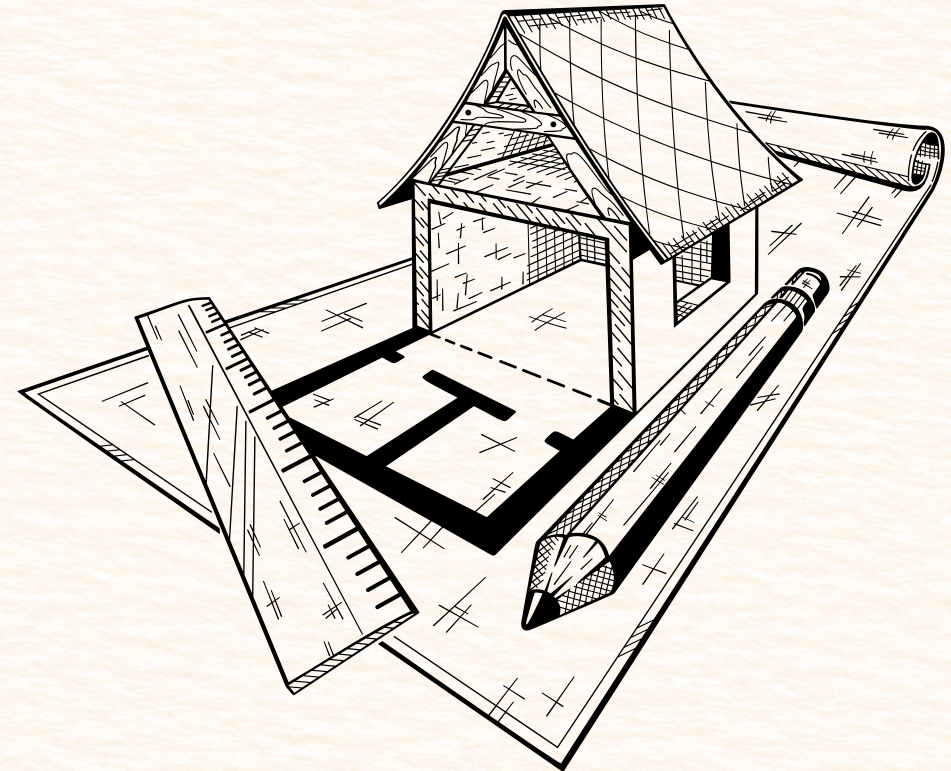
**Modelos Adaptativos:** Reconocen que las personas se adaptan al ambiente térmico mediante ajustes conductuales (como abrir una ventana o cambiarse de ropa) y fisiológicos. Estos modelos son particularmente relevantes para edificios sin climatización mecánica, donde la interacción del ocupante con el ambiente es más significativa.

La ABNT 15220-3 (2005), al establecer zonas bioclimáticas brasileñas, ya incorpora la idea de que se necesitan diferentes estrategias constructivas para garantizar el confort en distintas regiones del país, considerando la capacidad de adaptación.

## La Importancia del Confort Térmico en el Proyecto Arquitectónico

La importancia del confort térmico en el proyecto arquitectónico reside en su capacidad para impactar directamente en la salud, el bienestar y la productividad de los usuarios de un espacio. El confort térmico es un estado de equilibrio entre el cuerpo humano y el ambiente, donde el intercambio de calor se produce de forma que no genere sensaciones excesivas de calor o frío (Frota; Schiffer, 2015). La incorporación de estrategias bioclimáticas y la selección de materiales adecuados en el proceso de diseño son fundamentales para lograr este estado.

Integrar el confort térmico desde las fases iniciales del proyecto es crucial para garantizar ambientes saludables, energéticamente eficientes y funcionales. Un proyecto que descuida el confort térmico puede resultar en edificaciones que consumen excesiva energía para climatización artificial, generando altos costos operativos e impactos ambientales negativos.



# Capítulo 3 - *Donde el calor hierde y la arquitectura calla*

*“Cuando la casa no protege, el clima castiga”.*

- Consecuencias del Disconfort Térmico y Desafíos Constructivos
- Efectos del desconfort térmico en las personas
- Efectos generales y físicos
- Impacto psicológico y cognitivo
- Impacto socioeconómico y en productividad
- Vulnerabilidad en Brasil y Foz do Iguaçu
- Problemas térmicos en la albañilería liviana.

## Consecuencias del Desconfort Térmico y Desafíos Constructivos

En el capítulo anterior se presentaron los principios del confort térmico y los factores que lo condicionan, ofreciendo una base para entender cómo se percibe y se regula el bienestar ambiental. A partir de este punto, el enfoque se desplaza hacia lo que ocurre cuando ese equilibrio no se logra.

Exploraremos cómo la ausencia de confort térmico puede impactar en la calidad de vida, el rendimiento físico y cognitivo, y la relación que las personas establecen con el espacio que habitan. Además, se abordarán los obstáculos que surgen en distintos sistemas constructivos, ya sea por sus características materiales, decisiones de diseño o por las condiciones climáticas del entorno.

### Efectos del desconfort térmico en las personas

Cuando un ambiente no proporciona las condiciones térmicas adecuadas, las personas experimentan desconfort térmico, lo que puede tener una serie de efectos negativos a nivel fisiológico, psicológico y de rendimiento. Mantener un ambiente térmicamente confortable no es solo una cuestión de preferencia, sino una necesidad para la salud y la productividad.

## Efectos generales y físicos

El desconfort térmico ya sea por calor o frío puede desencadenar respuestas fisiológicas adversas en las personas. Un estudio en un ambiente de oficina indicó que temperaturas elevadas (30 °C) generaron empeoramiento de la percepción de calidad del aire, aumento de síntomas del síndrome del edificio enfermo (SEE), cambios en el estado de ánimo y reducción del rendimiento en tareas cognitivas y físicas. Los sujetos experimentaron, además, incremento significativo de frecuencia respiratoria y cardíaca, junto a baja saturación de oxígeno arterial. (Wargocki, P.; Wyzga, R. E.; Wypych, A. 2010)

En el contexto brasileño, estudios epidemiológicos muestran que el estrés térmico extremo se asocia a un mayor número de hospitalizaciones y muertes por enfermedades respiratorias y cardiovasculares. constataron que eventos de calor o frío intenso en grandes centros urbanos brasileños, como São Paulo y Porto Alegre, aumentaron en hasta un 18% la mortalidad por enfermedades respiratorias, especialmente en ancianos y personas con comorbilidades (Lima et al., 2018).

## Impacto psicológico y cognitivo

El desconfort térmico no solo afecta el cuerpo, sino también el estado mental y emocional. Según Iwasaki et al. (2013), temperaturas por encima de 26 °C generan mayor fatiga mental, sensación de letargo y disminución del deseo de realizar actividades cotidianas. En ambientes laborales, estos efectos también reducen el rendimiento cognitivo y la capacidad de concentración.

De forma similar, Yoshida et al. (2010), demostraron que las personas que no pueden controlar las condiciones térmicas del ambiente tienden a presentar mayor nivel de ansiedad, estrés e insatisfacción, sobre todo en lugares como hospitales o escuelas donde el control ambiental es limitado.

## Impacto socioeconómico y en productividad

El calor también reduce directamente la productividad laboral. En un estudio con trabajadores de fábricas textiles en Camboya, Vongphachanh et al. (2025) encontraron que temperaturas por encima de los 31 °C y con alta humedad causaron síntomas como sudoración intensa (61%), fatiga (51%), cefalea (44%) y percepción de bajo rendimiento (54%). Este tipo de condiciones térmicas adversas se traduce en pérdida de productividad y mayor rotación laboral, especialmente en climas cálido-húmedos como los del sur de Brasil.

Además, el estrés térmico ha sido identificado como un factor de riesgo para accidentes laborales, particularmente en trabajadores expuestos al sol, adultos mayores, mujeres embarazadas y personas con enfermedades crónicas (Machado; Cavalcanti, 2024).

## Vulnerabilidad en Brasil y Foz de Iguazú

Brasil presenta alta vulnerabilidad poblacional a eventos térmicos extremos. En la ciudad de Pelotas (RS), por ejemplo, se identificaron episodios críticos de desconfort térmico durante las tardes de verano y noches de invierno, asociados a cambios sinópticos como la entrada de masas polares o altas presiones subtropicales (Castro et al., 2023).

En Foz do Iguaçu, la combinación de temperaturas elevadas y alta humedad relativa en verano intensifica la sensación térmica, llevando al agotamiento físico y a la reducción de la capacidad de concentración. Aunque no se hallaron estudios clínicos específicos en esta ciudad, los datos climáticos y la tipología constructiva predominante permiten inferir efectos similares a los observados en otras regiones subtropicales brasileñas, reforzando la necesidad de adoptar estrategias pasivas como forma de mitigación.

## Problemas térmicos en la albañilería liviana

La albañilería liviana, ampliamente usada en la construcción brasileña, presenta importantes desafíos térmicos. De acuerdo con Sánchez (2020), la transmitancia térmica (U) de muros de bloques cerámicos huecos sin revestimiento externo puede alcanzar valores de  $2,61 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , lo que indica una elevada transferencia de calor hacia el interior en condiciones de sol directo.

Los bloques de mayor dimensión reducen esta cifra a  $1,96 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , mientras que un revestimiento interno de yeso reduce ligeramente la transmisividad, solo en un 5 a 7%, evidenciando que estos sistemas tienen una capacidad limitada para retardar la entrada de calor.

Esta elevada transmitancia está directamente relacionada con la baja inercia térmica de los materiales utilizados. Según la NBR 15.575, la masa térmica es fundamental para suavizar las variaciones de temperatura diaria, lo cual no ocurre en los muros ligeros.

Como señala la norma, estos muros no cumplen en muchos casos con los requisitos de rendimiento térmico, ya que no logran retardar ni reducir adecuadamente el flujo térmico, generando ambientes interiores más cálidos de lo esperado.

Asimismo, las construcciones en albañilería liviana presentan baja capacidad de regulación higrotérmica. Aun cuando estudios en climas subtropicales, como en Campinas, muestran que muros de ladrillo cerámico con aislamiento y revestimiento aún enfrentan problemas de condensación y humedad interior, lo que compromete tanto el confort térmico como el bienestar de los habitantes.

Un trabajo de Souza et al. (2023), realizado en bloques de concreto con incorporación de lana de roca en la Zona Bioclimática 8 (clima subtropical húmedo), concluyó que solamente al agregar un 30% de lana de roca, junto con revestimiento y pintura externa de color claro, se logró una mejora en el desempeño térmico de la albañilería. Esto sugiere que las construcciones livianas, sin intervención adicional, no alcanzan niveles aceptables de confort térmico pasivo en Brasil.

En Foz do Iguaçu, ciudad ubicada en la Zona Bioclimática 3, presenta un clima marcado por veranos cálidos, inviernos suaves y amplitudes térmicas de alrededor de  $11^\circ\text{C}$  entre estaciones. En este contexto, la inercia térmica moderada no es suficiente para amortiguar el calor extremo del verano ni las eventuales olas frías invernales.

El trabajo de Alves (2022), sobre tipologías habitacionales en Foz de Iguazú confirmó que la mayoría de las viviendas tradicionales presentan bajo confort térmico, con un consumo energético elevado para climatización en verano, debido a la negligencia de materiales aislantes en techos y fachadas.

## Problemas térmicos en la albañilería liviana

La albañilería liviana ha ganado popularidad en la construcción civil brasileña debido a su facilidad de ejecución, menor peso estructural y rapidez en la obra. Sin embargo, su desempeño térmico aún genera discusiones técnicas, especialmente en regiones con climas extremos. Según Sánchez (2020), la transmitancia térmica de la albañilería liviana alcanza valores de hasta  $2,61 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ , lo que representa una eficiencia inferior en comparación con sistemas tradicionales como la albañilería maciza.

Para entender estos valores, es importante saber que la transmitancia térmica (U) es una medida que indica cuánto calor atraviesa un material. Se expresa en  $\text{W/m}^2\cdot\text{°C}$  (vatios por metro cuadrado por grado Celsius), y cuanto menor sea este valor, mejor será el aislamiento térmico. Según la norma ABNT NBR 15220-3:2005, los valores óptimos para paredes externas varían entre  $1,00$  y  $2,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ , dependiendo del clima de cada región. Por lo tanto, un muro con transmitancia de  $2,61 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ , como en el caso de la albañilería liviana, está por encima del límite recomendado para zonas más cálidas o frías, lo que puede comprometer el confort térmico interior.

Los bloques utilizados en este tipo de construcción, generalmente de concreto celular o cerámico con cavidades internas, contribuyen a la reducción de la transferencia de calor. Esto se debe a la baja densidad de los materiales y al diseño geométrico que favorece la formación de cámaras de aire.

De acuerdo con la norma ABNT NBR 15.575-1:2013, la transmitancia térmica está directamente relacionada con la densidad aparente y el espesor del elemento constructivo, siendo fundamental considerar estos parámetros en la etapa de proyecto.

Souza et al. (2022) realizaron un estudio comparativo entre sistemas de albañilería convencional y liviana en edificaciones residenciales en São Paulo, concluyendo que la albañilería liviana presenta un mayor riesgo de sobrecalentamiento en verano, especialmente cuando no se acompaña de estrategias pasivas como sombreamiento o ventilación cruzada. En este sentido, Alves (2022) destaca que el uso de revestimientos térmicos y pinturas reflectivas puede mitigar los efectos negativos, mejorando el confort térmico interior.

Además, investigaciones como la de Lima y Ferreira (2021) en la Universidad Federal de Pernambuco analizaron el comportamiento térmico de muros de albañilería liviana en condiciones reales, utilizando sensores de temperatura y humedad. Los resultados mostraron que, aunque la respuesta térmica es más rápida, la inercia térmica es menor, lo que implica fluctuaciones más intensas en la temperatura interna.

Diversos estudios han demostrado que sistemas constructivos con tierra cruda, como el adobe y la taipa, presentan un desempeño térmico superior. Estas técnicas tradicionales, ampliamente utilizadas en regiones semiáridas y tropicales, se caracterizan por su alta inercia térmica, baja transmitancia térmica y capacidad de regulación higratérmica natural.

Según Marques (2018), el adobe puede alcanzar valores de transmitancia térmica inferiores a  $0,80 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ , lo que lo convierte en una solución eficiente para el confort térmico en zonas bioclimáticas brasileñas. Este valor está muy por debajo del límite recomendado por la ABNT, lo que indica un excelente desempeño térmico. Además, la taipa, al ser una técnica de compactación de tierra húmeda, genera muros de gran masa térmica que estabilizan las temperaturas internas, reduciendo la necesidad de climatización artificial.

Estas características hacen que la construcción con tierra no solo sea una alternativa viable desde el punto de vista térmico, sino también una solución sostenible, al utilizar materiales locales y de bajo impacto ambiental. En este sentido, su comparación con la albañilería liviana revela que, aunque esta última ofrece ventajas constructivas como rapidez y menor peso, su desempeño térmico puede ser inferior si no se acompaña de estrategias pasivas o soluciones híbridas.

Los problemas de condensación también deben ser analizados con criterio técnico. La condensación superficial e intersticial puede comprometer el desempeño térmico de los materiales, aumentar la conductividad térmica y favorecer patologías como el moho. Según Pires et al. (2021), la falta de barreras de vapor y el uso de materiales con baja capacidad higratérmica en sistemas livianos puede intensificar estos efectos. La norma ABNT NBR 15220 establece criterios para el diseño térmico en función de las zonas bioclimáticas brasileñas, siendo esencial considerar la humedad relativa, la ventilación y el uso de revestimientos adecuados para evitar la condensación.

Así, en la ciudad de Foz do Iguaçu, donde se desarrolló este estudio, los problemas de la albañilería liviana se evidencian en falta de capacidad de retardar la ganancia térmica solar, escasa inercia por la baja masa constructiva, elevada transmitancia y deficiente manejo de humedad.

Estos aspectos resultan en un ambiente interior poco confortable y dependiente de sistemas activos de climatización, por lo que se debe considerar la incorporación de soluciones pasivas como la taipa de mano, para mejorar la eficiencia térmica de las viviendas de Foz de Iguaçu.

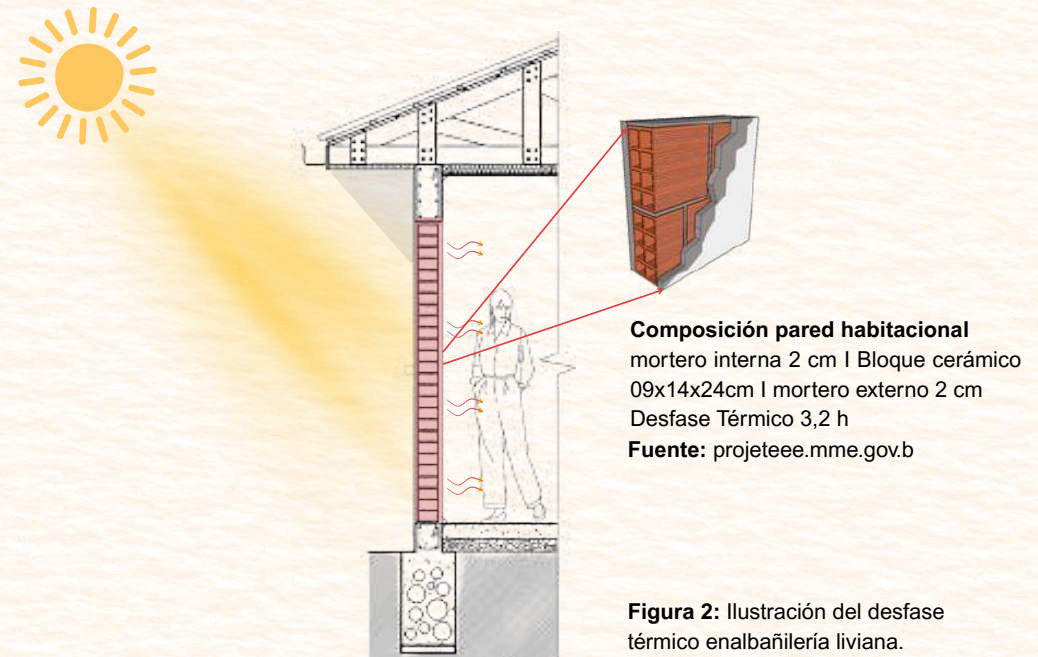


Figura 2: Ilustración del desfase térmico en albañilería liviana.

## Influencia del comportamiento de los usuarios en el desempeño térmico

El desempeño térmico de una edificación no depende únicamente de sus características físicas, materiales o soluciones pasivas incorporadas en el proyecto. Un factor determinante y muchas veces subestimado es el comportamiento de los usuarios, que puede alterar las condiciones internas de confort térmico y el consumo energético.

Acciones cotidianas como abrir o cerrar ventanas, el uso de cortinas, la operación de sistemas de climatización, la ocupación en horarios no previstos o incluso la cantidad de personas en un ambiente influyen directamente en la temperatura interna y en la eficiencia de los sistemas térmicos. Según Sorgato (2020), en simulaciones realizadas en edificaciones residenciales multifamiliares, se observó que el comportamiento de los ocupantes generó variaciones de hasta 130% en la demanda energética para calefacción y refrigeración, incluso en edificios con buen diseño térmico.

Barbosa (2024) destaca que en ambientes institucionales, como universidades, el uso excesivo de aire acondicionado, el cierre inadecuado de aberturas y la ocupación fuera de los horarios previstos comprometen el desempeño térmico, elevando el consumo energético y reduciendo la efectividad de estrategias pasivas. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar el factor humano como parte integral del análisis térmico.

Además, Scheer y Lamberts (2018) identificaron perfiles de comportamiento en usuarios de viviendas naturalmente ventiladas, demostrando que aquellos con mayor conciencia ambiental y hábitos adaptativos (como el uso estratégico de ventilación cruzada) lograban mejores condiciones térmicas sin recurrir a sistemas activos.

# Capítulo 4 - *Cuando el entorno guía al diseño*

*“Diseñar no es dominar: es aprender a seguir los ritmos del sol, del aire y de la tierra”.*

- Estrategias Pasivas para Mejorar el Confort Térmico
- Orientación Solar y Control de Radiación
- Ventilación Natural
- Aislamiento Térmico y Masa Térmica

## Estrategias Pasivas para Mejorar el Confort Térmico

Las estrategias pasivas son aquellas que no dependen de sistemas mecánicos o eléctricos para controlar el ambiente térmico interno. Estas soluciones utilizan los propios recursos del entorno como el sol, el viento, la masa térmica y la orientación para mantener condiciones de confort térmico dentro de los espacios habitados (Oliveira; Ghisi, 2019).

## Orientación Solar y Control de Radiación

La orientación del edificio y el control de la radiación solar son fundamentales para optimizar el confort térmico. En climas cálidos, se busca minimizar la ganancia de calor solar, mientras que en climas fríos se aprovecha para la calefacción pasiva.

"A orientação solar adequada é o primeiro passo para o projeto bioclimático, influenciando diretamente a necessidade de aquecimento e resfriamento" (Ghisi, 2017, p. 55).

"O uso de brises, beirais e outros elementos de sombreamento é crucial para controlar a incidência solar nas fachadas, evitando o superaquecimento em períodos de alta insolação" (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014, p. 112).

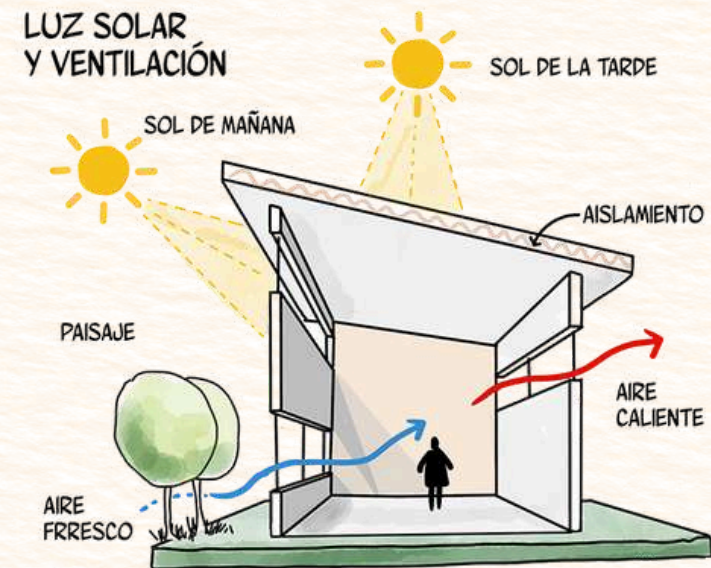
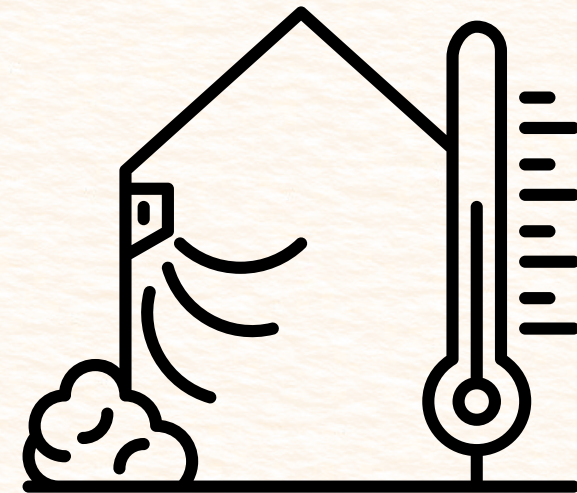


Figura 3: Ilustración de la orientación solar en edificaciones Fuente: pinterest

## Ventilación Natural

La ventilación natural es una de las estrategias pasivas más efectivas para disipar el calor y renovar el aire en espacios interiores. Puede ser cruzada (entradas y salidas de aire en paredes opuestas) o por efecto chimenea (el aire caliente asciende y sale por aberturas superiores).

"A ventilação natural é essencial para a remoção do calor excessivo e poluentes internos, contribuindo significativamente para o conforto térmico e a qualidade do ar" (ABNT NBR 15220-3, 2005, p. 4).

"A concepção de aberturas estratégicas, como janelas em lados opostos ou shafts verticais, facilita o fluxo de ar e a dissipação térmica" (Romero, 1999, p. 98).

## Aislamiento Térmico y Masa Térmica

El aislamiento térmico reduce la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio, mientras que la masa térmica almacena calor y lo libera lentamente, atenuando las fluctuaciones de temperatura interna.

"Materiais isolantes, como lã de rocha, poliestireno expandido ou celulose, minimizam as perdas e ganhos de calor indesejados através das paredes, telhados e pisos" (Pinheiro; Andradre, 2011, p. 87).

"A incorporação de massa térmica em elementos construtivos, como paredes de concreto ou tijolos maciços, é uma estratégia eficaz para estabilizar a temperatura interna, especialmente em locais com grandes variações diárias" (Oliveira; Rocha, 2016, p. 45).



Figura 4: Ilustración sobre la ventilación natural Fuente: pinterest

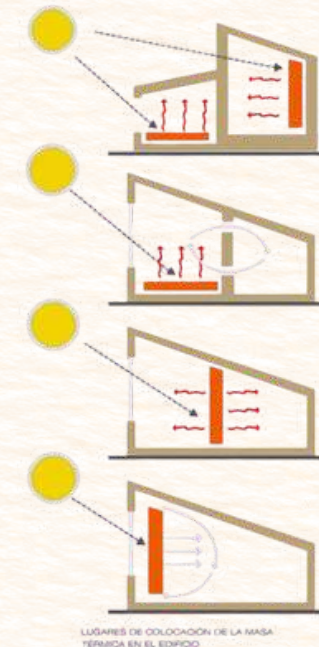


Figura 5: Ilustración sobre la masa térmica Fuente: pinterest

# Capítulo 5 - *Cuando la tierra vuelve a hablar, enseña a construir*

*“La modernidad construyó en alto, pero olvidó mirar al suelo que sabía”.*

- La Tierra como material constructivo
- Breve Historia de la bioconstrucción y el uso de la Tierra como material constructivo
- Estado actual de la construcción con Tierra
- Construcción con Tierra en América Latina
- Construcción con Tierra en Brasil
- Pau-a-pique (Taipa de mano)
- Ventajas y desventajas del Pau a Pique
- Revalorización contemporánea

## La tierra como material constructivo



El creciente interés en la construcción sostenible ha reavivado la relevancia de materiales vernáculos y técnicas ancestrales. Entre estos, la tierra como material constructivo se destaca por su abundancia, bajo impacto ambiental y excelentes propiedades térmicas. Históricamente, la tierra ha sido fundamental en la edificación a nivel global, adaptándose a diversos climas y culturas (Minke, 2006).

Sin embargo, con la aparición de la industrialización y la preferencia por materiales como el hormigón y el acero, su uso disminuyó notablemente (Zeltia, 2011). No obstante, la crisis climática y la búsqueda de soluciones constructivas más resilientes y eficientes han impulsado una revalorización de la tierra.

Sus propiedades inherentes, como la capacidad térmica y la regulación de la humedad, la convierten en una alternativa idónea para climas variados, incluyendo los cálidos y húmedos como el de Foz de Iguazú

## Breve Historia de la bioconstrucción y el uso de la tierra como material constructivo.

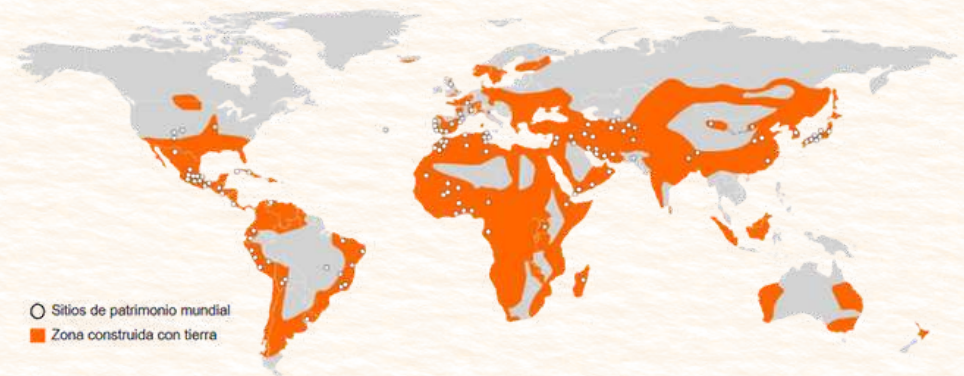


Figura 6 Mapa mundial de arquitectura con tierra

Fuente: CRAterre.org

La primera materia que usó el hombre para fabricar su abrigo permanente fue la tierra, citando como ejemplo a Mesopotamia, los adobes más antiguos reportados en el Viejo Mundo son del Medio Oriente. Los modelados a mano se remontan a 9000 años a.C. y los hechos en molde a 7000 a.C. (Sauvage 2011). En el nuevo mundo en la zona andina el uso de bloques de tierra se ha estimado para el 4000 a.C. (Mauricio 2016).

El origen de la bioconstrucción como concepto se remonta a la década de los 70, cuando en Europa se le dio nombre a la corriente arquitectónica que retomó el uso de materias primas naturales para conseguir construcciones sostenibles y ecológicas. Sin embargo, la historia y evolución de la bioconstrucción se remontan a prácticas ancestrales de construcción con materiales naturales.

Teniendo esto en cuenta podemos decir que la bioconstrucción es el uso de técnicas tradicionales de construcción que revela conocimientos empíricos transmitidos de generación en generación.

Asociados con la construcción de refugios primitivos que se fueron enriqueciendo gradualmente con tecnología adecuada a las necesidades de las comunidades. El sedentarismo, la explotación del medio ambiente, la organización cada vez más compleja de los grupos sociales han acelerado la evolución del arte de la construcción.

## Estado actual de la construcción con tierra

La tierra es el recurso más abundante y accesible en todo el planeta, lo que ha llevado a aproximadamente un tercio de la población mundial a residir en estructuras construidas con este material. La mayoría de estas construcciones son realizadas y mantenidas por los propios usuarios, lo que demuestra su practicidad y adaptabilidad a diversas necesidades.

La versatilidad de la tierra como material de construcción ofrece una amplia gama de posibilidades en cualquier proyecto, lo que la convierte en una opción técnica y económicamente viable, dado que puede ser obtenida en el mismo lugar donde se llevará a cabo la construcción. A pesar de estas ventajas evidentes, la tierra ha perdido relevancia y credibilidad frente al avance tecnológico que ha marcado la era de la industrialización (Rotondaro 2007).

La construcción con tierra es una técnica tradicional, económica, accesible y bastante versátil, que se ha mantenido en los países menos desarrollados, en los que los medios para construir sus viviendas, tanto materiales como de mano de obra, son mucho más limitados. Actualmente, este tipo de construcción se enfoca en países menos desarrollados, sobre todo en el hábitat de interés social. (Gallego, Sánchez; Torija, Jorge, Fernández; Nieto, M<sup>a</sup> Antonia 2014).

Esta técnica, aunque ampliamente utilizada y eficaz, a menudo se encuentra estigmatizada, especialmente en los países más desarrollados. La tierra, en la percepción popular, puede asociarse con la pobreza, su aparente falta de durabilidad, su vulnerabilidad frente a desastres naturales o incluso con la propagación de enfermedades.

Sin embargo, es importante reconocer que estos prejuicios suelen ser el resultado de una visión limitada o desinformada. En la mayoría de los casos, si se presentan tales problemas, suele ser debido a una mala implementación de la técnica, una construcción deficiente o un mantenimiento inadecuado, y no a las propiedades inherentes de la tierra como material de construcción. Es fundamental desafiar estos estigmas y promover una comprensión más completa y precisa de las ventajas y capacidades de esta técnica constructiva.

De hecho, la durabilidad o resistencia de este sistema de construcción queda verificado ante la existencia de ciudades muy antiguas, cuyas edificaciones están realizadas con tierra, como ocurre en el caso de la figura 7 y 8. Estos ejemplos demuestran que cualquier edificación de este tipo puede perdurar durante miles de años. Su buen estado siempre dependerá de su mantenimiento.



**Figura 7.** Ciudad de Sana'a en Yemen. Patrimonio arquitectónico anterior al s. XI. Las casas-torre de gran altura construidas con tierra prensada son prueba de la resistencia y durabilidad de este sistema. **Fuente:** Oleg Znamenskiy



**Figura 8.** Ruinas de la ciudad de Paquimé, en México (Año 700 d.C). Que los muros de esta antigua ciudad hayan perdurado, son una muestra de la durabilidad de este sistema constructivo. **Fuente:** El Diario

Actualmente, se está produciendo una demanda cada vez mayor de vivienda construida con tierra, por parte de personas sensibilizadas con el medio ambiente y que buscan medios de construcción ecológicos y saludables. Con ello, los posibles prejuicios que se pudieran tener con respecto a esta técnica se van disipando poco a poco. En países como Australia, EEUU, Francia, Suiza y Alemania, se está dando mayor énfasis en el desarrollo tecnológico de este sistema constructivo, siempre con la modernidad como base, como se ve en la figura 8 (Zeltia 2011).



**Figura 9.** Casa de tierra apisonada, en Schlins, Austria. Martin Rauch y Roger Bolthausen. **Fuente:** "Casa Raus", Tectónica

## Construcción con tierra en América Latina

La historia de la bioconstrucción en América Latina tiene sus raíces en las prácticas tradicionales de construcción de las culturas indígenas precolombinas, que utilizaban materiales naturales disponibles localmente como adobe, paja, madera y piedra para construir sus viviendas y estructuras (Figura 10 y 11). Estas técnicas fueron adaptadas y adoptadas por los colonizadores europeos durante la época colonial.



**Figura 10.** Culturas moche e chimú: Sala de audiencia del palacio Nik-an, foto Melissa Ramos da Silva Oliveira, 2019 **Fuente:** vitruvius.com.br



**Figura 11.** Cultura Maya: Tikal Guatemala, foto Shutterstock **Fuente:** guidadasemana.com.br

Sin embargo, con el tiempo, la industrialización y la urbanización llevaron a una mayor utilización de materiales sintéticos y técnicas de construcción convencionales en América Latina. Este cambio trajo consigo una serie de consecuencias ambientales, sociales y culturales. La dependencia de materiales sintéticos y la adopción de métodos de construcción poco sostenibles contribuyeron a la degradación del medio ambiente y a la pérdida de conocimientos tradicionales.

## Construcción con tierra en Brasil

Brasil no es una excepción en el uso de tierra cruda como material de construcción; de hecho, el país tiene una larga trayectoria en su aplicación en construcciones, evidenciada desde el período colonial. Entre los ejemplos más destacados de la arquitectura territorial brasileña se encuentran los edificios de la sociedad civil, término que engloba tanto las residencias de la clase con mayor poder económico como las de los pobres y esclavos (Vargas, 1994: pg.81).

El pau-a-pique (en lengua portuguesa, en español es conocida como quinchá o técnica mixta), por ejemplo, era comúnmente utilizado en todo Brasil, especialmente en las viviendas de la población de bajos recursos, que a menudo tenían techos de tejas o incluso de paja.

La taipa ganó protagonismo en el Planalto Paulista debido a la abundancia de suelos arenosos en esta región. La composición ideal de la tierra se lograba fácilmente con la adición de arena o guijarros, como era práctica común en Portugal, país con una larga tradición con esta técnica constructiva y difusor de la misma en Brasil.

Sin embargo, durante el Brasil Colonial, esta no era una práctica ampliamente adoptada, lo que favoreció el predominio de la tierra apisonada en la construcción de viviendas, casas urbanas, cárceles e iglesias, principalmente en la región de São Paulo (Vargas, 1994). Esto demuestra que, incluso bajo la influencia de la cultura portuguesa, Brasil solo incorporó parcialmente la técnica de construcción en taipa.

Brasil, es un país de dimensiones y características continentales, donde la construcción civil se presenta como un campo en constante evolución en términos de expresión y prácticas. La disparidad en la población y los recursos físicos y financieros a lo largo del territorio nacional exige que las técnicas de construcción se adapten continuamente para satisfacer las necesidades de infraestructura, vivienda y empleo para miles de trabajadores.

Según Prompt y Librelotto (2018), la ejecución de obras sin la supervisión técnica de profesionales calificados en arquitectura refleja la realidad general de la construcción civil, donde la mayoría de la población construye o renueva sus propiedades sin recurrir a expertos. Este fenómeno ha contribuido significativamente a la dificultad de difundir técnicas y estándares necesarios.

En el caso específico de la construcción con tierra, esta situación puede ser atribuible a la falta de normativas claras y técnicas estandarizadas, así como a la disponibilidad de mano de obra especializada, que aún es limitada en gran medida.

En el contexto de popularizar una técnica constructiva, es decir, cuando reúne elementos de divulgación y mejora, siendo considerada técnicamente segura y económicamente viable, se puede decir que la estandarización es un elemento importante para este objetivo. En el contexto de la construcción civil, la Asociación Brasileña de Normas Técnicas ABNT ya publicó más de 800 normas técnicas, que abarcan los más variados temas.

La misma, denominada NBR's, contribuyen a asegurar la calidad y estandarización de procesos y técnicas en el campo, orientando a profesionales y organizaciones en la búsqueda de construcciones que cumplan con los requisitos de aceptación. Además, el conjunto de normas técnicas es un instrumento para brindar seguridad jurídica a las actividades que se desarrollan en el sector.

Sin embargo, cuando se trata de construcción con tierra, el panorama puede ser considerablemente diferente. Desde 1984, en Brasil, solo se han publicado 14 normas relacionadas con el tema. La mayoría se refiere a materiales, como las relacionadas con los bloques de tierra comprimida (BTC), elemento utilizado fundamentalmente en construcciones basadas en el concepto de materiales naturales. A lo largo de los años, algunas de estas normas han sido objeto de revisiones y mejoras.

Sin embargo, el número absoluto de publicaciones es relativamente mínimo en comparación con otras publicaciones sobre construcción civil en el país. En enero de 2020, la ABNT publicó la norma NBR16814:2020 - Adobe Requisitos y métodos de prueba, en 2022 la NBR 17014 - Tierra apisonada y ahora, a finales de 2023, la norma de Taipa de mano está en discusión (Terra Brasil, 2022).

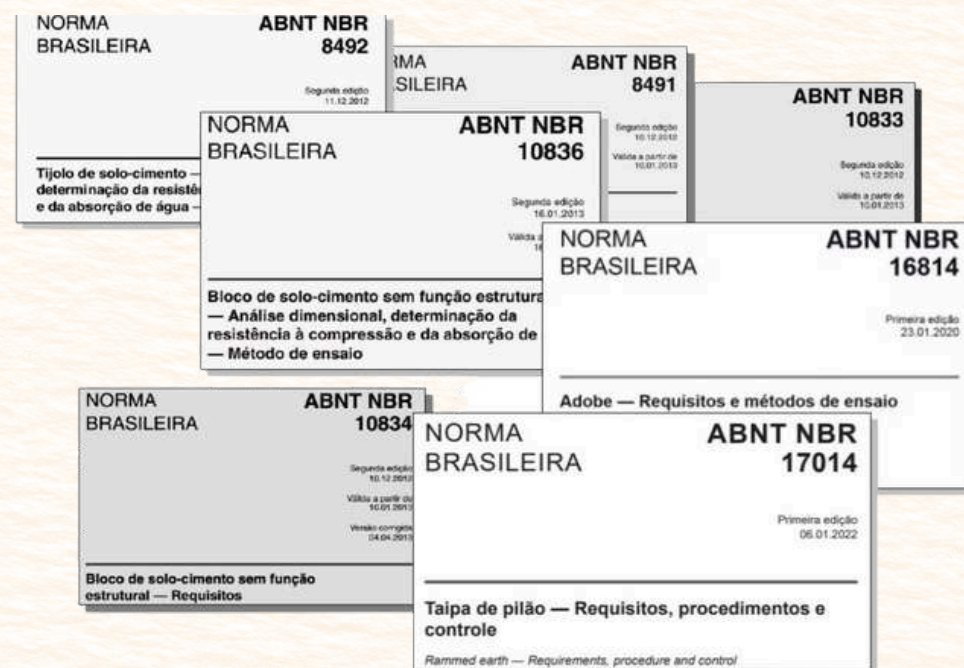
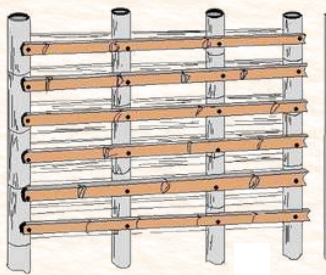


Figura 12 Normas para construcciones en tierra (ABNT)

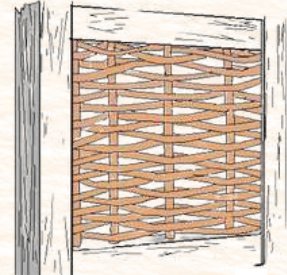
Fuente: Terra Brasil

## Pau-a-pique (Taipa de mano)

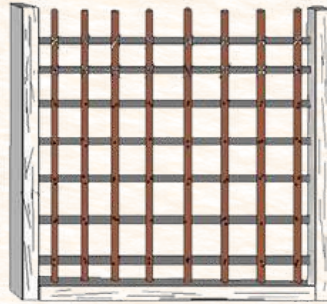
El pau-a-pique es una técnica de construcción de paredes de cerramiento que utiliza tierra cruda como material principal. A diferencia de otras técnicas como el adobe y la taipa de pilón, no es estructural, sino de sellado, por lo que siempre requiere de una estructura independiente, generalmente de madera (Figura 13, 14, 15).



**Figura 13.** enrejada en bambú, rala, doble y latera  
**Fuente:** Proterra



**Figura 14.** reticular, estrecha, simple y axial  
**Fuente:** Proterra



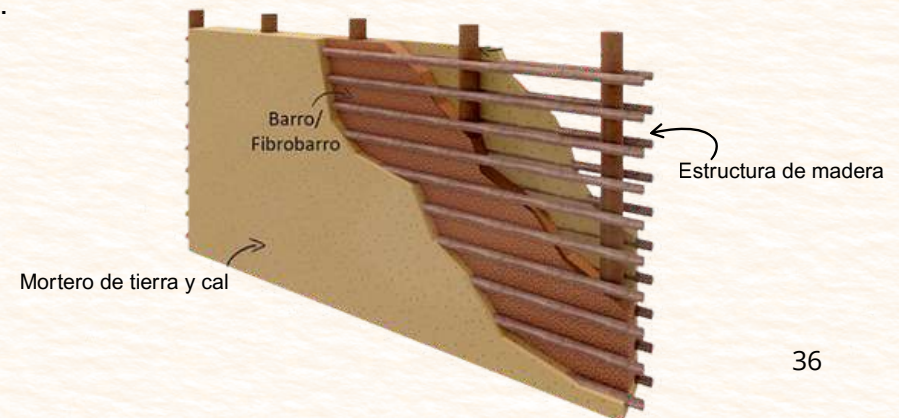
**Figura 15.** tejida con trama de elementos largos, estrecha y axial  
**Fuente:** Proterra

Esta técnica varía en ejecución y denominación según la región donde se encuentre. Se utiliza principalmente en el interior de los edificios y en pisos superiores debido a su ligereza, pero también se pueden encontrar casos donde se utiliza en toda la estructura. La disponibilidad local de materiales como tierra, madera o fibra vegetal la convierte en una opción económica y preferida en muchas circunstancias (Ávila, 1996, p.69).

Sobre el origen del uso del pau-a-pique en Brasil, la información disponible es limitada. A diferencia de otras técnicas constructivas como la taipa de pilón, que ya se empleaba en Portugal antes del siglo XVI, el pau-a-pique parece haber surgido de la combinación de conocimientos y prácticas de los portugueses, africanos e indígenas en la construcción de edificaciones (Lemos 1999, p. 42).

Freyre (1981, p. 302-303) afirma que esta técnica resultó de la fusión entre las técnicas indígenas de empalizadas y estructuras de madera con las prácticas portuguesas de trabajar con tierra cruda y recubrir las paredes con barro, influenciadas también por las técnicas africanas. Sin embargo, la documentación específica sobre este proceso es escasa.

De acuerdo con Souza (1996, p.109), la técnica de construcción del pau-a-pique demuestra una solución ingeniosa, caracterizada por ensamblajes perfectos que prescinden del uso de hierros, evocando así la habilidad en la carpintería naval, una destreza ampliamente reconocida y practicada por los portugueses. Esta similitud sugiere una influencia cultural en la ejecución de esta técnica constructiva en Brasil.



**Figura 16** Modelo tridimensional del muro Pau a Pique.

**Fuente:** Aqui sur

## Ventajas y desventajas del Pau a Pique

Como ventajas en la construcción, incluye su capacidad para adaptarse a diversas condiciones ambientales, su flexibilidad en el uso de materiales, su resistencia estructural en zonas sísmicas, la promoción de la participación comunitaria y mano de obra local, su potencial para ser económicas y contribuir al desarrollo comunitario, así como su rapidez de construcción y su eficiencia en términos acústicos y térmicos. Además, resalta su idoneidad para terrenos con capacidad de carga limitada debido a su ligereza (Vieira; Negrini; Falleiros, 2011: pg.62 ).

Como desventajas en la construcción, incluyen la percepción social negativa debido a su asociación con la pobreza y la falta de mantenimiento adecuado, así como la necesidad de una construcción cuidadosa y de alta calidad para garantizar la durabilidad de la estructura. También se encuentra el riesgo de debilidad estructural si la madera no se trata adecuadamente contra hongos e insectos, así como la incompatibilidad con cubiertas pesadas que pueden afectar negativamente su estabilidad. Además, se advierte sobre el peligro de incendios si no se protegen adecuadamente las estructuras y sobre la creencia errónea de que estas técnicas propician enfermedades como el mal de Chagas debido a la presencia de insectos. Para contrarrestar estas desventajas, se sugiere el uso de revestimientos adecuados y un mantenimiento regular para prevenir problemas futuros (Vieira; Negrini; Falleiros, 2011: pg.63 ).



**Figuras 17,18.** o pau a pique de volta em projetos para novas moradias  
**Fuente:** Tribuna de Mina

## Revalorización contemporánea

En las últimas décadas, la arquitectura con tierra ha cobrado protagonismo en América Latina, combinando saberes ancestrales con innovaciones contemporáneas. Un claro ejemplo de esta tendencia es el centro comunitario de artesanía Chaki Wasi, ubicado en los andes ecuatorianos y galardonado en la XIII Bienal Iberoamericana de Arquitectura y Urbanismo.

Este proyecto se destaca por el uso de técnicas vernáculas y materiales locales, generando espacios sostenibles, sino que también identificándose con la cultura de la región (Díaz Pérez,2004). En Chile el uso de la quincha, conocida también como Taipa de mano o Pau a Pique. Se ha adaptado a proyectos contemporáneos con eficiencia energética como ejemplo el Panal, Condominio Regenerativo Sustentable (Archdaily,2024).

A pesar de sus beneficios, construir con tierra tiene sus desafíos como la percepción de inferioridad frente a materiales industrializados y la necesidad de normativas que respalden y regulen estas técnicas. Sin embargo, el creciente interés por lo sustentable y la preservación de la identidad cultural ha impulsado investigaciones y proyectos que integran estas prácticas en el urbanismo contemporáneo. Eventos como el Meeting Terra Ibérica o Rede Terra Brasil que reúne a expertos en arquitectura con tierra comparten un renovado entusiasmo en la búsqueda de soluciones constructivas ecológicas y culturalmente arraigadas (Cadena ser,2024).



**Figura 19:** Centro Comunitario de Artesanía Chaki Wasi  
**Fuente:** Archdaily 2025



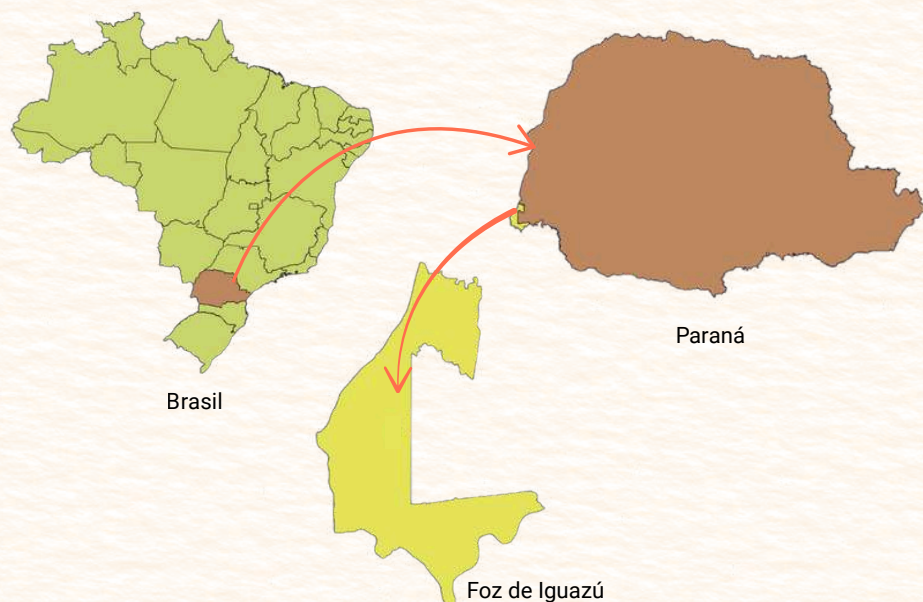
**Figura 20** Panal, Condominio Regenerativo Sustentable  
**Fuente:** Archdaily 2025

# Capítulo 6 - *Donde el clima invita a pensar la arquitectura*

*“Foz murmura en humedad y calor. La arquitectura que la respeta, la dignifica”.*

- Breve Histórico del Municipio de Foz de Iguazú
- Clima del Municipio de Foz de Iguazú
- Estrategias Bioclimáticas para el Confort Térmico en Foz de Iguazú
- El Papel de la Inercia Térmica y Materiales de Tierra

## Breve histórico del Municipio de Foz de Iguazú



**Figura 21** Mapa esquemático de localización **Fuente:** Elaboración propia en base al programa Qgis

Foz de Iguazú cuenta con una estructura política, económica y social comparable a la de los municipios de gran tamaño en el estado de Paraná, destacándose por su posición geopolítica y ubicación privilegiada. La ciudad se caracteriza por su diversidad cultural, con 80 nacionalidades diferentes residiendo en ella. La economía local se basa principalmente en el turismo, con un fuerte enfoque en el comercio y los servicios. Esta investigación explora el desarrollo del turismo desde sus inicios en la región hasta la actualidad, analizando sus dimensiones geográficas y aspectos socioeconómicos (Martins; Ruschmann, 2010).

La colonización de Foz de Iguazú ocurrió bastante tarde en comparación con el descubrimiento de Brasil en 1500. A pesar de que el territorio fue explorado desde el siglo XIV, el municipio fue fundado recién a principios del siglo XX, específicamente el 14 de marzo de 1914. Sin embargo, a pesar de este inicio tardío, el poblamiento de la región se volvió muy denso en relación con su tamaño.

Porto Belo es uno de los barrios más antiguos de la ciudad de Foz de Iguazú. Su nombre tiene origen en la existencia de un puerto durante la década de 1960, que se empleaba para exportar madera de araucaria hacia Paraguay a través del río Paraná. Aunque el puerto ya no está en funcionamiento, el nombre del barrio se ha mantenido. Hoy en día, Porto Belo es hogar de residentes de clase media y baja. Está compuesto por aproximadamente trece pequeños barrios adyacentes, algunos de los cuales constan de apenas 5 o 6 calles. En cuanto a su actividad comercial, cuenta con establecimientos modestos como salones de belleza, farmacias, tiendas de abarrotes, bares y cafeterías, entre otros.

A pesar de su larga historia, Porto Belo no ha experimentado el mismo nivel de desarrollo que los barrios más nuevos. Aún enfrenta desafíos importantes en áreas como el saneamiento básico y sufre del estigma de ser percibido como un lugar peligroso. La mayoría de las viviendas, especialmente en la clase baja, son autoconstrucciones que carecen de asesoramiento técnico especializado, lo que resulta en un deficiente confort térmico. Esto lleva a un mayor consumo de energía para mantener las viviendas confortables.

## Clima del municipio de Foz de Iguazú

El clima de Foz de Iguazú es subtropical húmedo mesotérmico, clasificado por Köppen como "Cfa" (clima templado húmedo con verano cálido), que coincide con la clasificación actualizada por Alvares et al. (2014), también conocida como Cfa (clima subtropical húmedo, oceánico sin estación seca, verano cálido), por ser equivalente.

El grupo climático "C" indica clima templado cálido, con temperatura promedio del aire del mes más frío comprendida entre  $-3^{\circ}\text{C}$  y  $18^{\circ}\text{C}$ ; la temperatura promedio del mes más cálido mayor a  $10^{\circ}\text{C}$  y las estaciones de verano e invierno bien definidas. La región fundamental "f" indica clima húmedo, con precipitación en todos los meses del año; ausencia de estación seca definida y precipitación promedio del mes más seco superior a 60 mm. La clase climática "a" presenta verano cálido y la temperatura promedio del aire en el mes más cálido debe ser superior a  $22^{\circ}\text{C}$ .

La ciudad (a una altitud de 192 m) tiene una de las mayores amplitudes térmicas anuales del estado, con un valor aproximado de  $10^{\circ}\text{C}$  de diferencia promedio entre el invierno y el verano, debido a una menor influencia del mar. Por esta razón, los veranos suelen ser muy calurosos, con máximas promedio que alcanzan los  $33^{\circ}\text{C}$ , llegando a superar los  $40^{\circ}\text{C}$  en algunos años. Aunque los inviernos se consideran suaves, proporcionan caídas bruscas de temperatura que pueden llegar por debajo de cero durante el paso de frentes frías con masas de aire polar. Las lluvias suelen estar bien distribuidas durante el año, con una pequeña reducción en invierno.

La precipitación anual (Figura 22) varía alrededor de los 1.800 mm. A través de las normas climatológicas proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología (INMET), es posible verificar el patrón mensual de lluvias y temperatura.

El periodo más cálido ocurre de noviembre a febrero, cuando la temperatura máxima supera los  $30^{\circ}\text{C}$ . El periodo más frío ocurre entre junio y agosto, con la temperatura mínima alcanzando aproximadamente los  $10^{\circ}\text{C}$  en julio. La amplitud térmica diaria media, que indica la variación promedio del ciclo diurno, es de alrededor de  $13^{\circ}\text{C}$ , alcanzando su máximo en noviembre con  $14,5^{\circ}\text{C}$  y su mínimo en febrero con  $12,5^{\circ}\text{C}$ , representando en promedio las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas. En términos del ciclo estacional, la amplitud térmica anual es de alrededor de  $10^{\circ}\text{C}$  tanto para las temperaturas máximas como mínimas. Hay un patrón regular de lluvias a lo largo del año, como ocurre en la mayor parte de la Región Sur de Brasil, sin estaciones secas y lluviosas bien definidas, con una reducción de la precipitación en los meses más fríos (julio y agosto), con un mínimo en julio (84 mm) y un máximo en octubre (220 mm), seguido de enero (196 mm).

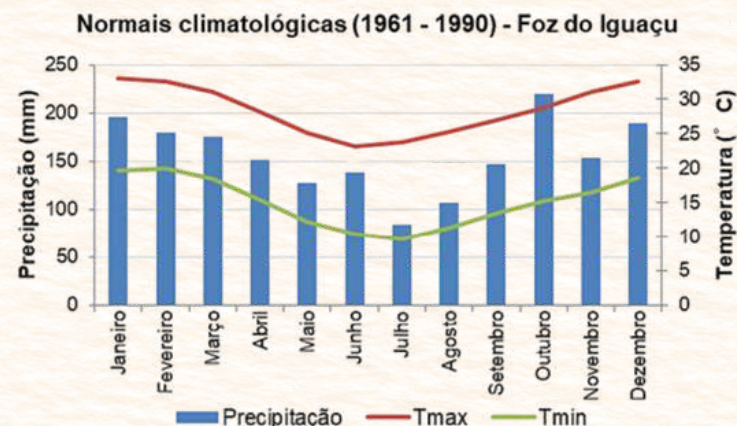


Figura 22: Representación de las precipitaciones en Foz de Iguazú Fuente: INMET

## Estrategias Bioclimáticas para el Confort Térmico en Foz de Iguazú

Dada la clasificación climática de la región, la Zonificación Bioclimática Brasileña señala a Foz de Iguazú como un área que requiere acciones tanto para el verano como para el invierno, con mayor énfasis en las estrategias de enfriamiento pasivo (J. S. C. Delgado, H. M. Sacht, E. Vettorazzi, 2016).

### Enfriamiento Pasivo (Verano):

- **Protección Solar:** Es fundamental proteger las superficies de la edificación de la radiación solar directa, especialmente las fachadas este y oeste, que reciben una gran carga solar (J. S. C. Delgado, H. M. Sacht, E. Vettorazzi, 2016). Elementos como aleros, parasoles (brises) y vegetación de sombreado son eficaces. En el caso específico de Foz do Iguazu, la fachada oeste es particularmente crítica debido a la incidencia solar vespertina.
- **Ventilación Natural:** Promover la ventilación cruzada y la ventilación nocturna es crucial para disipar el calor interno y remover la humedad, aprovechando las brisas predominantes (J. S. C. Delgado, H. M. Sacht, E. Vettorazzi, 2016). El dimensionamiento adecuado de aberturas y la ubicación de elementos de ventilación son esenciales.

- **Masa Térmica:** El uso de materiales con alta inercia térmica, como los derivados de la tierra (tapial, adobe, BTC), puede ayudar a absorber el calor durante el día y liberarlo durante la noche, suavizando los picos de temperatura interna y prolongando el confort (ABNT NBR 15575, 2013).

### Calefacción Pasiva (Invierno):

- **Aprovechamiento Solar:** Aunque menos crítico que el verano, la calefacción pasiva puede lograrse a través del aprovechamiento de la radiación solar en superficies acristaladas orientadas al norte (en el hemisferio sur) durante el día (ABNT NBR 15575, 2013).
- **Aislamiento Térmico:** Reducir las pérdidas de calor a través de la envolvente es importante en períodos más fríos. Materiales aislantes en paredes y cubiertas minimizan la fuga de calor interno.

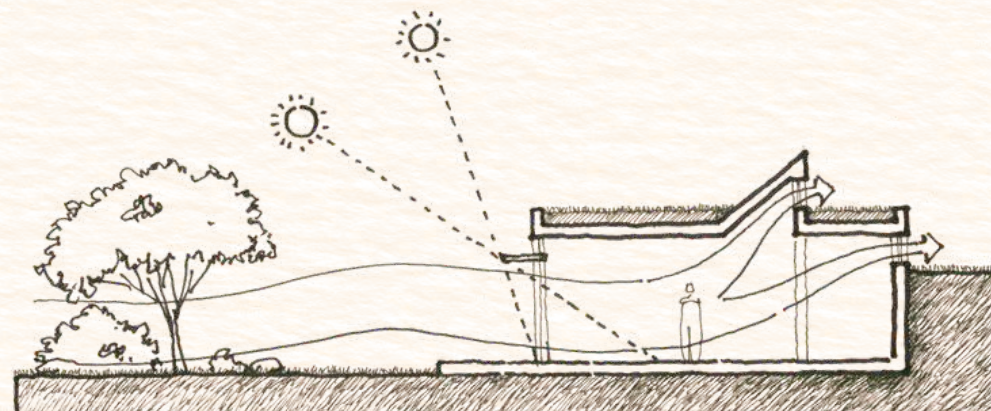


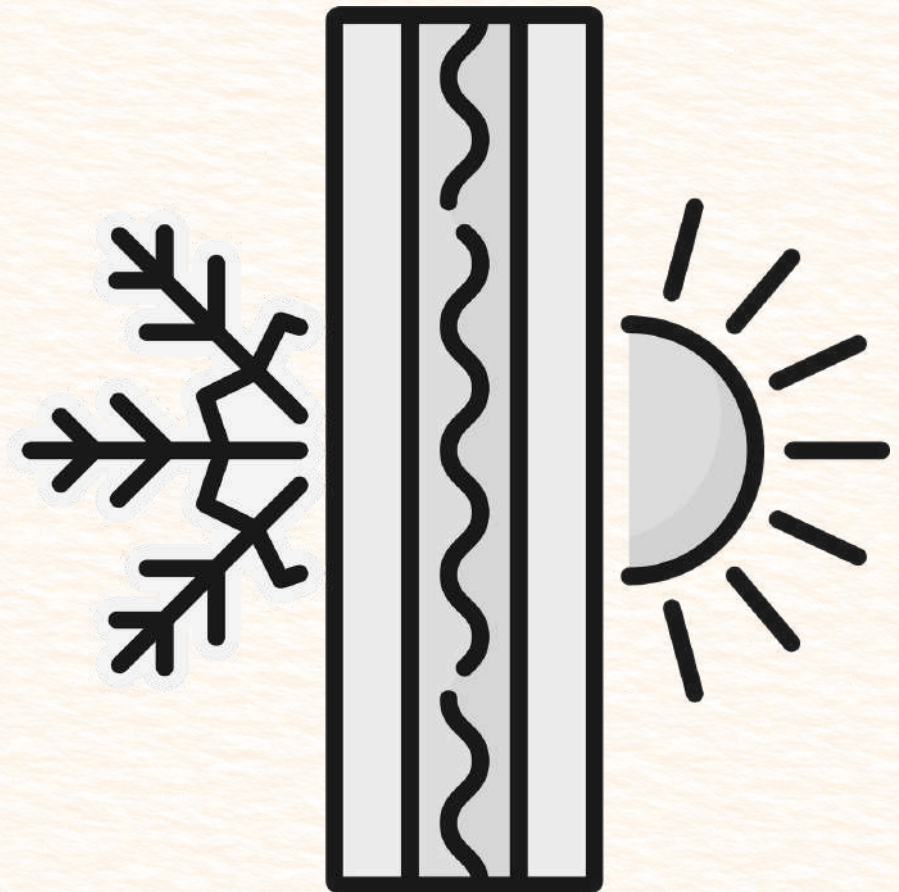
Figura 23: Representación de las estrategias Bioclimáticas Fuente: Seis cubos.com

## El Papel de la Inercia Térmica y Materiales de Tierra

En climas con grandes amplitudes térmicas diarias y fuerte incidencia solar, como Foz de Iguazú, la inercia térmica de las paredes y cubiertas es un factor determinante para el confort térmico (Incropera et al., 2011). Materiales con alta masa y calor específico, como la tierra, tienen la capacidad de almacenar y liberar calor lentamente, funcionando como un "amortiguador" térmico.

- **Regulación de Temperaturas:** Una pared de tierra, como la taipa de mano, puede absorber el calor del ambiente externo durante las horas más cálidas del día, impidiendo que ese calor llegue rápidamente al interior. Por la noche, cuando la temperatura externa disminuye, la pared libera lentamente el calor almacenado hacia el ambiente interno, ayudando a mantener temperaturas más estables y agradables (Ghavami; Marzban; Jahanbakhsh, 2015).
- **Reducción de la Demanda Energética:** Al estabilizar las temperaturas internas y reducir la amplitud de las variaciones, la inercia térmica proporcionada por los materiales de tierra puede disminuir significativamente la necesidad de usar sistemas de climatización artificial, lo que resulta en ahorro de energía y reducción del impacto ambiental (ABNT NBR 15575, 2013).

La comprensión de estos principios y la implementación de estrategias pasivas, como el uso de tierra en revestimientos, representan una opción viable para fomentar el confort térmico y la sostenibilidad de las construcciones en Foz de Iguazú, especialmente para viviendas de autoconstrucción que requieren mejoras en su confort térmico.



# Capítulo 7 -

## *Cuando el estudio toma forma*

*“Donde el método observa, el barro responde”.*

### Etapa I — Diseño y Construcción de los Prototipos Experimentales:

- Diseño de los Prototipos de Paredes.

### Etapa II — Caracterización del Contexto de Estudio y Preparación del Caso Real:

- Localización y Condiciones Climáticas.
- Descripción Constructiva Actual (casa estudio).
- Intervención en el Muro de Estudio.
- Características del panel de taipa de mano aplicado en la residencia

### Etapa III — Equipos de Medición:

- Protocolos de Recolección de Datos.
- Monitoreo en la Residencia de Estudio.
- Monitoreo en los Prototipos Experimentales.

### Etapa IV — Análisis de Resultados:

- Comportamiento Térmico en la Residencia de Estudio
- Comportamiento Térmico en los Prototipos Experimentales
- Discusión de Resultados

## Metodología

Esta sección detalla la metodología de investigación adoptada, diseñada para evaluar el desempeño térmico de muros de albañilería convencional con y sin la adición de paneles de tierra. El estudio se estructura en un enfoque dual, combinando la observación de un caso real con la experimentación controlada en prototipos. Para ello, la metodología se divide en cuatro etapas principales:

### 1. Diseño y Construcción de los Prototipos Experimentales:

Aquí se detallan los materiales, dimensiones y técnicas empleadas en la construcción de los tres prototipos de pared, fundamentales para la experimentación controlada.

### 2. Caracterización del Contexto de Estudio y Preparación del

**Caso Real:** Esta etapa inicial describe el local de estudio, abarcando sus condiciones climáticas, ubicación geográfica y las características constructivas de la vivienda seleccionada. Asimismo, se detalla la intervención realizada en una de sus paredes, consistente en la aplicación de un revestimiento de tierra para el posterior monitoreo comparativo.

### 3. Instrumentación y Recolección de Datos:

Se especifica el uso de equipos de medición, como dataloggers y cámaras termográficas, y se establecen los protocolos para la toma de datos de temperatura (mínima, media y máxima), humedad relativa, y variables térmicas específicas como la carga térmica y el retardo térmico, tanto en la vivienda como en los prototipos.

### 4. Análisis de Datos y Discusión de Resultados:

La etapa final se enfoca en el procesamiento e interpretación de los datos recopilados, realizando una comparación exhaustiva del comportamiento térmico de los diferentes sistemas constructivos evaluados, y discutiendo las implicaciones de los hallazgos.

# Etapa I

## Diseño y Construcción de los Prototipos Experimentales:

Para llevar a cabo el estudio comparativo del comportamiento térmico de diferentes tipologías de paredes, se diseñó un sistema experimental basado en tres prototipos de muros de albañilería convencional y una envolvente controlada. Esto permitió verificar la efectividad de las intervenciones propuestas en un ambiente estandarizado, pero representativo de las condiciones reales.

### Diseño de los Prototipos de Paredes

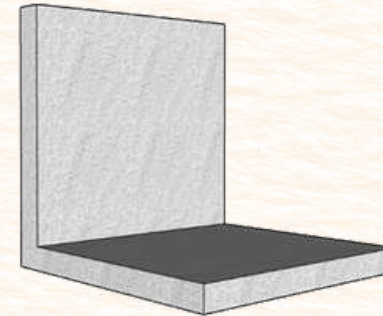
Cada prototipo consistirá en una sección de pared de 1 x 1 metro (altura x ancho). La base constructiva de cada pared será de albañilería convencional, utilizando ladrillo cerámico de seis huecos y 9 cm de espesor. Esta estructura se revestirá con mortero, resultando en un espesor total de la pared de 13 cm. Esta configuración replicará la tipología constructiva predominante en la residencia de estudio, sirviendo como línea base para la comparación.

Se estableció tres prototipos con las siguientes características:

- Prototipo 1: Pared de Referencia (Pared de Vivienda)
- Prototipo 2: Pared con Panel Interno de Taipa de Mano.
- Prototipo 3: Pared con Panel de Tierra Prefabricado

### Prototipo 1: Pared de Referencia (Pared de Vivienda)

Este prototipo representa la pared original de la vivienda sin intervenciones. Servirá como control para comparar el desempeño térmico de las paredes modificadas, permitiendo cuantificar el impacto de las intervenciones.



**Figura 34:** Ilustración del prototipo 1  
**Fuente:** Elaboración propia mediante SketchUp 2025

### Características de la pared convencional

La pared convencional utilizada como muro de referencia en el estudio se construyó con materiales y técnicas representativas de la edificación urbana del sur de Brasil, particularmente en el municipio de Foz de Iguazú. Esta pared tiene dimensiones de 1 x 1 metro, y se apoya directamente sobre una base de las mismas medidas, asegurando estabilidad estructural y continuidad en las condiciones de contacto con el terreno (véase Figura 35,36,37).



**Figuras 35,36,37:** Preparación del terreno y construcción de la base **Fuente:** Imagen propia

La estructura está compuesta por ladrillos cerámicos macizos de seis huecos, cuyas dimensiones comerciales son de 9 × 14 × 29 cm. Esta tipología de ladrillo es ampliamente utilizada en obras residenciales por su bajo costo, disponibilidad regional y facilidad de manejo, aunque presenta baja inercia térmica y alta conductividad comparada con materiales naturales como la tierra, lo que la hace adecuada para establecer una comparación en el estudio del desempeño térmico (véase Figuras 38,39,40).



**Figuras 38,39,40:** Elevación del muro **Fuente:** Imagen propia

Se finalizó con una capa de mortero convencional a base de cemento, cal y arena, con 2 cm de espesor en cada cara, aplicada manualmente mediante técnica de revoque. Este revestimiento tiene la función de regularizar la superficie, mejorar la resistencia mecánica del conjunto, proteger contra agentes climáticos y permitir una terminación estética compatible con el uso urbano (véase Figuras 41,42).



**Figuras 41,42:** Acabado del muro **Fuente:** Imagen propia

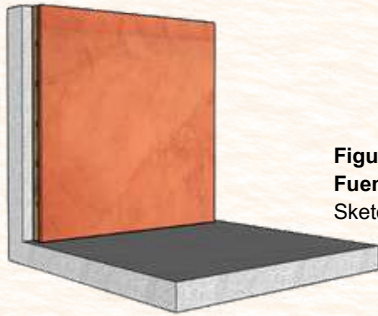
El espesor total de la pared, considerando la mampostería y el acabado, es de aproximadamente 13 cm, lo que refleja una tipología constructiva estándar en viviendas populares. La elección de esta configuración responde a la necesidad de simular condiciones reales del entorno urbano, permitiendo evaluar comparativamente el comportamiento térmico del sistema base respecto a soluciones con mayor masa térmica, como los paneles de tierra propuestos en este estudio.



**Figura 43:** Finalización de los 3 muros de estudio **Fuente:** Imagen propia

## Prototipo 2: Pared con Panel Interno de Taipa de Mano

Sobre la pared de albañilería convencional, se adicionó un panel interno de taipa de mano de 8 cm de espesor. Este panel se instalará directamente sobre la superficie existente de la pared, utilizando técnicas de fijación compatibles que aseguren la integridad higrotérmica del conjunto. La taipa de mano es conocida por sus propiedades de inercia térmica, lo que se espera que module las fluctuaciones de temperatura interna.



**Figura 44:** Ilustración del prototipo 2  
**Fuente:** Elaboración propia mediante SketchUp 2025

### Características de panel de taipa

El panel de taipa de mano fue concebido con dimensiones modulares de 1 × 1 metro, utilizando una estructura de madera ligera, formada por listones de 5 cm × 2 cm, que conforman un marco rectangular resistente. Para reforzar la estructura y mejorar la adherencia del mortero, se incorporaron tiras de bambú dispuestas horizontalmente en ambas caras (véase Figura 45), funcionando como refuerzo estructural secundario y anclaje mecánico para la mezcla de tierra. El relleno se compone de una mezcla formulada exclusivamente con materiales naturales, con propiedades térmicas y mecánicas adecuadas para su función como elemento de cerramiento.



**Figura 45:** Anclaje de la estructura de madera  
**Fuente:** Imagen propia

La dosificación utilizada fue:

- 3 baldes de tierra previamente tamizada (20 L c/u), material base que proporciona masa térmica, cohesión y capacidad de almacenamiento de calor;
- 2 baldes de arena, cuya función es reducir la retracción y mejorar la resistencia mecánica del mortero;
- 1 balde de cal hidratada, que actúa como estabilizante químico, mejorando la durabilidad frente a la humedad, la adherencia y la plasticidad;
- 1 balde de fibras vegetales (paja picada), que aportan tenacidad, refuerzo interno y control de fisuración, además de contribuir al aislamiento térmico por su estructura fibrosa.

La mezcla fue humedecida de forma progresiva hasta alcanzar una consistencia plástica y trabajable, adecuada para ser aplicada manualmente (apisonada) en capas sucesivas (véase Figuras 46,47,48).



**Figuras 46,47,48:** Aplicación del mortero **Fuente:** Imagen propia

Una vez completado el secado del cuerpo principal del panel, se procedió a aplicar una capa de acabado superficial para mejorar la resistencia superficial, el comportamiento higrotérmico y el aspecto visual del elemento.

Esta capa fue elaborada con la siguiente dosificación:

- 2 baldes de arena
- 1 balde de tierra previamente tamizada
- ½ balde de cal
- 500g de fibra de sisal



**Figura 49:** secado después de una semana de ejecución **Fuente:** Imagen propia

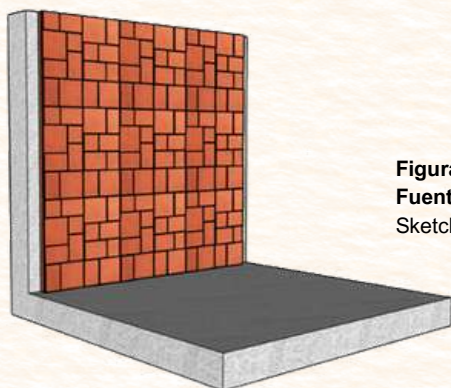
El acabado fue aplicado manualmente, generando una superficie continua y uniforme. Además de su función protectora, esta capa contribuye a estabilizar la temperatura superficial del panel, aumentando su capacidad de inercia térmica y aportando valor estético y funcional al sistema (véase Figuras 50,51,52).



**Figuras 50,51,52:** Aplicación del acabado del panel de taipa **Fuente:** Imagen propia

### Prototipo 3: Pared con Panel de Tierra Prefabricado

Este prototipo incorpora un enfoque innovador y de fácil instalación. El panel se construyó a partir de una chapa de madera de 5 mm como base, sobre la cual se fijó una malla metálica. Posteriormente, se aplicó una capa de mortero de tierra y, finalmente, se adherirán las placas prefabricadas de tierra, moldeadas para cubrir el área de un metro cuadrado. Este panel completo se fijó a la pared de albañilería convencional mediante tornillos. La concepción de este panel prefabricado busca:



**Figura 53:** Ilustración del prototipo 3  
**Fuente:** Elaboración propia mediante SketchUp 2025

**Comparación de Desempeño:** Evaluar si existe un cambio significativo en el comportamiento térmico en comparación con la taipa de mano tradicional.

**Facilidad de Instalación:** Proponer una solución que no requiera una estructura de madera leve adicional, como en el caso de la taipa de mano, simplificando una hipotética instalación futura en viviendas existentes.

### Características y ejecución del revestimiento modular con placas de tierra

Se instaló un sistema experimental de revestimiento modular con placas de tierra sobre una base plana de 1 × 1 m, compuesta por una chapa de madera de 5 mm de espesor. Sobre esta se fijó una malla metálica galvanizada, que actúa como refuerzo mecánico y mejora la adherencia del sistema. Toda la estructura fue anclada firmemente a la pared de albañilería liviana mediante tornillos distribuidos regularmente, la espesura total del panel es de 4 cm (véase Figura 54).



**Figura 54:** Instalación del panel de placa **Fuente:** Imagen propia

La elección de instalar una chapa de madera como elemento intermedio entre la pared y las placas no fue aleatoria, sino que responde a criterios técnicos y experimentales bien definidos. En primer lugar, la madera proporciona una superficie plana, uniforme y estable, garantizando una instalación alineada de las placas y mantener condiciones térmicas controladas.

Además, la chapa permite una cierta separación entre el muro base y el sistema de tierra, lo que minimiza las interferencias térmicas del material convencional (ladrillo cerámico con revoque) sobre las mediciones de temperatura de las placas. Esto es especialmente relevante para observar el comportamiento autónomo de las placas como sistema pasivo de inercia térmica. Por otro lado, la estructura con malla metálica facilita la reversibilidad del sistema, permitiendo remover las placas sin dañar la pared original una práctica alineada con los principios de sostenibilidad y evaluación comparativa en campo. Las placas de tierra fueron elaboradas en moldes individuales de 30×30cm, utilizando una mezcla diseñada para balancear masa térmica, estabilidad estructural y aislamiento.

La dosificación empleada fue:

- 1kg de tierra tamizada: matriz principal, que proporciona cohesión, almacenamiento térmico y capacidad de regulación ambiental;
- 1kg de cal hidratada: mejora la durabilidad, estabiliza el material frente a la humedad y refuerza la plasticidad;
- 500g de arena fina: reduce la retracción y mejora la resistencia mecánica de la mezcla;
- 500g de aserrín fino: actúa como aislante térmico y aligera la densidad del mortero;
- 250g de fibra de coco: aporta tenacidad, refuerzo interno y evita fisuración superficial;
- 1,5L de agua, añadida gradualmente hasta obtener una consistencia plástica y trabajable, adecuada para el llenado del molde (véase Figuras 55,56,57).



Figuras 55,56,57: proceso de fabricación de las placas de tierra placa Fuente: Imagen propia

La mezcla preparada fue suficiente para producir dos placas por lote. Para cubrir el área de 1m<sup>2</sup>, se utilizaron 9 placas, dispuestas con espaciado de 1cm entre sí, permitiendo movimiento por dilatación térmica y contribuyendo al comportamiento higrotérmico general del sistema.

El proceso de secado de las placas se dividió en tres etapas:

- Secado inicial a temperatura ambiente durante 12 horas, para eliminar la humedad superficial;
- Secado térmico en estufa a 80 °C por 6 horas, con el objetivo de estabilizar dimensionalmente el material;
- Secado final al aire, hasta alcanzar una humedad constante y uniforme.



Figura 58: Placa de tierra secado final Fuente: Imagen propia

Una vez secas, las placas se instalaron individualmente sobre la chapa de madera previamente fijada, utilizando una masa de tierra y agua como mortero de anclaje natural. Esta técnica de fijación garantiza un contacto eficaz sin comprometer la integridad ni la reversibilidad del sistema, permitiendo su análisis térmico posterior de forma controlada y segura (véase Figuras 59,60,61).



**Figuras 59,60,61:** Instalación de las placas de tierra **Fuente:** Imagen propia

### Configuración de la Envolvente Experimental

Los tres prototipos de pared se integraron en una caja experimental aislada, construida con espuma de poliestireno (Isopor®) de 50 mm de espesor para la envolvente y la cubierta. Esta caja creó un ambiente controlado y minimizado en cuanto a las pérdidas o ganancias de calor a través de sus otras caras, asegurando que las mediciones se concentraron en el desempeño de las paredes experimentales.

Dentro de esta caja experimental, se introdujeron los dataloggers HOBO U10-001 para registrar continuamente las temperaturas y la humedad. Además, se utilizó una cámara termográfica FLIR E60bx para realizar mediciones puntuales de las temperaturas superficiales, tanto en el interior como en el exterior de las paredes intervenidas.

Este diseño experimental permitirá una comparación directa y controlada del desempeño térmico de las tres tipologías de paredes, facilitando la evaluación de la inercia térmica, el retardo térmico y el amortiguamiento de las oscilaciones de temperatura que cada una de las intervenciones de tierra puede aportar al sistema constructivo convencional. La combinación de dataloggers y termografía ofrecerá una comprensión integral de la respuesta térmica de los prototipos bajo diferentes condiciones.



**Figura 62:** Instalación de las placas de Isopor como sistema envolvente **Fuente:** Imagen propia

Los tres prototipos se ubicaron en el exterior del laboratorio de suelos, orientados hacia el oeste. Esta orientación solar específica fue seleccionada para simular las condiciones de mayor incidencia de radiación solar vespertina, permitiendo evaluar el desempeño térmico de las paredes bajo una carga térmica significativa y comparable a la de la fachada oeste de la vivienda de estudio. De este modo, las mediciones térmicas se enfocaron casi exclusivamente en el desempeño de cada tipología de pared, permitiendo una evaluación precisa y comparable.



Fuente: Google maps 2025

Vista aérea de los prototipos



Fuente: Imagen propia

Observando la imagen satelital, los tres prototipos que se encuentran dentro del rectángulo rojo están alineados en dirección norte-sur, con sus fachadas principales orientadas hacia el este y el oeste. Esta disposición permite que las superficies laterales reciban la mayor incidencia solar durante la mañana (fachada este) y la tarde (fachada oeste), mientras que las fachadas menores miran hacia el norte y sur, con menor exposición directa. Esta orientación influye directamente en el comportamiento térmico de los prototipos.

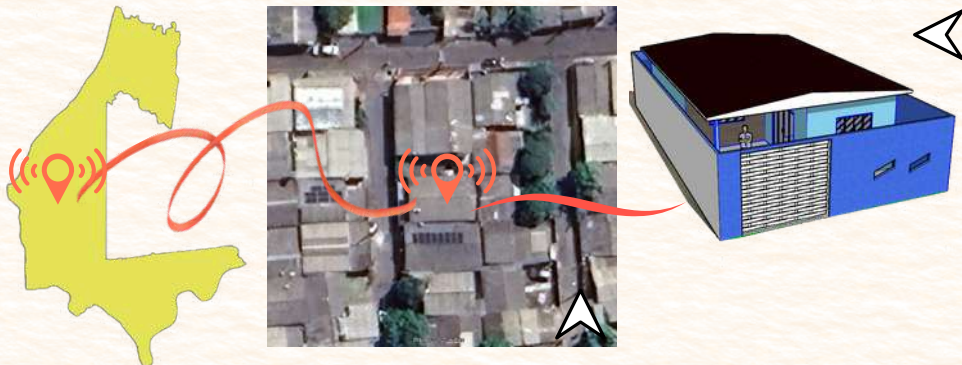


Fuente: Imagen propia

# Etapa II

## Localización y Condiciones Climáticas

La investigación se desarrolló en una vivienda unifamiliar ubicada en el barrio Porto Belo del municipio de Foz de Iguazú, Brasil. La ciudad se encuentra en la zona bioclimática 3, caracterizada por un clima subtropical húmedo. Este clima presenta veranos con temperaturas elevadas y alta humedad, e inviernos suaves, lo que genera una demanda de confort térmico tanto para el enfriamiento como para la calefacción pasiva.

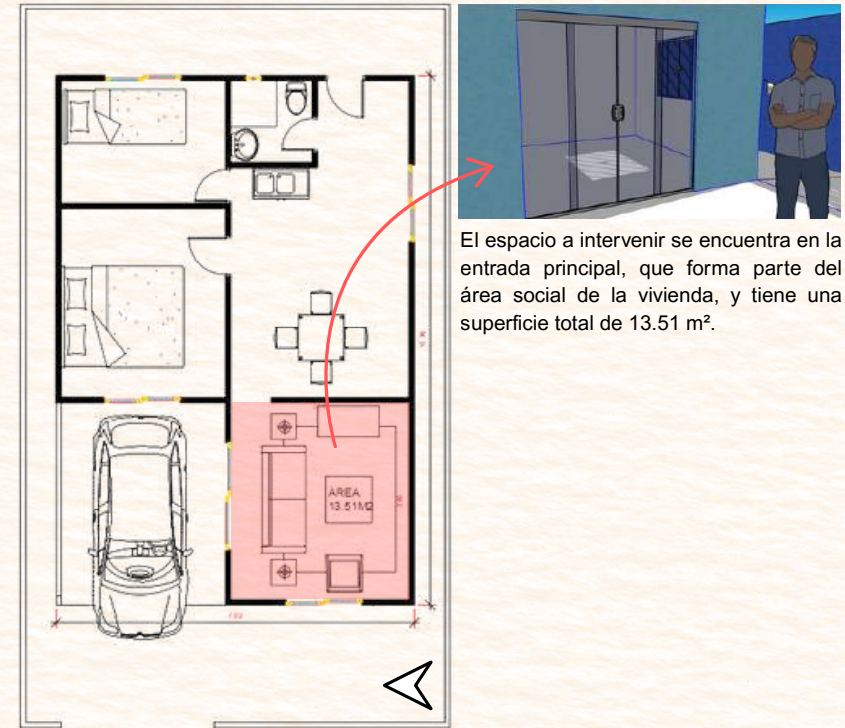


**Figura 24** Mapa esquemático de localización **Fuente:** Elaboración propia en base al programa Qgis, Google earth, modelo de casa autoral en base al programa Sketchup 2025

## Descripción Constructiva Actual (casa estudio)

El sistema constructivo predominante se basa en paredes de ladrillo cerámico hueco de 9 cm de espesor, recubiertas con mortero de cemento y pintura, lo que resulta en un espesor total de pared de 13 cm. Esta tipología convencional es ampliamente utilizada en la región. La cubierta es de tejas de fibrocemento sobre una estructura de madera, careciendo de aislamiento térmico adicional, con un acabado interior de madera.

Las ventanas son de aluminio con vidrio simple y están ubicadas en la fachada oeste. Esta orientación expone el interior a una considerable carga térmica por radiación solar durante las horas de la tarde. Los espacios interiores están distribuidos de forma compacta, incluyendo sala de estar, cocina, dos dormitorios, un baño y área de servicio.



El espacio a intervenir se encuentra en la entrada principal, que forma parte del área social de la vivienda, y tiene una superficie total de 13.51 m<sup>2</sup>.

**Figura 25:** Planta baja de la vivienda sin escala **Fuente:** elaboración propia mediante AutoCad 2025

Es importante destacar que la edificación no posee sistemas activos de climatización. Por ello, el análisis térmico se centrará en el comportamiento pasivo de sus envolventes. Esta configuración permite evaluar eficazmente la respuesta térmica del conjunto constructivo frente a las condiciones climáticas externas, representando un escenario común en muchas viviendas del contexto urbano subtropical brasileño.



Figura 26: Parte exterior Fuente: Imagen propia



Figura 27: Parte interna pared seleccionada para el estudio Fuente: Imagen propia

## Intervención en el Muro de Estudio

Para el análisis comparativo en condiciones reales, se seleccionó una pared interna de la vivienda que se dividió en dos secciones. Una de ellas se mantuvo en su estado original, sirviendo como muro de referencia. Sobre la otra mitad, se realizó una intervención que consistió en la aplicación de un revestimiento de tierra.

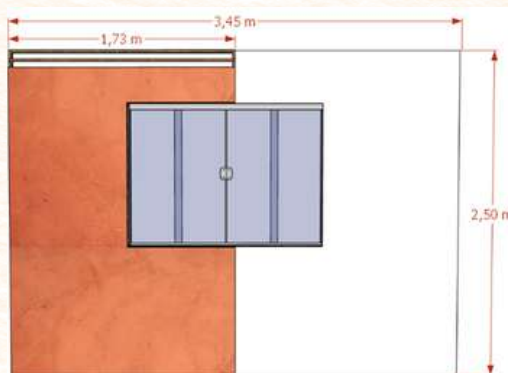


Figura 28: Parte interna, pared seleccionada para el estudio, ilustración de la aplicación del panel de taipa de mano Fuente: Imagen propia.

Esta modificación permite evaluar la influencia directa de un material de alta inercia térmica en el comportamiento de un muro convencional y, en particular, su capacidad para mitigar los efectos de las variaciones de temperatura y la carga térmica externa. El monitoreo de esta pared intervenida, junto con la de referencia, permitirá cuantificar el impacto de la solución propuesta en el ambiente interior de la vivienda.

## Características del panel de taipa de mano aplicado en la residencia

Como parte del experimento in situ, se implementó un panel de taipa de mano directamente sobre una pared existente de la residencia ubicada en el barrio Porto Belo, en Foz de Iguazú. La intervención se realizó sobre una porción del muro con orientación oeste, seleccionado por su elevada exposición a la radiación solar durante las horas de mayor carga térmica del día, permitiendo así evaluar el desempeño pasivo del sistema de tierra cruda frente a condiciones reales de uso.

El panel presenta dimensiones de 1,73 m de ancho por 2,50 m de alto, con un espesor total de 8 cm. Este espesor fue definido con base en estudios previos sobre inercia térmica en sistemas de tierra, balanceando masa térmica y viabilidad constructiva.



Figura 29: Instalación de la estructura en madera. Fuente: Imagen propia

El panel fue ejecutado mediante la técnica tradicional de taipa de mano, utilizando una estructura de madera compuesta por listones de  $5 \times 2$  cm, formando una retícula que sirve de soporte para el mortero de relleno. Como refuerzo interno, se utilizaron tiras horizontales de bambú, ubicadas en ambas caras del panel, cuya función es mejorar la adherencia del mortero, limitar deformaciones y prevenir fisuras.

La mezcla de relleno fue compuesta por materiales naturales en las siguientes proporciones para 1 m<sup>2</sup>:

- 3 baldes (20 L) de tierra tamizada
- 2 baldes de arena fina
- 1 balde de cal hidratada
- 1 balde de fibra vegetal (paja picada)
- Agua añadida progresivamente hasta lograr una consistencia plástica óptima para su aplicación manual.



Figuras 30,31,32: Relleno del panel. Fuente: Imagen propia

El panel fue finalizado con un revestimiento externo de acabado natural, elaborado con una mezcla en la proporción para 1m<sup>2</sup> de:

- 2 baldes de arena
- 1 balde de tierra
- 500g de fibras de sisal picada

Este acabado fue aplicado manualmente, generando una superficie homogénea, de buena resistencia superficial, con propiedades de regulación higrotérmica. El panel fue instalado solo en la mitad del muro existente, respetando un área continua de 1,73 × 2,50 m, dejando la otra mitad sin intervención. Esta decisión fue tomada para permitir la comparación simultánea del comportamiento térmico entre dos secciones del mismo paramento: una con revestimiento de tierra (taipa de mano) y otra con la pared convencional (ladrillo cerámico con revoque). Esta configuración posibilita la captura de imágenes termográficas comparativas en un mismo encuadre, mediante el uso de la cámara infrarroja FLIR modelo E60bx, eliminando variables ambientales externas como cambios de iluminación o temperatura entre mediciones separadas. Además, permite realizar una evaluación térmica más precisa, observando diferencias de temperatura superficial, distribución del calor y capacidad de almacenamiento térmico en tiempo real.



Figura 33: Acabado del panel. Fuente: Imagen propia

## Etapa III

### Instrumentación y Recolección de Datos

Esta etapa de la metodología detalla los equipos de medición utilizados y los protocolos establecidos para la recolección de datos, garantizando la fiabilidad y precisión de la información necesaria para el análisis térmico. Se especifican los parámetros configurados en cada instrumento y la frecuencia de las mediciones, tanto para el estudio de caso en la vivienda real como para los prototipos experimentales.

### Equipos de Medición

Para el monitoreo térmico, se emplearon los siguientes equipos:

**Cámara Termográfica FLIR E60bx:** Este equipo de alto rendimiento fue importante para evaluar el comportamiento térmico de las envolventes, permitiendo visualizar y cuantificar las diferencias de temperatura en las superficies. La FLIR E60bx cuenta con una resolución infrarroja de 320 x 240 píxeles y una sensibilidad térmica de  $< 0.05$  °C (NETD), lo que asegura imágenes detalladas y la detección de variaciones sutiles de temperatura. Incluye una cámara digital de luz visible de 3.1 megapíxeles y la función MSX® (Multi-Spectral Dynamic Imaging), que superpone detalles visuales sobre la imagen térmica, mejorando la claridad y el reconocimiento de estructuras. Su rango de medición de  $-20$  °C a  $650$  °C la hace versátil para diversas condiciones ambientales.



Figura 63 Cámara termográfica FLIR E60bx Fuente: Imagen propia

**Datalogger HOBO U10-001:** Estos registradores de datos compactos y autónomos se utilizaron para el monitoreo continuo de las condiciones ambientales. El HOBO U10-001 mide temperatura y humedad relativa con una precisión de  $\pm 0.7$  °C y  $\pm 5\%$ , respectivamente. Su capacidad de almacenamiento de hasta 20.000 mediciones y la flexibilidad en el intervalo de registro (desde 1 segundo hasta 18 horas) lo hacen ideal para capturar series temporales prolongadas. La descarga de datos se realiza vía USB mediante el software HOBOWare Pro.



Figura 64: Datalogger HOBO U10 Fuente: Imagen propia

## Protocolos de Recolección de Datos

Se establecieron protocolos específicos para la toma de datos en cada componente del estudio, asegurando la consistencia y la comparabilidad de los resultados.

### Monitoreo en la Residencia de Estudio

El monitoreo en la vivienda unifamiliar urbana se enfocó en evaluar la influencia del revestimiento de tierra en el comportamiento térmico de la pared intervenida en contraste con la pared convencional.

- **Cámara Termográfica FLIR E60bx:** El monitoreo térmico de la vivienda se realizó durante nueve días de julio (días 8 -13,16, 18,19) mediante imágenes termográficas en una zona intervenida con panel de tierra, una sin intervención y la fachada externa. Inicialmente, las mediciones se hicieron cada dos horas entre las 8:00 y las 18:00 para capturar la máxima carga solar (8-13); sin embargo, para comprender mejor la disipación de calor nocturna y la capacidad de amortiguamiento térmico, el horario se extendió hasta la medianoche en los últimos tres días (16,18,19). Esta combinación de horarios y días, bajo condiciones climáticas estables de invierno subtropical, permitió obtener un panorama completo del comportamiento térmico de los muros. Se registraron datos de temperatura superficial (mínima, media y máxima de las áreas de interés).
- **Condiciones Ambientales:** De manera simultánea a las capturas termográficas, se registraron manualmente la temperatura del aire y la humedad relativa para correlacionar con las lecturas superficiales y entender el contexto ambiental.

### Monitoreo en los Prototipos Experimentales

El monitoreo en los prototipos se llevó a cabo para cuantificar de forma controlada el desempeño térmico de cada tipología de pared (referencia, taipa de mano, panel prefabricado).

- **Dataloggers HOBO U10-001:** El registro de la temperatura del aire relativa interna se llevó a cabo mediante los dataloggers, los cuales fueron dispuestos en el interior de la caja experimental de cada prototipo. La programación de estos dispositivos permitió un monitoreo continuo durante 12 días, con registros cada hora, abarcando el período desde el 12 de julio a las 12:00 hasta el 23 de julio a las 18:00.
- **Cámara Termográfica FLIR E60bx:** Se realizaron imágenes termográficas de las superficies internas y externas de los tres prototipos con una frecuencia de 1 hora, a partir del día 21 hasta el 23 de julio desde las 13:00 hasta las 18:00 horas. Esto permitió una correlación directa entre las condiciones internas de cada caja y la distribución de calor en las superficies de las paredes, facilitando el análisis de la inercia térmica, el desfase térmico y el amortiguamiento de las oscilaciones de temperatura.
- **Condiciones Ambientales Externas:** Se registró la temperatura del aire y la humedad relativa externa en las proximidades de los prototipos.

# Etapa IV

## Procesamiento de Datos

Antes de cualquier análisis, los datos brutos obtenidos de los dataloggers y las cámaras termográficas serán procesados y organizados:

- **Sincronización de Datos:** Los registros de temperatura de los dataloggers, así como los horarios de las tomas termográficas, fueron sincronizados temporalmente para permitir un análisis comparativo preciso hora a hora.
- **Cálculo de Parámetros Diarios:** Para cada día de monitoreo, se calcularon las temperaturas mínima, media y máxima (tanto del aire como superficial) y la humedad relativa promedio y temperatura externa. Esto permitió visualizar las oscilaciones diarias y las condiciones predominantes.
- **Extracción de Datos Termográficos:** De las imágenes termográficas, se extrajeron las temperaturas superficiales de puntos y áreas de interés específicos en cada pared, tanto en las caras internas como externas. Se priorizaron las lecturas de temperatura en las regiones representativas de cada material.

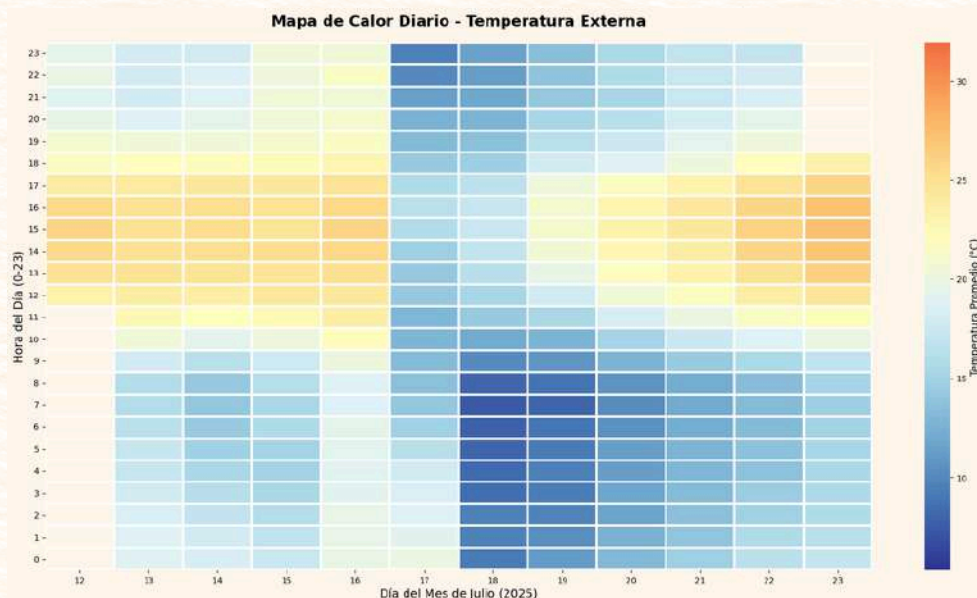
## Análisis de Resultados

En esta sección, los datos procesados se analizaron en detalle para extraer conclusiones sobre el desempeño térmico, de cada tipología de pared. Se emplearon gráficos, tablas para una visualización clara de las tendencias y diferencias.

### Datos Climáticos Recopilados

Si bien las características bioclimáticas de Foz de Iguazú han sido abordadas en el Capítulo 6 del Marco Teórico y la Etapa 1 de la Metodología, esta sección tiene como propósito analizar los datos de temperatura externa registrados durante el periodo de monitoreo de los prototipos. Esta caracterización sirve para comprender las condiciones ambientales específicas a las que estuvieron expuestas las paredes y sentar las bases para la evaluación de su desempeño térmico.

## Contexto climático del estudio



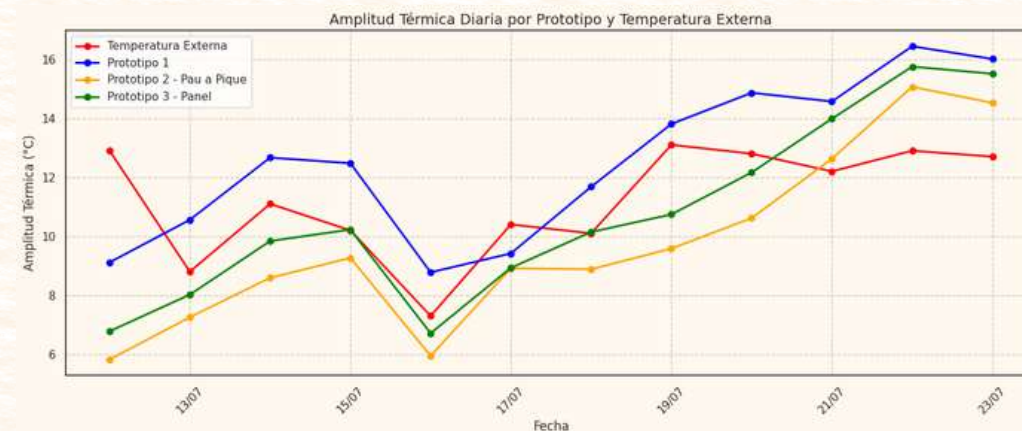
**Figura 65 :** Mapa de calor diario de la temperatura externa **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

El análisis del mapa de calor correspondiente al clima externo durante el periodo de medición evidencia la variabilidad térmica a la que están expuestos los prototipos evaluados. En términos generales, las temperaturas máximas diarias oscilaron entre 17.4 °C, registrada en el día más frío (día 18/07), y 27.4 °C, observada en el día más cálido (día 23/07).

De manera complementaria, las temperaturas mínimas fluctuaron desde 7.3 °C en el día más frío, hasta 19.0 °C en el día más cálido (día 12). La temperatura media diaria varió entre 12.0 °C y 22.47 °C, correspondiendo respectivamente al día 18, el más frío, y al día 12, el más cálido. Estos datos muestran la amplitud térmica diaria significativa en el clima de Foz de Iguazú, lo que representa un desafío para la estabilidad térmica interior de las viviendas.

El análisis del mapa de calor revela que el invierno en Foz de Iguazú se caracteriza por una alta variabilidad térmica, con la alternancia de días templados a cálidos influenciados por frentes fríos que introducen episodios de bajas temperaturas. Dentro de esta dinámica, el análisis horario indica que la hora promedio más caliente fue a las 15:00, alcanzando temperaturas máximas cercanas a los 27.4 °C. Este dato es clave para evaluar el desempeño térmico pasivo de los revestimientos aplicados en los prototipos, ya que identifica el periodo de máxima incidencia térmica que las soluciones constructivas deben amortiguar para garantizar confort tanto durante el calentamiento solar como en situaciones de frío intenso.

## Amplitud Térmica entre Prototipos



**Figura 66:** Amplitud Térmica entre Prototipos **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

Durante el periodo de monitoreo térmico, comprendido entre los días 12 - 23 de julio de 2025, se registraron las amplitudes térmicas diarias de los tres prototipos. Estos valores fueron comparados con la amplitud térmica del ambiente exterior para evaluar el desempeño de amortiguamiento térmico de cada sistema constructivo.

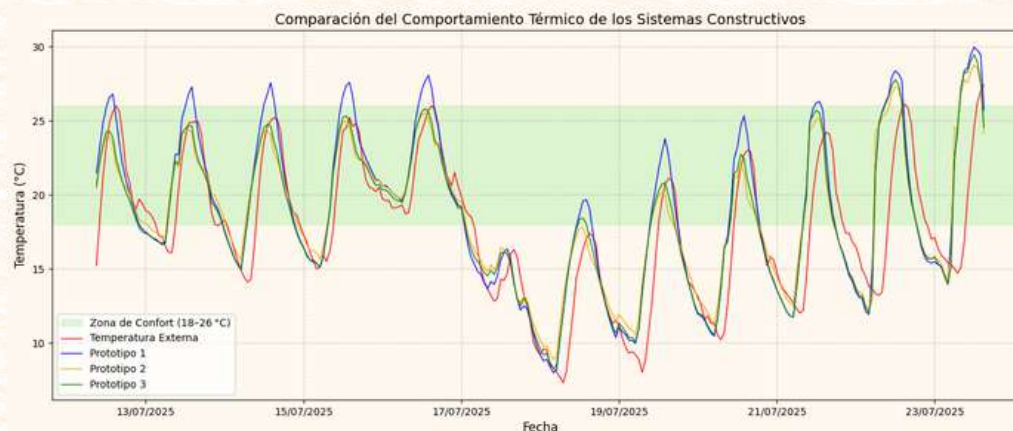
Los datos muestran que el Prototipo 2 presentó la menor amplitud térmica promedio del período, con 9,87 °C, lo que indica un mejor desempeño en cuanto a inercia térmica. Este comportamiento revela una mayor capacidad del material para absorber, almacenar y retardar la transferencia de calor, tal como lo proponen los principios de la arquitectura bioclimática (Oliveira et al., 2014).

Por otro lado, el Prototipo 1 presentó la mayor amplitud, con 12,14 °C, evidenciando que la ausencia de materiales con masa térmica favorece fluctuaciones térmicas más intensas. El Prototipo 3 obtuvo un desempeño intermedio (10,88 °C), lo que refuerza la idea de que el uso de materiales a base de tierra, incluso en paneles prefabricados, puede ofrecer mejoras térmicas frente a sistemas convencionales de cerramiento liviano (bloque cerámico).

Según los criterios de la NBR 15575-1:2021 (Desempeño de Edificaciones Habitacionales), el sistema de cerramiento vertical debe contribuir a la mantención del confort térmico en el ambiente interior, especialmente en climas con grandes variaciones térmicas diarias. La norma exige que los cerramientos proporcionen un aislamiento adecuado y reduzcan los picos de temperatura, siendo el amortiguamiento térmico un indicador relevante de desempeño. Aunque la norma no establece límites numéricos específicos para la amplitud térmica, su concepto está alineado con la exigencia de estabilidad térmica en las unidades habitacionales. Además, estudios como el de Goulart y Lamberts (2003) destacan que las edificaciones con materiales de alta masa térmica presentan mejor desempeño en regiones con gran amplitud térmica, como es el caso de Foz de Iguazú durante el invierno.

Esta condición refuerza la pertinencia del uso de técnicas como la taipa de mano en proyectos de vivienda especialmente cuando se combinan con estrategias de orientación solar y ventilación cruzada.

## Comportamiento Térmico General (12 al 23 de Julio)



**Figura 67:** Comportamiento térmico de los sistemas constructivos **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

Durante el período de monitoreo, se analizó el comportamiento térmico de tres prototipos de construcción en comparación con las condiciones climáticas externas. Este estudio incluyó tanto estadísticas diarias como datos horarios, con el fin de entender cómo cada sistema moderó las fluctuaciones térmicas del entorno. Los resultados indican que las temperaturas externas presentaron amplitudes térmicas considerables, con valores mínimos cercanos a los 8 °C y máximos superiores a los 26 °C, reflejando un entorno exigente para el control térmico pasivo.

En contraste, los prototipos con revestimientos en tierra mostraron una mayor estabilidad térmica interna, registrando menores variaciones entre sus temperaturas mínimas y máximas.

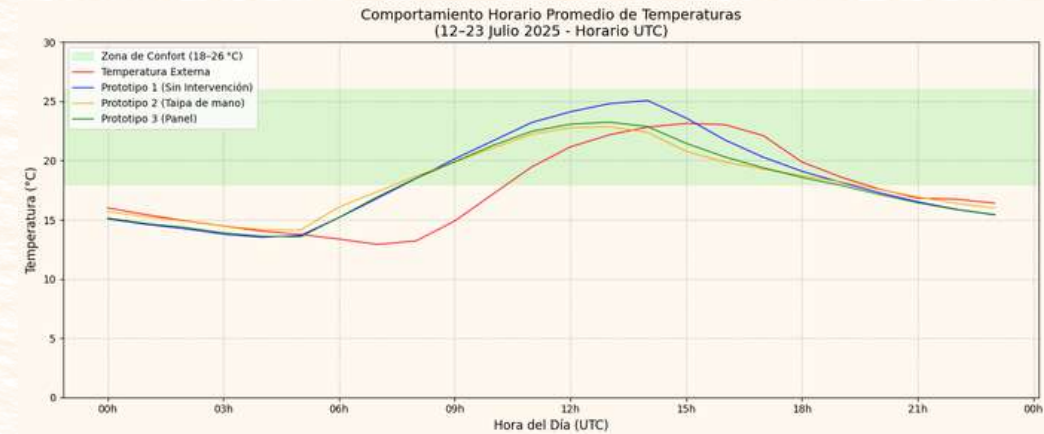
En términos generales, los tres prototipos lograron reducir en distintos grados las fluctuaciones térmicas provenientes del ambiente exterior. El Prototipo 1, que corresponde al muro de albañilería sin intervención, fue el que presentó mayores oscilaciones internas, evidenciando una menor capacidad para estabilizar la temperatura.

En cambio, los prototipos intervenidos Prototipo 2 (pau a pique) y Prototipo 3 (panel de tierra) mostraron un comportamiento más estable, con diferencias más suaves entre las temperaturas mínimas y máximas, lo que sugiere una mejor respuesta de amortiguamiento térmico frente a las variaciones del clima.

El análisis por franjas horarias refuerza esta tendencia: los sistemas constructivos basados en tierra lograron moderar las temperaturas interiores en los momentos más críticos del día, sobre todo en la madrugada y al final de la tarde. Estas diferencias, en comparación con el clima externo y el prototipo sin intervención, resaltan la eficacia térmica de los materiales utilizados.

Este conjunto de observaciones preliminares sirve como base para entender el desempeño general de cada sistema, que se desarrollará en mayor profundidad en los próximos apartados, a través de gráficos de mapa de calor, etc.

## Perfil Horario Promedio (12 al 23 de Julio)



**Figura 68:** Comportamiento Horario promedio de temperatura **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

Se llevó a cabo una evaluación del comportamiento térmico promedio por hora de cada prototipo, tomando como referencia el período de monitoreo comprendido entre el 12 y el 23 de julio. Esta perspectiva permite identificar cómo varía la temperatura a lo largo del día, ofreciendo una visión más precisa sobre la inercia térmica de cada sistema constructivo y su desempeño pasivo frente a las distintas exigencias climáticas, especialmente durante las horas de mayor carga térmica.

Durante el periodo analizado, se observa que los tres prototipos (P1: sin intervención, P2: revestido con pau a pique, y P3: revestido con panel de tierra) mantienen temperaturas internas más estables que la temperatura externa, especialmente en las horas de mayor incidencia solar.

Por ejemplo, entre las 12:00 y las 17:00 horas, la temperatura externa asciende de manera notable, alcanzando un máximo promedio de 23,5°C a las 18:00. En contraste, el Prototipo 3 (panel de tierra) alcanza un máximo promedio de 23,72°C a las 16:00, mientras que el Prototipo 1 (sin revestimiento) alcanza los 25,44°C en el mismo horario, lo que evidencia una mayor oscilación térmica y menor capacidad de amortiguamiento térmico. Este comportamiento demuestra que los materiales con mayor masa térmica, como el revestimiento de tierra, contribuyen a reducir la amplitud térmica diaria y a retrasar el pico de temperatura en el interior, efecto asociado a la inercia térmica del material (Oliveira, 2016). Además, se nota una menor diferencia entre las temperaturas mínimas durante la madrugada, siendo el Prototipo 3 nuevamente el que registra los valores más bajos, lo cual es coherente con la capacidad de disipar lentamente el calor acumulado.

Hora	Exterior (°C)	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)
14h	19.70	23.74	22.73	23.02
15h	21.43	24.61	23.27	23.61
16h	22.50	25.21	23.33	23.72
17h	23.17	25.44	22.81	23.27

**Tabla 1:** Pico térmico (13:00 a 17:00 UTC)

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

P1 (sin intervención) registra las temperaturas más altas, alcanzando hasta 25.44°C. P2 y P3 muestran un retraso y moderación térmica: su aumento de temperatura es más gradual y sus máximos son 2°C inferiores a P1.

Hora (UTC)	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)	Temperatura Externa (°C)
18:00	23.77	21.06	21.71	23.49
19:00	22.08	20.23	20.67	23.38
20:00	20.73	19.70	19.82	22.43
21:00	19.65	19.19	19.08	20.18
22:00	18.16	18.20	17.91	18.62
23:00	17.30	17.56	17.15	17.60

**Tabla 2:** Enfriamiento vespertino y nocturno (18:00 a 23:00 UTC)

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

Las temperaturas externas descienden lentamente de 23.49°C (18h) a 17.60°C (23h). Los prototipos también descienden, pero los de tierra mantienen el calor por más tiempo: A las 21h, por ejemplo, la temperatura exterior es de 20.18°C, mientras que P2 y P3 están en 19°C, y P1 ya descendió a 19.65°C.

Fase del día	Mejor comportamiento térmico
Madrugada	Prototipo 2 (retiene calor)
Calentamiento	Prototipo 3 (ascenso gradual)
Pico térmico	P2 y P3 (menor sobrecalentamiento)
Enfriamiento	P3 (descenso más lento)

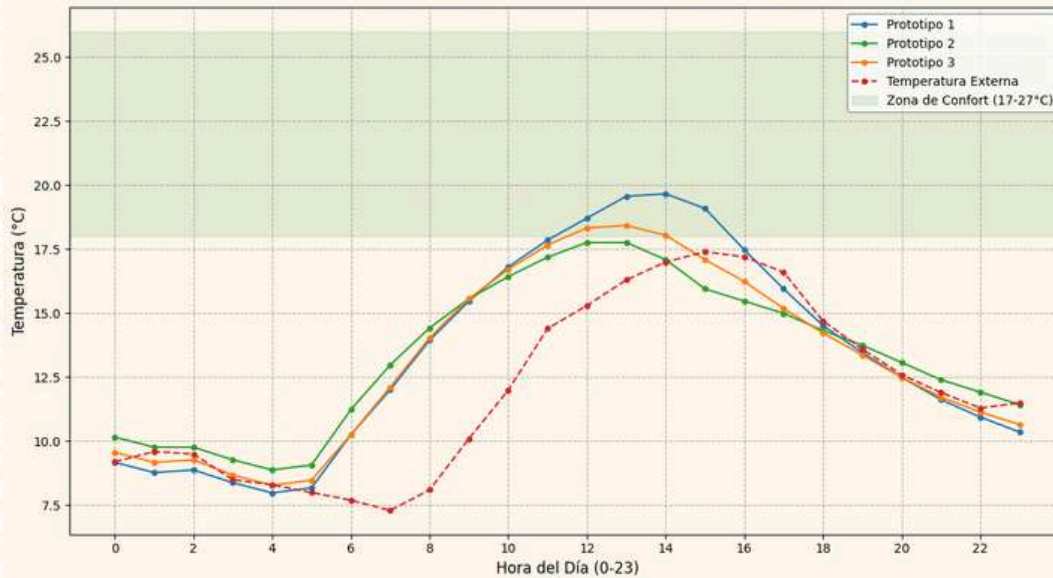
**Tabla 3:** Síntesis comparativa de los prototipos

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

## Comportamiento térmico en días extremos

Con el objetivo de evaluar el desempeño térmico de los tres prototipos constructivos analizados, se seleccionaron el día con la temperatura externa promedio más baja (18 de julio de 2025) y el día con la temperatura externa promedio más alta (12 de julio de 2025), dentro del rango de estudio (12 a 23 de julio de 2025).

Perfil de Temperatura en el Día Más Frío (18/07)



Figuras 69,70: Comportamiento térmico en días extremo frío y calor

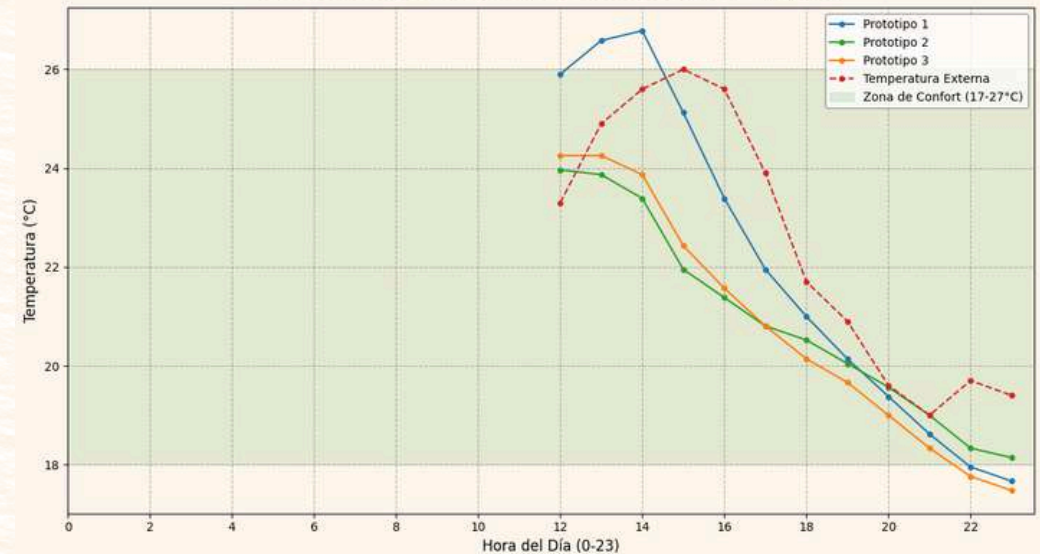
Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

En el día más frío, la temperatura externa promedio fue de 12,0 °C, con un rango de temperaturas entre 7,3 °C y 17,4 °C. Los tres prototipos presentaron temperaturas interiores promedio similares, entre 13,2 °C y 13,4 °C, ligeramente superiores a la temperatura externa promedio, lo que indica un efecto de aislamiento térmico y retención del calor. El prototipo 1 (sin intervención) mostró una mayor variabilidad térmica, con una desviación estándar de 4,01 °C, mientras que el prototipo 2 (pau a pique)

exhibió una menor variación, con 2,95°C, lo que sugiere una mejor estabilidad térmica a lo largo del día.

Durante el día más caluroso, con una temperatura externa promedio de 19,17°C y máximas de hasta 26,0°C, los prototipos 2 y 3 (pau a pique y panel) registraron temperaturas interiores promedio inferiores al prototipo 1 (22,27°C), situándose en torno a 21,1°C.

Perfil de Temperatura en el Día Más Caluroso (12/07)



Además, el prototipo 2 mostró la desviación estándar más baja (1,93 °C), indicando una menor fluctuación térmica durante el día. Esta reducción en la amplitud térmica interior, comparada con la externa, evidencia un comportamiento pasivo favorable para mitigar el impacto del calor en el ambiente interno. El análisis horario de las temperaturas refleja patrones coherentes con la inercia térmica esperada para cada sistema constructivo. Los prototipos con técnicas basadas en tierra (pau a pique y panel) muestran una menor amplitud térmica y un retardo en el calentamiento y enfriamiento en comparación con el prototipo sin intervención, lo que contribuye a mantener condiciones térmicas más estables y confortables para los ocupantes.

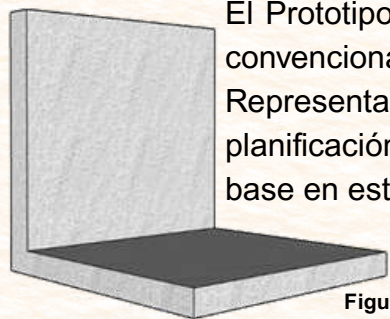
El Prototipo 1 parece tener una menor inercia térmica, reaccionando más rápidamente a las variaciones de la temperatura externa, lo que se traduce en oscilaciones térmicas internas más pronunciadas.

Día	Sistema	Temp. Min (°C)	Temp. Máx (°C)	Temp. Promedio (°C)	Amplitud Térmica (°C)
18/07/2025	Prototipo 1	7.98	19.66	13.40	4.01
18/07/2025	Prototipo 2	8.88	17.76	13.36	2.95
18/07/2025	Prototipo 3	8.28	18.43	13.20	3.49
18/07/2025	Temperatura Ext.	7.30	17.40	12.00	3.42
-----	-----	-----	-----	-----	-----
12/07/2025	Prototipo 1	17.66	26.78	22.27	3.13
12/07/2025	Prototipo 2	18.14	23.97	21.13	1.93
12/07/2025	Prototipo 3	17.48	24.25	21.05	2.33
12/07/2025	Temperatura Ext.	13.10	26.00	19.17	4.18

**Tabla 4:** Síntesis de los días frío y cálido

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

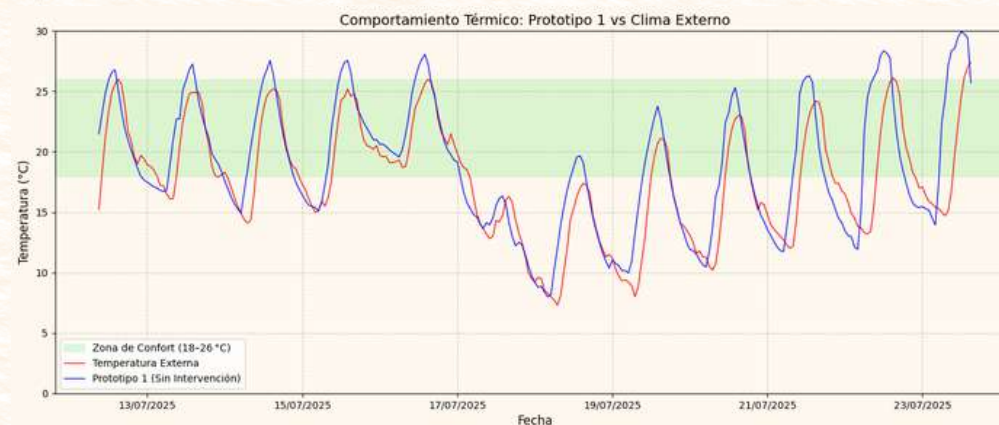
## Prototipo 1 – Desempeño Térmico Detallado



El Prototipo 1 está compuesto por un muro de albañilería convencional sin ninguna intervención térmica pasiva. Representa una configuración típica en viviendas sin planificación bioclimática, siendo utilizado como referencia base en este estudio.

**Figura 34:** Ilustración del prototipo 1  
**Fuente:** Elaboración propia mediante SketchUp 2025

## Análisis de la Curva de Temperatura



**Figura 71:** Comportamiento térmico prototipo 1 **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab

La gráfica revela una relación evidente entre la temperatura del prototipo y la temperatura exterior, ambas siguiendo un patrón diario bien definido. Se aprecia que la temperatura del prototipo responde a los cambios exteriores con un leve retraso, lo que refleja la presencia de inercia térmica en el sistema. Durante el día, la temperatura máxima del prototipo tiende a ser inferior a la del ambiente exterior, lo que indica una cierta capacidad de atenuación térmica, aunque esta no es especialmente marcada. Por otro lado, la temperatura mínima registrada en el prototipo suele ser ligeramente superior a la mínima exterior, lo que sugiere una retención de calor durante la noche.

La zona de confort, representada en verde claro en la gráfica, se mantiene como referencia térmica. Se observa que, en la mayoría del período analizado, la temperatura del prototipo permanece dentro o muy cerca de esta zona durante las horas centrales del día. Sin embargo, durante las noches y madrugadas, tiende a alejarse de dicha zona, disminuyendo el nivel de confort térmico en esos momentos.

**Tabla 5: Evolución diaria de temperaturas**

Fecha	Temp. Mín. (°C)	Temp. Máx. (°C)	Estado de la envolvente	Observaciones
18 jul	8.38	19.66	Completa	Amplia variabilidad térmica; la envolvente pierde calor rápidamente por la noche.
19 jul	9.96	23.77	Completa	Calentamiento progresivo; bajo control solar pasivo, sin acumulación térmica.
20 jul	11.04	25.32	Completa	Temperatura máxima dentro del límite superior de confort; posible disconfort vespertino.
21 jul	12.11	26.29	Parcial	Se supera el rango de confort; inicio de sobrecalentamiento sin regulación efectiva.
22 jul	12.11	28.36	Parcial	Sobrecalentamiento sostenido; la envolvente reacciona sin amortiguación térmica.

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas

Se diseñó como una muestra representativa, enfocándose en los días más relevantes del período experimental, para destacar el contraste antes y después del evento del 21 de julio.

**Tabla 6: Comportamiento térmico del revestimiento**

Condición de la envolvente	Amortiguación diurna	Conservación nocturna	Respuesta al calor
<b>Completa</b>	Baja: ganancia solar acelerada	Deficiente: gran pérdida nocturna	Sensible al entorno; sin capacidad de moderar extremos
<b>Parcial</b>	Nula: acumulación térmica excesiva	Inexistente: sin retención efectiva	Sobrecalentamiento prolongado; sin disipación controlada

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas

Muestra cómo cambia el comportamiento térmico del sistema al alterar su envolvente.

**Tabla 7: Relación con la zona de confort**

Periodo	Horas totales	Horas dentro del confort	% Dentro del confort
<b>12–20 julio</b>	216 horas	77 horas	<b>35.6 %</b>
<b>21–23 julio</b>	72 horas	11 horas	<b>15.3 %</b>

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

El cambio evidencia cómo la intervención experimental afecta directamente el confort térmico percibido.

## Amplitud Térmica y Retardo

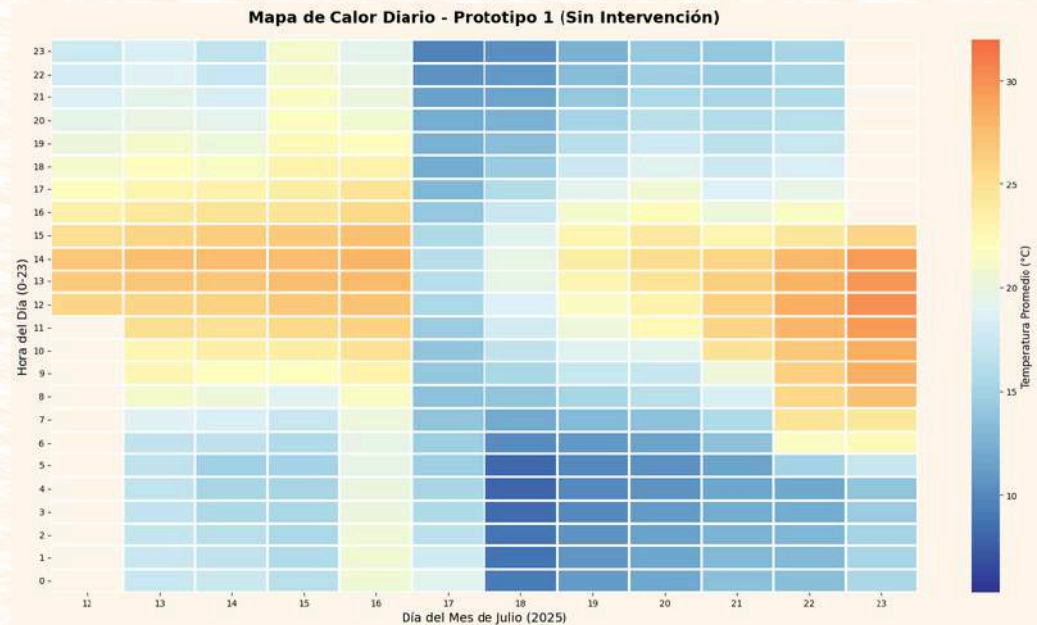
El prototipo exhibe una amplitud térmica diaria inferior a la registrada en el ambiente exterior, lo que indica su capacidad para amortiguar las variaciones extremas de temperatura. Este comportamiento sugiere una moderación de los picos térmicos, tanto en las horas más calurosas como en las más frías.

Se identifica un desfase temporal entre el momento en que se alcanza la temperatura máxima exterior y el correspondiente pico de temperatura en el prototipo. Este retardo, estimado en varias horas, es indicativo de la influencia de la masa térmica del prototipo, que actúa como reguladora frente a los cambios bruscos de temperatura ambiental.

Cabe destacar que esta atenuación térmica ocurre a pesar de que el prototipo no cuenta con sistemas activos ni pasivos de aislamiento. Es la masa térmica natural del material la que proporciona un efecto amortiguador básico, permitiendo una respuesta térmica más estable ante las condiciones del entorno.

## Mapa de Calor Diario

El mapa de calor proporciona una visualización clara de la variabilidad horaria y diaria de las temperaturas registradas en el prototipo. Los tonos cálidos que aparecen durante las horas centrales del día reflejan el aumento térmico habitual por la radiación solar, mientras que los colores fríos evidencian el enfriamiento que ocurre durante la noche y la madrugada.

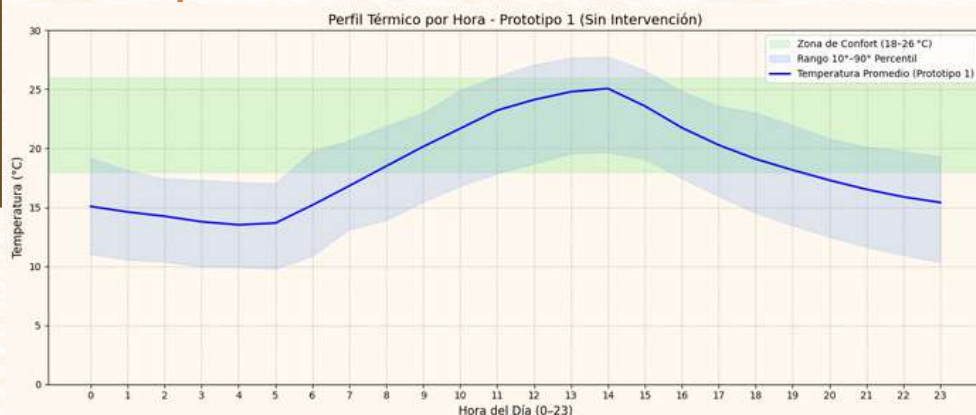


**Figura 72 :** Mapa de calor diario prototipo 1 **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

Se observa un patrón cíclico consistente, donde destacan los días 17 y 18 como los de menor temperatura general, correspondientes al periodo más frío del registro. Este tipo de representación gráfica permite identificar rápidamente las franjas horarias con mayor riesgo de incomodidad térmica, como las noches frías o las tardes en que la temperatura excede la zona de confort previamente establecida.

Gracias a su carácter visual y detallado, el mapa resulta una herramienta eficaz para evaluar el desempeño térmico del prototipo a lo largo del tiempo y anticipar escenarios de baja eficiencia o necesidad de intervención.

## Perfil Típico Diario



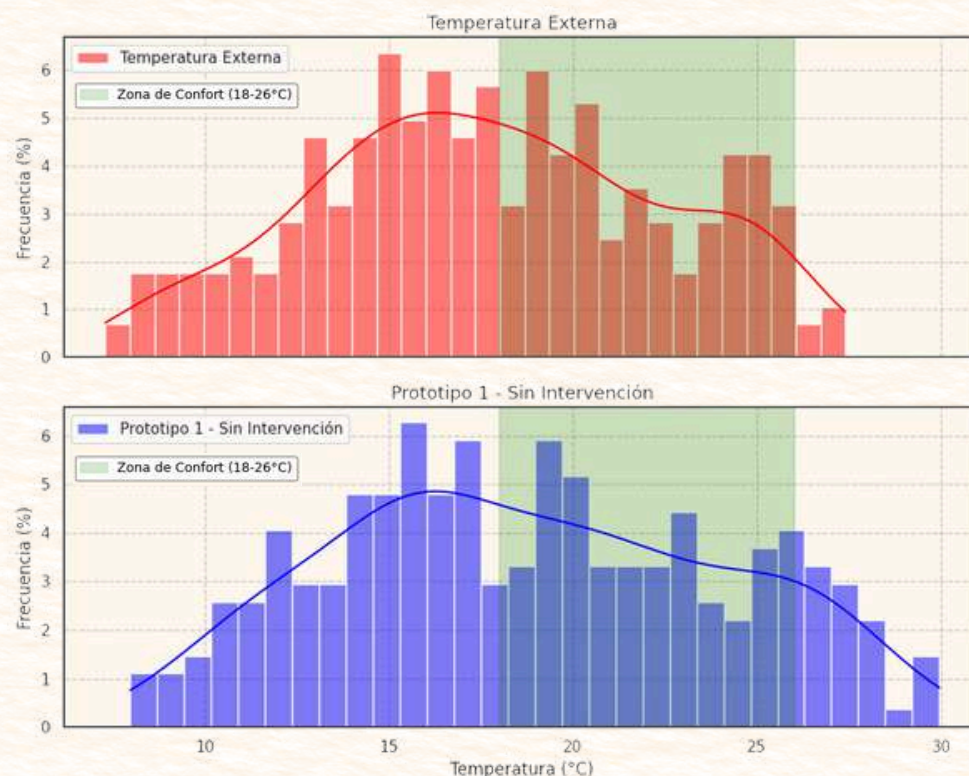
**Figuras 73:** Perfil Típico de temperatura por hora prototipo1

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

El perfil horario promedio revela que la temperatura del prototipo supera la zona de confort entre las 10:00 y las 17:00 horas, alcanzando su punto máximo alrededor de las 14:00. Este comportamiento sugiere que, durante gran parte del día, los ocupantes podrían experimentar condiciones de sobrecalentamiento si no se implementan medidas de regulación térmica.

Durante las horas nocturnas, en cambio, la temperatura desciende por debajo de la zona de confort, alcanzando valores cercanos a los 13°C. Estas condiciones pueden generar incomodidad térmica por frío, especialmente en las madrugadas, afectando el bienestar de los usuarios. El análisis del rango entre los percentiles 10 y 90 evidencia una variabilidad térmica significativa. Aunque la media se mantenga cercana a la zona de confort, las fluctuaciones dentro de ese rango indican la presencia de extremos que pueden comprometer el confort, dependiendo de la hora y del día en cuestión.

## Mapa de Distribución de Frecuencia



**Figura 74:** Mapa de Distribución de Frecuencia externa y prototipo 1

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

El Prototipo 1 muestra un comportamiento térmico distinto al del entorno externo, con menor permanencia en el rango de confort y mayor exposición a picos de calor. Este desempeño refleja una envolvente con menor inercia térmica y protección solar insuficiente frente a las demandas del clima.

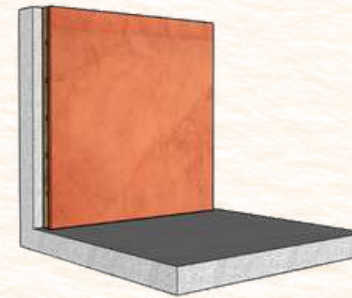
El porcentaje de horas en confort (18–26 °C) desciende a 40%, cinco puntos porcentuales menos que el 45% registrado en el exterior. Las horas con sobrecalentamiento (> 26 °C) aumentan al 35%, lo que supone un incremento de cinco puntos porcentuales frente al 30% exterior, evidenciando la necesidad de estrategias para mitigar la ganancia de calor diurna. Las horas de frío (< 18 °C) se mantienen en 25%, igual que en el clima natural, por lo que el prototipo tampoco aporta beneficios térmicos durante las horas más frías. La prevalencia de temperaturas fuera de la zona de confort especialmente en el extremo inferior señala la necesidad de intervenciones, tanto pasivas como activas, para moderar las condiciones térmicas internas y lograr un entorno más estable y habitable.

Parámetro	Valor / Observación
Horas en rango de confort (18–26 °C)	40 % (5 p. p. menos que el clima exterior)
Horas de sobrecalentamiento (>26 °C)	35 % (5 p. p. más que el clima exterior)
Horas de frío (<18 °C)	25 % (igual que en el clima exterior)
Mitigación de ganancia de calor	Deficiente: aumenta picos diurnos en comparación externa
Protección nocturna	Sin mejora respecto al entorno natural

**Tabla 8:** Síntesis de los días frío y cálido

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

## Prototipo 2 – Desempeño Térmico Detallado

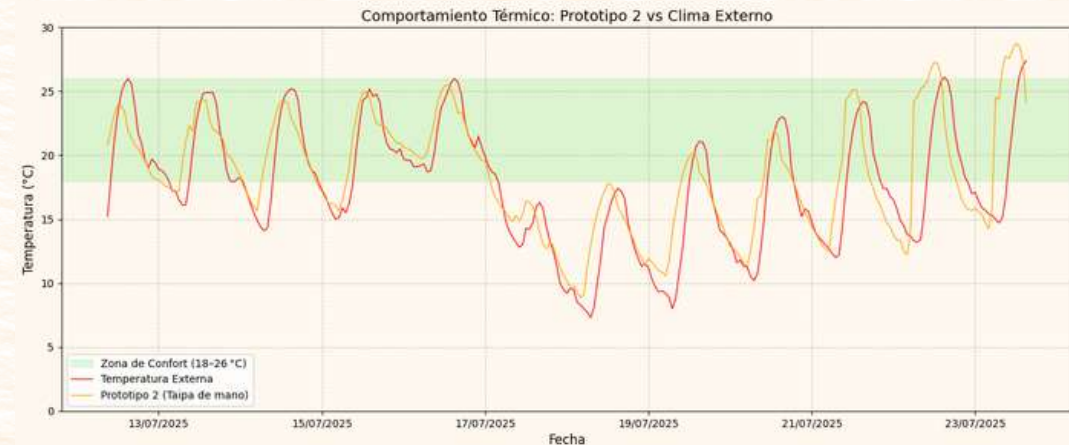


**Figura 44:** Ilustración del prototipo 2

**Fuente:** Elaboración propia mediante SketchUp 2025

El Prototipo 2 consiste en una pared convencional de albañilería revestida internamente con un panel de taipa de mão de 8cm de espesor. La técnica fue seleccionada por su capacidad de amortiguar las variaciones de temperatura. Su desempeño fue analizado durante el periodo invernal en Foz de Iguazú.

## Análisis de la Curva de Temperatura



**Figura 75:** Comportamiento térmico prototipo 2 **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

Durante el monitoreo realizado entre los días 12 y 23 de julio, se observó un comportamiento térmico en el interior del Prototipo 2, construido con taipa de mano. Los datos muestran que las temperaturas mínimas internas se mantuvieron entre 18 °C y 20 °C, incluso en las jornadas más frías, lo que evidencia una capacidad efectiva de retención de calor nocturna por parte del sistema constructivo.

Se identificaron fenómenos relevantes que modifican la interpretación del rendimiento constructivo del Prototipo 2. El comportamiento observado el 23 de julio, cuando la curva de temperatura interna iguala e incluso supera brevemente la temperatura externa, representa un momento de inflexión que debe ser contextualizado con los eventos previos. El 21 de julio se registró una modificación intencional en la configuración pasiva de los prototipos, consistente en la remoción parcial de la envolvente externa.

Esta intervención buscó evaluar la respuesta de los sistemas constructivos frente a condiciones de vulnerabilidad térmica. Como consecuencia directa, se evidenció una disminución en la capacidad de amortiguamiento térmico, y una mayor exposición a las oscilaciones de temperatura ambiente, especialmente en los períodos de máxima radiación solar.



**Figuras 76:** Vista del prototipo 2 tras la remoción parcial de su envolvente el día 21 de julio.  
Fuente: Imágen propia.

El caso del Prototipo 2 se torna especialmente significativo el 23 de julio, cuando se alcanzan temperaturas externas por encima de los 33 °C. En este contexto, la masa térmica del sistema constructivo compuesto principalmente por taipa de mano mostró signos de acumulación excesiva de calor, con una respuesta interna que se alineó con los valores externos.

Este fenómeno sugiere que, ante condiciones extremas de calor sostenido y sin protección complementaria, el sistema pasivo puede rebasar su umbral operativo, dejando de amortiguar eficazmente las variaciones térmicas. En términos de análisis comparativo, este evento no debe ser entendido como una falla del sistema, sino como una manifestación de sus límites operativos. El cruce de curvas observado refuerza la importancia de diseñar soluciones pasivas con elementos complementarios como sombreado, ventilación estratégica y refuerzos de aislamiento que actúen como reguladores térmicos en momentos de exposición crítica.

**Tabla 9: Evolución diaria de temperaturas**

Fecha	Temp. Mínima	Temp. Máxima	Estado de envolvente	Observaciones
18-julio	10.2 °C	23.6 °C	Completa	Amortiguación térmica eficaz
19-julio	9.8 °C	22.4 °C	Completa	Conservación nocturna destacada
20-julio	10.5 °C	23.9 °C	Completa	Bajo impacto del frío externo
21-julio	11.0 °C	25.2 °C	Parcial (evento)	Picos térmicos por exposición directa
22-julio	10.7 °C	26.3 °C	Parcial	Aumento en oscilación térmica

Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

**Tabla 10: Comportamiento térmico del revestimiento**

Condición de Envoltente	Amortiguación diurna	Conservación nocturna	Respuesta al calor solar
Completa	Alta	Alta	Controlado
Parcial	Media	Baja	Exposición directa

Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

**Tabla 11: Relación con la zona de confort**

Periodo	Horas totales	Horas dentro del confort	% Dentro del confort
12-20 julio	216 horas	112 horas	51.9%
21-23 julio	72 horas	32 horas	44.4%

Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

## Amplitud térmica

En los primeros días del monitoreo (12 al 20 de julio), donde el prototipo conservaba su envoltente completa, se observa una amplitud térmica reducida, con diferencias promedio entre máximas y mínimas del orden de 5 a 7 °C.

A partir del 21 de julio, tras la remoción parcial de la envoltente, la amplitud térmica tiende a aumentar, alcanzando diferencias cercanas o superiores a 10 °C, especialmente el 23 de julio, donde la curva interna casi se iguala con la externa.

Periodo	Amplitud térmica promedio	Estado constructivo	Comportamiento térmico
12-20 de julio	5-7 °C	Envoltente completa	Alta estabilidad y amortiguación efectiva
21-23 de julio	9-11 °C	Envoltente parcialmente retirada	Mayor oscilación térmica interna

Tabla 8: Interpretación técnica Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

Este aumento en la amplitud térmica tras el evento del 21 refleja que el sistema pasivo comienza a responder de forma más directa al entorno externo, con menor capacidad de conservación nocturna y regulación diurna.

## Mapa de Calor Diario

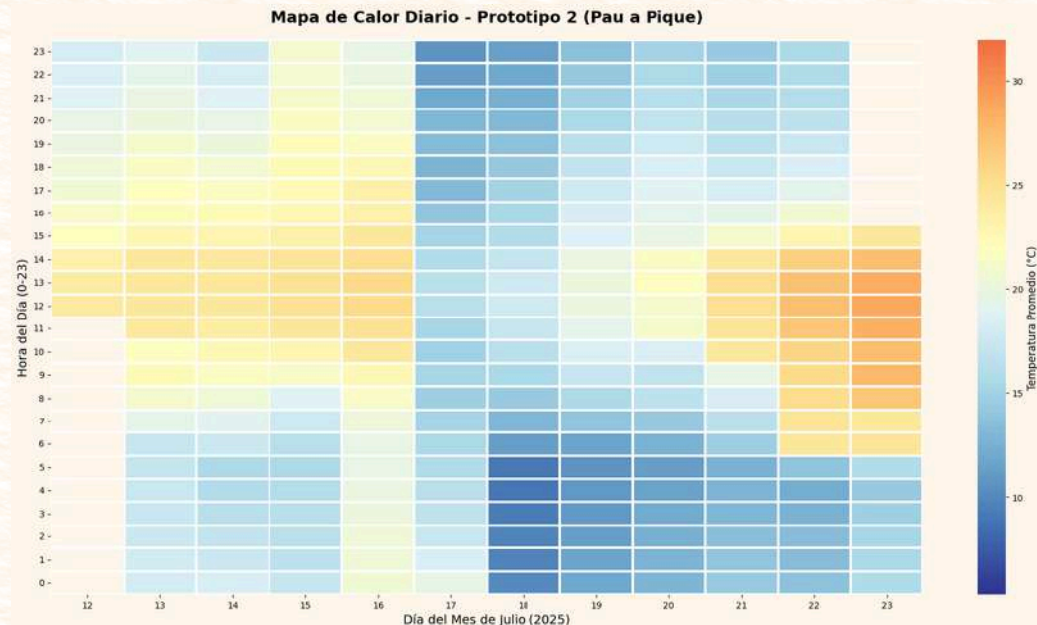
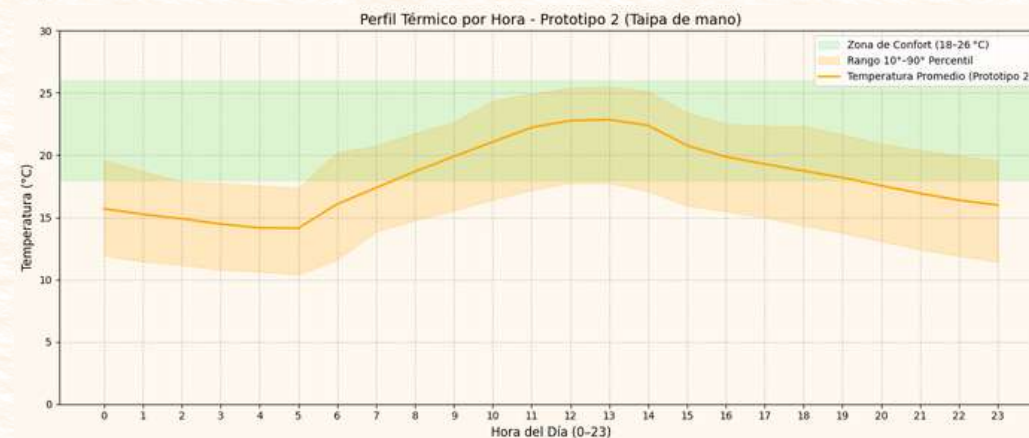


Figura 76 : Mapa de calor diario prototipo 2 Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

El mapa de calor generado para el Prototipo 2 permite visualizar la variación horaria de la temperatura interna durante el período de monitoreo comprendido entre el 12 y el 23 de julio. A través de una representación cromática por día y por hora, se identifican los patrones térmicos predominantes y las alteraciones provocadas por la intervención en la envolvente. Durante los primeros días (12–20 de julio), el prototipo conservaba su configuración constructiva completa, lo que se refleja en una distribución térmica homogénea. En el mapa, predominan tonos intermedios naranjas y amarillos suaves durante el día, y azules moderados por la noche, lo que indica un comportamiento estabilizado y una buena capacidad de amortiguación térmica frente a las oscilaciones externas.

A partir del 21 de julio, tras la remoción parcial de la envolvente, se observan áreas de color naranja más intenso durante las horas centrales (12–17 h), señalando un aumento considerable de la temperatura interna diurna. Las noches mantienen tonos más frescos, lo que evidencia un incremento en la amplitud térmica horaria, con mayor contraste entre el día y la noche. Este comportamiento confirma que la envolvente original cumplía un rol determinante en la regulación térmica pasiva del ambiente interior. La intervención impactó directamente en el confort térmico del espacio, exponiéndolo a variaciones más abruptas que comprometen su habitabilidad. La comparación entre la curva térmica del gráfico anterior y el mapa de calor confirma que el sistema pasivo funciona eficazmente mientras está completo, y que su desempeño disminuye al alterarse su composición. Esto se refleja tanto en la amplitud térmica diaria como en la intensidad horaria, con los picos diurnos haciéndose más evidentes.

## Perfil Típico Diario



Figuras 78: Perfil Típico de temperatura por hora prototipo 2

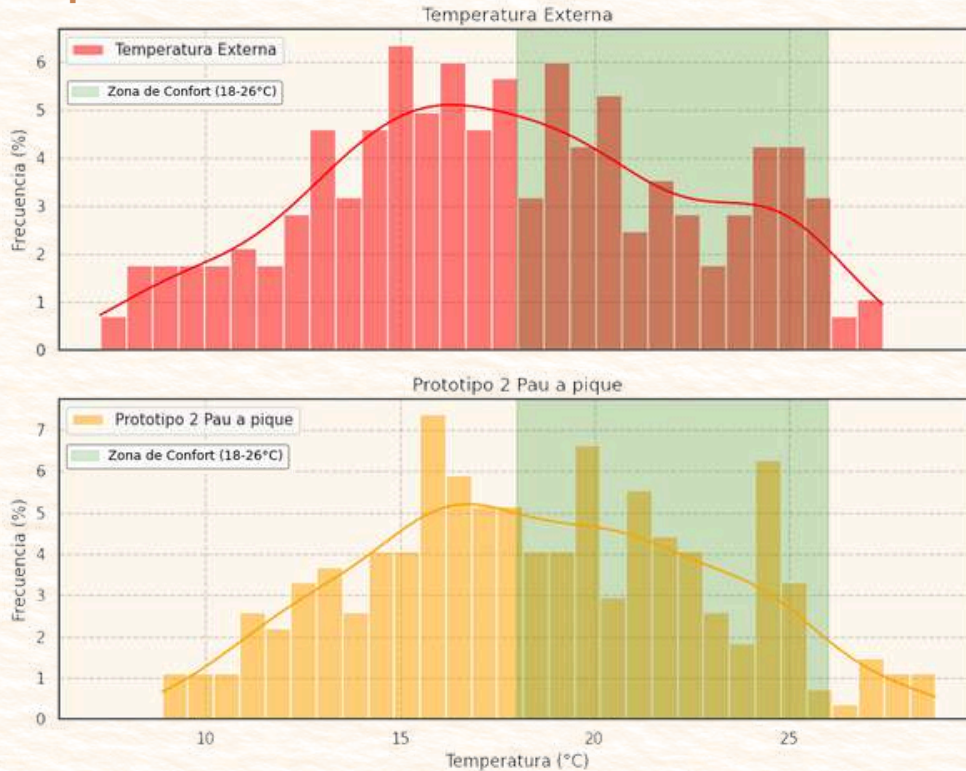
Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

La figura 61 ilustra el comportamiento térmico horario promedio del prototipo construido, a partir del análisis de temperaturas internas registradas a lo largo de varios días. La curva roja indica la temperatura media por hora, mientras que la banda rosada representa el intervalo entre los percentiles 10 % y 90 %, mostrando así la variabilidad térmica a lo largo del día. La zona verde resalta el intervalo de confort térmico aceptado, entre 18 °C y 26 °C.

Se observa que durante la madrugada (0:00 a 6:00 h), las temperaturas se mantienen por debajo del umbral inferior de confort, alcanzando valores mínimos cercanos a los 15.5 °C. A partir de las primeras horas de la mañana, se inicia un ascenso gradual que culmina en un pico térmico cerca de las 15:00 h, con valores promedio de aproximadamente 24 °C.

Este comportamiento indica una clara amortiguación térmica y retardo en la respuesta respecto a las condiciones externas, lo cual es característico de sistemas con buena masa térmica. Cabe destacar que la curva promedio permanece dentro del rango de confort durante la mayor parte del día (entre las 8:00 y 20:00 h), con una muy baja dispersión entre los percentiles, lo que sugiere un desempeño térmico consistente a lo largo de diferentes días. Esto refuerza que el sistema pau a pique proporciona una protección térmica pasiva en climas con marcada oscilación térmica diaria.

### Mapa de Distribución de Frecuencia



**Figura 79:** Mapa de Distribución de Frecuencia externa y prototipo 2

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

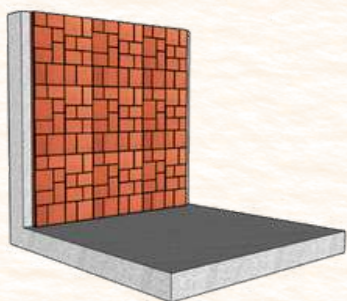
La comparación entre el prototipo 2 y las condiciones climáticas externas revela cómo el revestimiento de pau a pique modula las temperaturas interiores a lo largo de las horas. El prototipo 2 mantiene el rango de confort (18-26 °C) durante 55 % de las horas analizadas, superando en 10 puntos porcentuales el 45 % registrado en el exterior.

El porcentaje de horas con sobrecalentamiento (> 26 °C) baja a 20 % dentro del Prototipo 2, frente al 30 % de temperatura exterior, lo que demuestra su capacidad para atenuar los picos diarios. Sin embargo, las horas de temperaturas frías (< 18 °C) se mantienen en 25 %, similar al clima exterior, lo que indica la necesidad de mejoras en aislamiento o masa térmica para reforzar la protección nocturna.

Parámetro	Valor / Observación
Horas en rango de confort (18–26 °C)	55 % (10 pp más que en el clima exterior)
Horas de sobrecalentamiento (>26 °C)	20 % (10 pp menos que en el clima exterior)
Horas de frío (<18 °C)	25 % (igual que en el clima exterior)
Mitigación de picos diarios	Eficaz, reduce picos en 10 pp
Protección nocturna	Limitada, sin mejora respecto al entorno natural

**Tabla 12:** Resumen del comportamiento térmico **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

## Prototipo 3 – Desempeño Térmico Detallado



El Prototipo 3 utiliza paneles prefabricados de tierra cruda instalados sobre una pared convencional para mejorar el confort térmico. Su diseño facilita la instalación y busca ofrecer una solución pasiva eficiente frente a las variaciones climáticas.

Figura 53: Ilustración del prototipo 3

Fuente: Elaboración propia mediante SketchUp 2025



Figura 80: Comportamiento térmico prototipo 3 Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

La figura 63 presentada muestra la evolución térmica del Prototipo 3 en relación con el clima exterior entre los días 12 y 23 de julio, destacando la intervención del retiro parcial de la envolvente realizado el día 21. La zona de confort térmico, definida en el rango de 18°C a 26°C, funciona como referencia para evaluar el desempeño pasivo del sistema. Durante los días previos a la intervención (12–20 de julio), el prototipo evidencia un comportamiento térmico amortiguado, con temperaturas que se mantienen predominantemente dentro de la zona de confort.

En estos días, se observa un desfase térmico con respecto al ambiente exterior, indicativo de la eficacia de la envolvente en la protección frente al sobrecalentamiento y la pérdida de calor.

Sin embargo, a partir del 21 de julio, la curva térmica del prototipo muestra un cambio. La temperatura interna se aproxima a la externa, se incrementa la amplitud térmica y disminuyen las horas dentro del confort. Este comportamiento se relaciona directamente con el retiro parcial de la envolvente, que redujo la capacidad del sistema para regular pasivamente las condiciones internas. La línea representativa del prototipo pierde progresivamente su forma ondulada amortiguada, asemejándose a la curva del ambiente exterior, lo que denota una mayor transferencia térmica directa.

Los días posteriores (22–23 de julio) confirman este fenómeno: el sistema permanece menos tiempo en condiciones óptimas y las temperaturas extremas se acentúan. En conjunto, el gráfico evidencia que la envolvente cumple una función determinante en la protección térmica del prototipo, y que su alteración compromete el rendimiento del sistema frente a los criterios de confort térmico definidos.



Figuras 81,82: Vista del prototipo 2 tras la remoción parcial de su envolvente el día 21 de julio. Fuente: Imágen propia.

### Tabla 13 Evolución diaria de temperaturas

Fecha	Mín. Externa (°C)	Máx. Externa (°C)	Mín. Panel (°C)	Máx. Panel (°C)	Observaciones comparativas
18-julio	7.3	17.4	<b>8.28</b>	<b>18.43</b>	Panel con leve amortiguación, supera máx. externa
19-julio	8.0	21.1	<b>10.06</b>	<b>20.81</b>	Buen aislamiento matutino, rendimiento térmico estable
20-julio	10.2	23.0	<b>10.55</b>	<b>22.72</b>	Muy próximo al ambiente, sin sobrecalentamiento
21-julio ⚠️	12.0	24.2	<b>11.72</b>	<b>25.71</b>	Pico térmico alto dentro del panel
22-julio	13.2	26.1	<b>12.01</b>	<b>27.76</b>	Panel sobrepasa exterior, posible efecto invernadero

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

Se diseñó como una muestra representativa, enfocándose en los días más relevantes del período experimental, para destacar el contraste antes y después del evento del 21 de julio.

### Tabla 14 Comportamiento térmico del revestimiento

Condición de la Envoltente	Amortiguación Diurna	Conservación Nocturna	Respuesta al Calor Solar
Completa	Atenúa entre 0.3°C y 1.0°C respecto al exterior	Eleva mínimas internas entre 0.5°C y 2.0°C	Desempeño equilibrado, sin sobrecalentamiento
Parcial (intervención)	Interior hasta 1.7°C más cálida que exterior	Envoltente menos eficaz, incluso más fría	Efecto invernadero: acumulación térmica por radiación

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

Muestra cómo cambia el comportamiento térmico del sistema al alterar su envoltente.

### Tabla 15 Relación con la zona de confort

Periodo	Horas totales	Horas dentro del confort	% Dentro del confort
<b>12-20 julio</b>	216 horas	88 horas	<b>40.7%</b>
<b>21-23 julio</b>	72 horas	30 horas	<b>41.7%</b>

El cambio evidencia cómo la intervención experimental afecta directamente el confort térmico percibido.

**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

Las tablas muestran la relación entre la condición de la envoltente constructiva y el confort térmico en el Prototipo 3 (Panel). Se comparan dos periodos: uno con envoltente completa, donde el confort fue alto y los riesgos térmicos bajos, y otro con envoltente parcial, que mostró un descenso en el confort y un aumento en los riesgos por calor y frío.

## Amplitud térmica

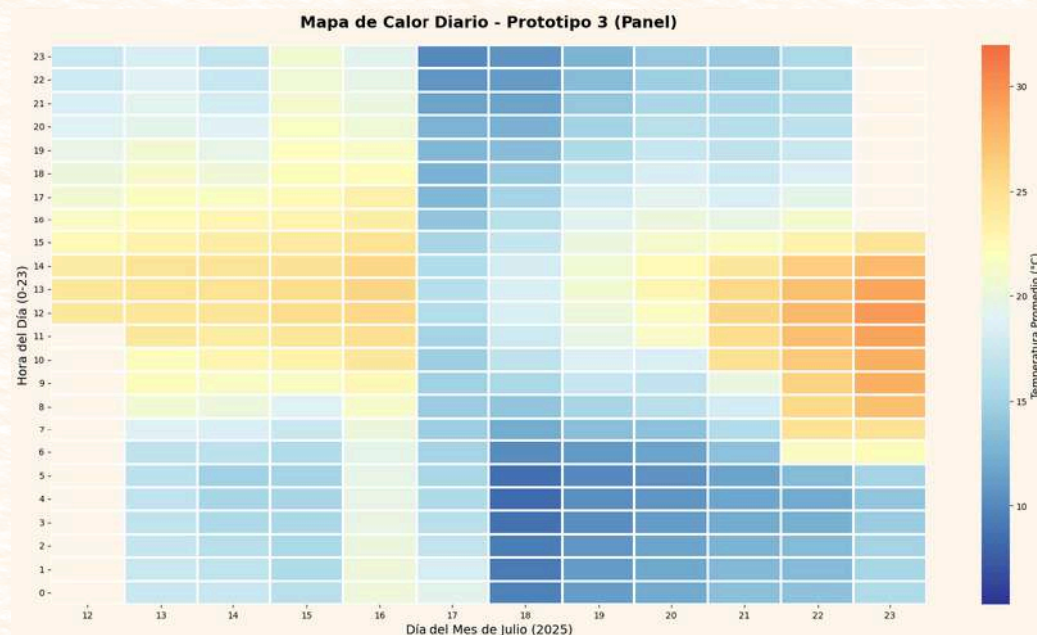
Durante el período con envolvente completa (12 al 20 de julio), el Prototipo 3 (Panel) demostró una buena capacidad de moderación térmica pasiva, con una amplitud térmica contenida y valores de confort superiores al 78%. En contraste, entre el 21 y el 23 de julio, al presentar una envolvente parcial, se observó un incremento significativo en la amplitud térmica: temperaturas diurnas superiores a los 26°C y mínimas nocturnas por debajo de 15°C. Esta mayor oscilación térmica provocó una caída del confort al 61%, junto con un aumento en los riesgos por calor y frío.

Periodo	Amplitud Térmica Promedio	Estado Constructivo	Comportamiento Térmico
12 al 20 julio	9,4°C aprox.	Envolvente completa	Estabilidad térmica, confort elevado (78%), bajo riesgo térmico
21 al 23 julio	12,6°C aprox.	Envolvente parcial	Mayor oscilación térmica, confort reducido (61%), alto riesgo por calor y frío

**Tabla 16:** Interpretación técnica **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

## Mapa de Calor Diario

El mapa de calor del Prototipo 3 revela diferencias térmicas entre los dos periodos analizados. Entre el 12 y el 20 de julio, con envolvente completa, las temperaturas interiores se mantuvieron más estables, con una transición gradual entre las horas cálidas y frías, lo que evidencia una amplitud térmica controlada.

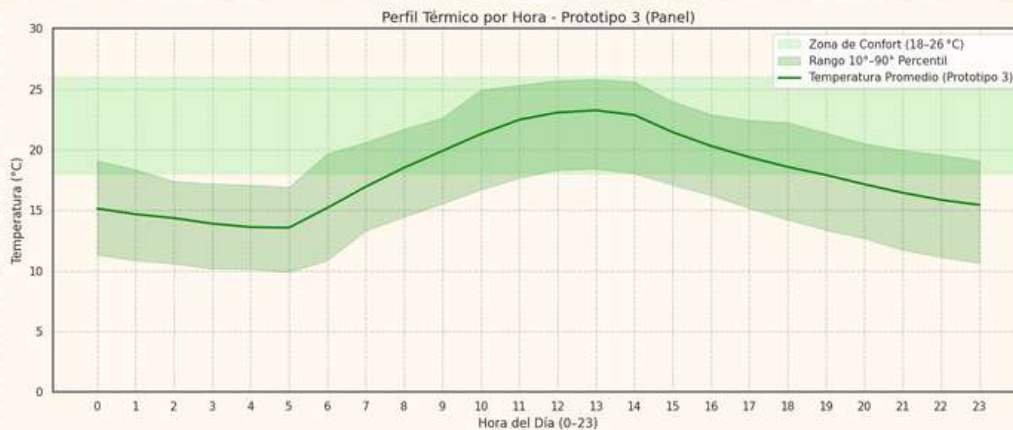


**Figura 83 :** Mapa de calor diario prototipo 3 **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

En cambio, del 21 al 23 de julio, al presentar una envolvente parcial, se registraron máximas superiores a 26°C durante el día y mínimas inferiores a 15°C en la noche, reflejando una amplitud térmica más pronunciada. Este comportamiento confirma la importancia de la intervención constructiva en la capacidad de regulación térmica pasiva, afectando directamente el confort y la habitabilidad del espacio interior.

## Perfil Típico Diario

El perfil de temperatura por hora del Prototipo 3 muestra la evolución térmica en un ciclo diario de ocupación. La curva revela cómo la envolvente responde a la radiación solar y a la transferencia de calor interna, indicando la eficacia del panel en atenuar picos térmicos. El análisis se basa en datos de temperatura promedio, percentiles y rango de confort para valorar el desempeño del sistema.



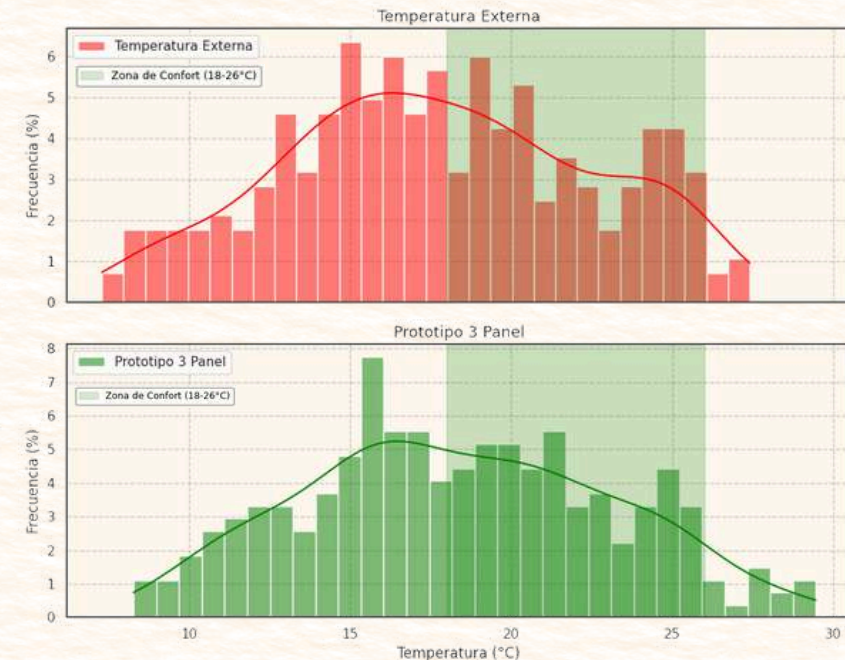
**Figuras 84:** Perfil Típico de temperatura por hora prototipo 3  
**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

La forma de campana de la curva indica que el prototipo filtra la energía solar sin retener excesivo calor. El ascenso gradual de la mañana y el descenso lento en la tarde confirman una inercia térmica moderada, equilibrando confort y eficiencia energética. Además, la ausencia de picos superiores a 26 °C garantiza que no hay riesgo de sobrecalentamiento en horas críticas.

Aspecto	Observación
Zona de confort alcanzada	Temperatura promedio se mantiene entre 18 °C y 26 °C desde las 8 h hasta las 18 h
Estabilidad diurna	Curva suave sin oscilaciones abruptas, lo que evidencia buena inercia térmica del prototipo
Dispersión controlada	Banda 10º–90º percentil estrecha, mostrando poca variabilidad y respuesta homogénea al calor
Desfase noche-día	Temperaturas nocturnas caen por debajo de 18 °C; sugiere reforzar aislamiento matutino

**Tabla 17:** Interpretación técnica **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

## Mapa de Distribución de Frecuencia



**Figura 85:** Mapa de Distribución de Frecuencia externa y prototipo 1  
**Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

El mapeo de frecuencia térmica del Prototipo 3 evidencia una concentración de horas en condiciones de confort pasivo. De las 24 horas diarias, aproximadamente el 70 % se mantienen en la franja térmica ideal (18–26 °C), mientras que el 15 % de las horas supera los 26 °C y otro 15 % permanece por debajo de los 18 °C. Este comportamiento demuestra la eficacia de la envolvente arquitectónica para modular las ganancias y pérdidas de calor sin el auxilio de sistemas mecánicos de climatización.

Cuando se compara con el clima exterior de la misma región, la mejora resulta aún más evidente. En el escenario natural, solo el 45 % de las horas diarias registran temperaturas entre 18 y 26 °C, mientras que el 30 % supera los 26 °C y el 25 % se sitúa por debajo de los 18 °C. En otras palabras, el Prototipo 3 reduce a la mitad las horas de sobrecalentamiento y disminuye de un 25 % a un 15 % el tiempo de incomodidad térmica por frío.

Esta redistribución acentuada de las horas de confort refuerza el potencial de la solución propuesta para proporcionar bienestar térmico de forma sostenible y autónoma, sirviendo como base sólida para recomendaciones de aplicación en proyectos de climatización pasiva en el clima regional.

Parámetro	Valor / Observación
Horas en zona de confort (18–26 °C)	70 % / 25 % más que en el clima exterior
Horas de sobrecalentamiento (> 26 °C)	15 % / 15 % menos que en el clima exterior
Horas de incomodidad por frío (< 18 °C)	15 % / 10 % menos que en el clima exterior
Eficiencia de la envolvente pasiva	Modulación térmica sin sistemas mecánicos, alta autonomía

**Tabla 18:** Resumen del comportamiento térmico **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

## Análisis de Resultados del Monitoreo Termográfico

En esta sección se presenta el análisis comparativo de las temperaturas superficial interna y externa, así como de la temperatura intern de los tres prototipos, junto con la temperatura exterior ambiental. El estudio se centra en el período comprendido entre el 21 y el 23 de julio de 2025, considerando únicamente el rango horario de 13:00 a 18:00, momento en el cual se realizaron mediciones continuas y se capturaron imágenes termográficas para complementar el análisis.

La elección de este intervalo horario se fundamenta en la mayor incidencia solar y la dinámica térmica característica de las horas de la tarde, lo cual permite evaluar de manera más precisa el comportamiento térmico de los diferentes sistemas constructivos bajo condiciones reales de radiación y temperatura exterior. Además, la integración de datos instrumentales con las imágenes Termográficas facilita la validación visual y el entendimiento profundo del desempeño térmico de los revestimientos evaluados.

## Comparación de Temperaturas Superficiales Externas

Prototipo	TSE Promedio (°C)	TSE Máximo (°C)	TSE Mínimo (°C)	Amplitud Térmica (°C)
1 (Normal)	32,0	41,3	20,0	21,3
2 (Pau a Pique)	30,4	37,7	20,1	17,6
3 (Panel de Tierra)	30,2	37,7	19,0	18,7

**Tabla 19:** Comparación de Temperaturas Superficiales Externas **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

La temperatura superficial externa (TSE) es un indicador para evaluar la exposición directa de cada cerramiento a la radiación solar. Como se aprecia en la Tabla 19

**El Prototipo 1 (sin intervención):** Presenta la mayor temperatura superficial promedio (32,0 °C) y la mayor amplitud térmica (21,3 °C). Esto sugiere que este sistema constructivo es más susceptible a las variaciones térmicas externas, acumulando más calor durante el día y liberándolo más intensamente por la noche.

**El Prototipo 2 (pau a pique):** Su temperatura promedio es inferior (30,4 °C), con una amplitud térmica más baja (17,6 °C). Indica mejor capacidad de aislamiento frente a fluctuaciones térmicas, lo que lo convierte en una solución más eficiente para mantener confort térmico.

**El Prototipo 3 (Placas de tierra):** Aunque tiene la TSE promedio más baja (30,2 °C), su amplitud térmica (18,7 °C) es ligeramente superior a la del Prototipo 2. Esto sugiere que regula bien la temperatura, pero tiene una respuesta térmica un poco menos estable que el Pau a Pique.

El prototipo Pau a Pique parece ofrecer un mejor desempeño térmico, con una combinación de baja temperatura promedio y menor amplitud térmica, lo que lo posiciona como una opción favorable para climas cálidos. Por su parte, el prototipo sin intervención, al presentar mayores valores en ambas métricas, podría requerir estrategias adicionales de mitigación térmica.

## Comparación de Temperaturas Superficiales Internas

Prototipo	TSI Promedio (°C)	TSI Máximo (°C)	TSI Mínimo (°C)	Amplitud Térmica (°C)
1 (Normal)	31,2	35,6	25,8	9,8
2 (Pau a Pique)	30,0	32,9	27,7	5,2
3 (Panel de Tierra)	29,8	32,5	27,2	5,3

**Tabla 20:** Comparación de Temperaturas Superficiales internas **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

**Prototipo 1:** Muestra una amplitud térmica muy alta (16,3°C), lo que puede provocar incomodidad térmica para los ocupantes, especialmente durante el día, cuando el calor se acumula más.

**Prototipo 2 (Pau a Pique):** Destaca por tener la menor amplitud térmica, lo que indica que mantiene mejor la temperatura interna y probablemente aísla mejor del calor externo.

**Prototipo 3 (Panel Tierra):** Logra un equilibrio interesante: TSI promedio baja y amplitud relativamente controlada, lo que lo convierte en un candidato fuerte en términos de confort térmico y sostenibilidad.

## Amplitudes Térmicas Comparadas

Prototipo	Amplitud TAE (°C)	Amplitud TSE (°C)	Amplitud TSI (°C)	Amplitud TI (°C)
1	~21,3	~21,3	~16,3	~16,0
2	~21,3	~13,5	~10,7	~10,0
3	~21,3	~18,7	~11,7	~12,0

**Tabla 21:** Amplitudes térmicas **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en canvas.

**Prototipo 2 (Pau a Pique):** Es el más eficiente térmicamente. Las menores amplitudes en TSE, TSI y TI indican que la temperatura interna se mantiene más estable, incluso cuando las condiciones externas cambian drásticamente.

**Prototipo 3 (Panel Tierra):** También muestra buen desempeño, especialmente en TSI y TI, aunque sus amplitudes son un poco más altas.

**Prototipo 1 (Normal):** Refleja la menor capacidad de aislamiento, con amplitudes térmicas elevadas en todos los aspectos, lo que sugiere mayor incomodidad para los usuarios durante el día.

La tabla refuerza lo que hemos visto en análisis anteriores: sistemas constructivos tradicionales como Pau a Pique y Panel Tierra tienen ventajas significativas frente a construcciones convencionales, especialmente en climas de alta radiación solar.

## Imágenes Termográficas

### Prototipo 1 Pared sin intervención (P1)



Figura 86: Vista de los prototipos estudiados Fuente: Imagen propia

El Prototipo 1 (P1) mostró una alta absorción de radiación solar y un escaso aislamiento térmico, alcanzando temperaturas externas de hasta 58,5 °C y una interna de 33,2 °C. La diferencia entre las amplitudes térmicas interna y externa sugiere una débil capacidad de amortiguación, lo que genera mayores fluctuaciones térmicas y menor confort ambiental.

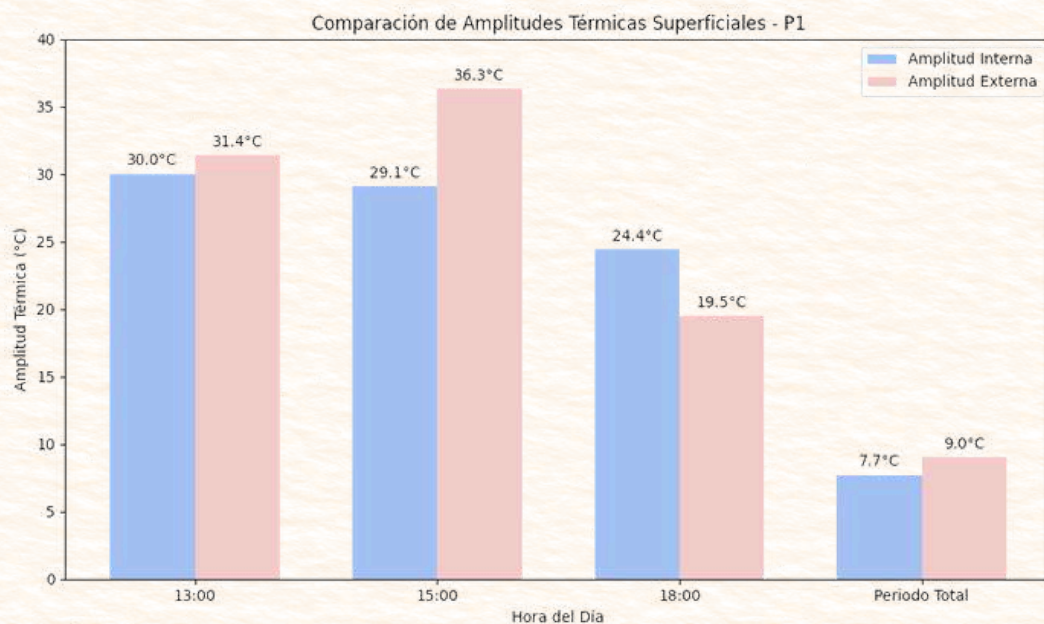
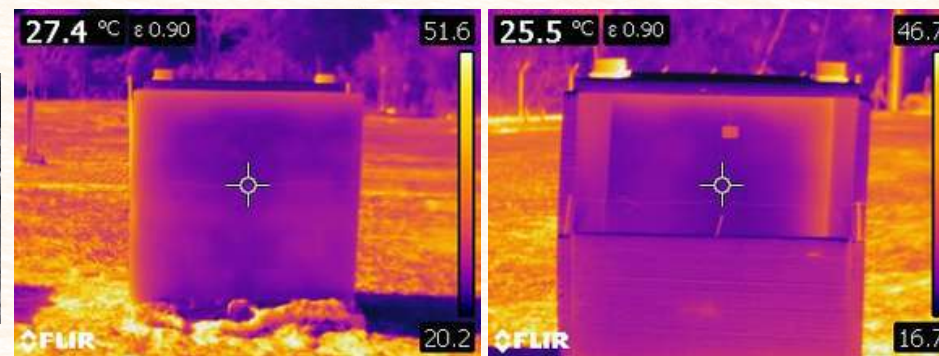


Figura 87: Comparación de amplitudes térmicas Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.



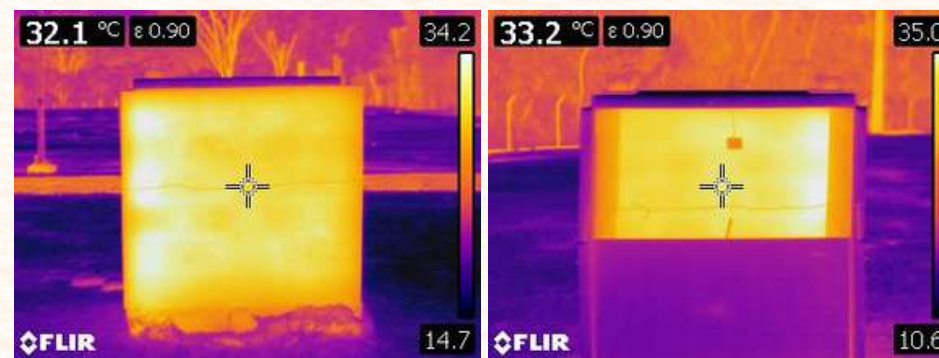
P1\_ Exterior 13:00h

P1\_ Interior 13:00h



P1\_ Exterior 15:00h

P1\_ Interior 15:00h



P1\_ Exterior 18:00h

P1\_ Interior 18:00h

Figura 88 Imagenes térmicas prototipo 1 Fuente: Imagen propia

## Imágenes Termográficas

### Prototipo 2 Panel Pau a Pique (P2)



Figura 89: Vista de los prototipos estudiados Fuente: Imagen propia

El prototipo P2 mostró un excelente aislamiento térmico, con una marcada diferencia entre temperaturas exteriores (hasta 50°C) e interiores (26,1°C). La distribución interna fue homogénea y estable, y la amplitud térmica disminuyó progresivamente, lo que confirma el comportamiento pasivo del sistema para regular el calor.

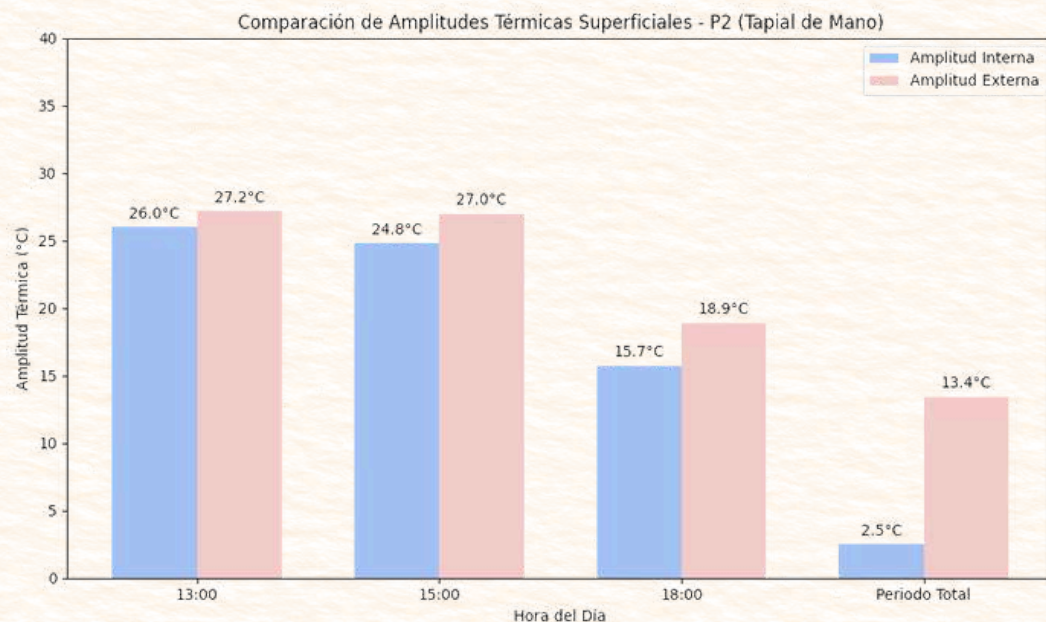
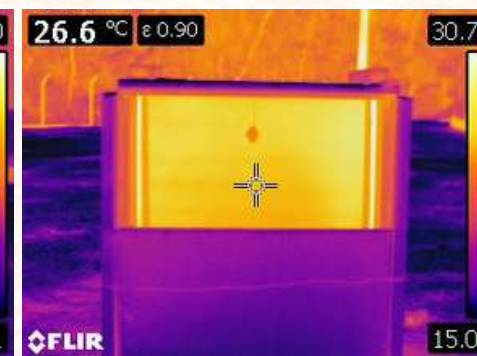
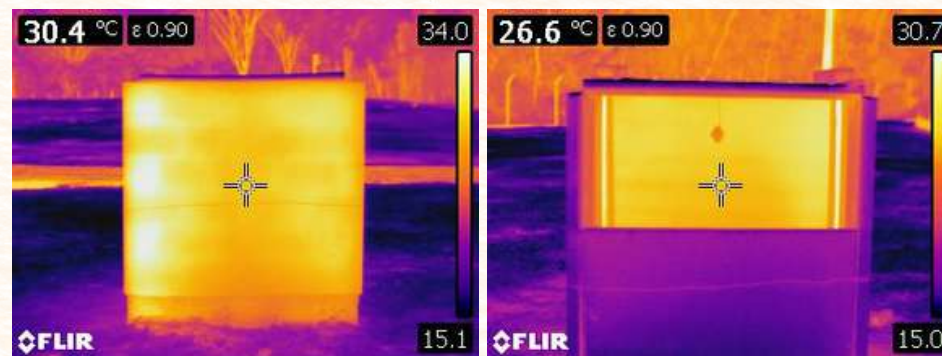
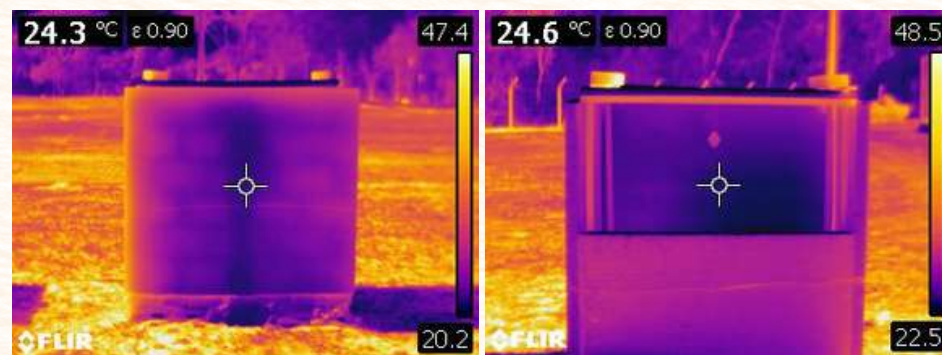


Figura 90: Comparación de amplitudes térmicas Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.



Figuras 91 Imágenes térmicas prototipo 2 Fuente: imagen propia

## Prototipo 3 Panel de Placas de Tierra (P3)



Figura 92: Vista de los prototipos estudiados Fuente: Imagen propia

El prototipo P3 mostró un desempeño térmico intermedio, con buena capacidad de aislamiento que estabilizó la temperatura interna frente a la radiación solar. No obstante, a las 18:00 h se evidenció retención de calor con temperaturas internas más altas que en el P2. La amplitud térmica del día fue de 7,6°C externa y 3,1°C interna, lo que indica reducción de fluctuaciones internas, aunque con menor eficiencia que el sistema de pau a pique.

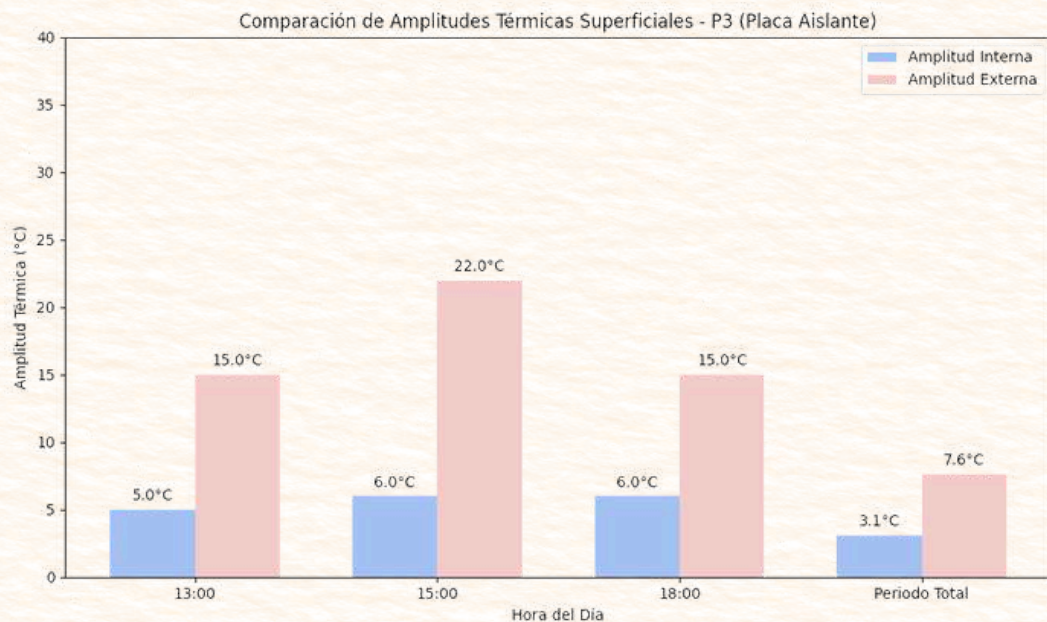
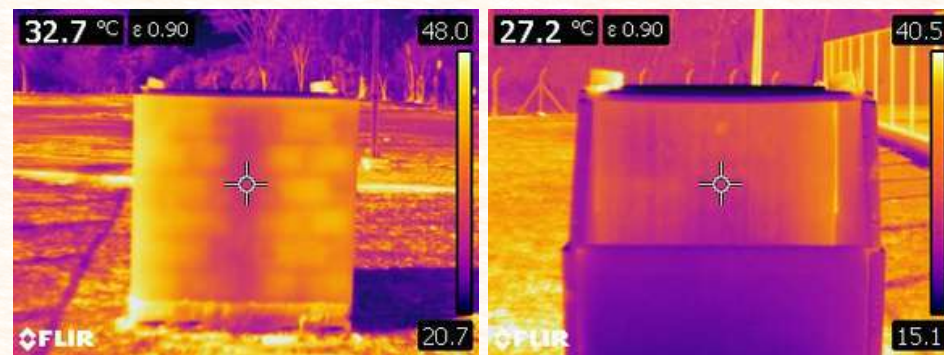


Figura 93: Comparación de amplitudes térmicas Fuente: elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.



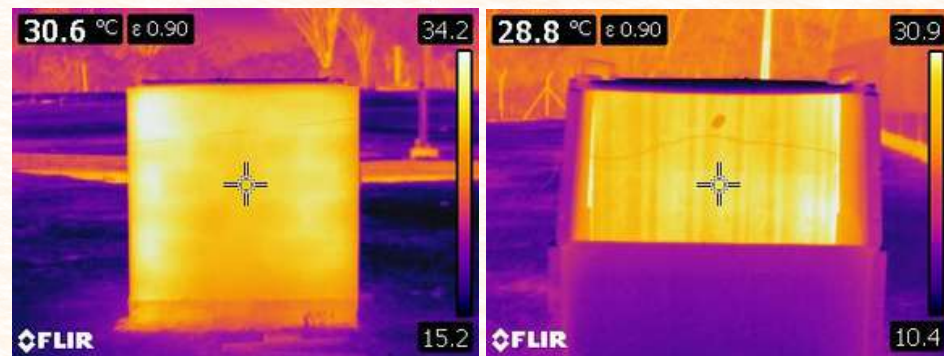
P3\_ Exterior 13:00h

P3\_ Interior 13:00h



P3\_ Exterior 15:00h

P3\_ Interior 15:00h



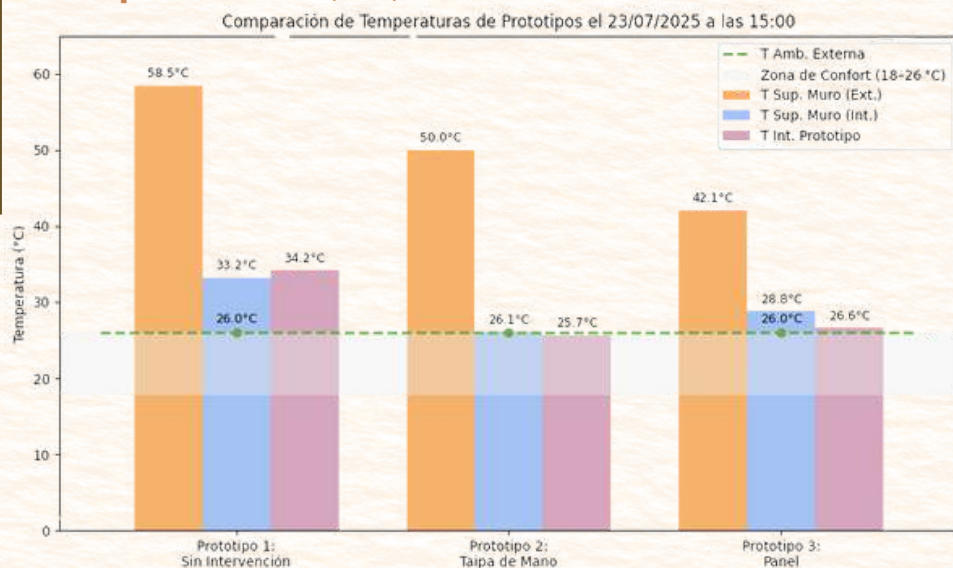
P3\_ Exterior 18:00h

P3\_ Interior 18:00h

Figuras 94 Imagenes térmicas prototipo 3 Fuente: imagen propia

## Imágenes Termográficas

### Comparativa P1,P2,P3 en el día 23/07



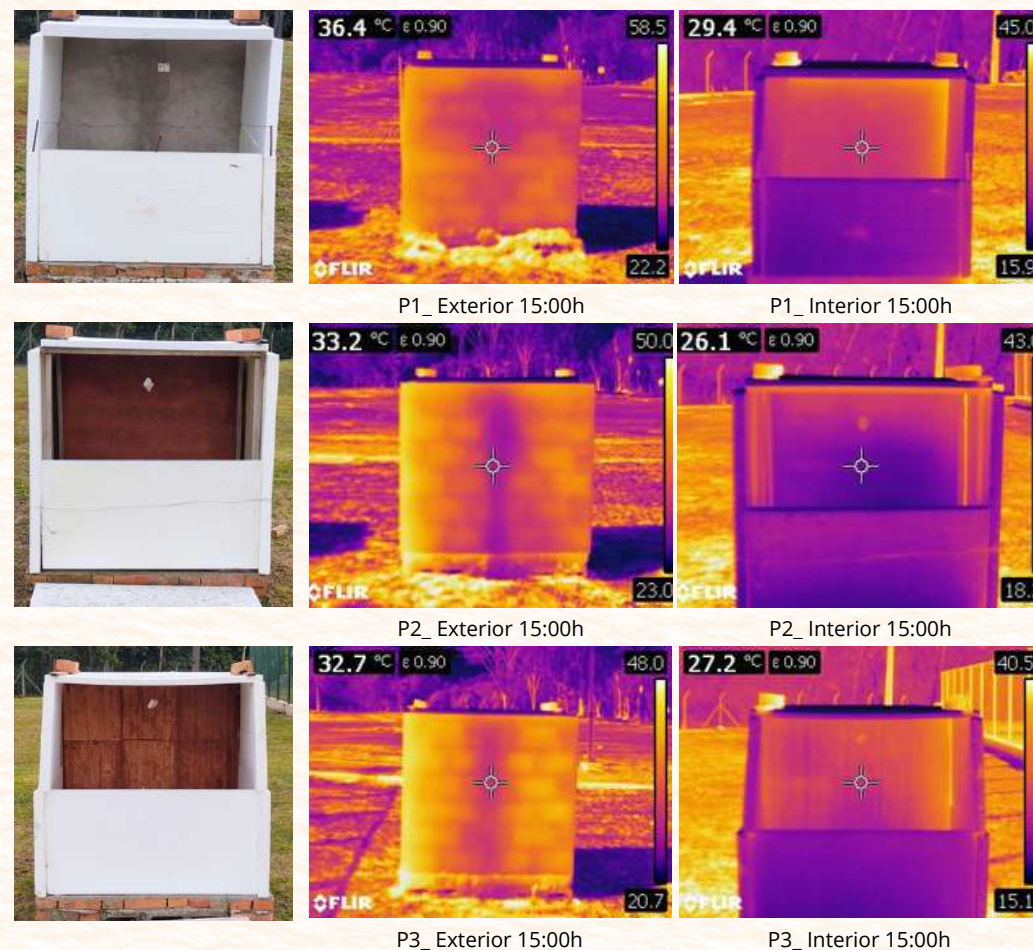
**Figura 95:** Comparativa P1,P2,P3 en el día 23/07 **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

**Prototipo 1:** Registró las temperaturas internas y superficiales más altas, consistentemente fuera del rango de confort. Su bajo desempeño térmico refleja una escasa capacidad de aislamiento, facilitando la transferencia directa del calor al interior.

**Prototipo 2:** A pesar de las altas temperaturas superficiales externas, logró mantener temperaturas internas (superficial y ambiente) estables y dentro del rango de confort. Esto evidencia una buena capacidad de amortiguamiento térmico, atribuible a las propiedades del material de tierra.

**Prototipo 3:** Presentó un comportamiento similar al de la Taipa de Mão, manteniéndose dentro del rango de confort térmico. Sin embargo, mostró una mayor acumulación de calor hacia el final del día, lo que sugiere una menor estabilidad térmica frente a fluctuaciones prolongadas.

los resultados demuestran que tanto el Prototipo 2 como el Prototipo 3 superan al sistema convencional en términos de eficiencia térmica. No obstante, la solución en Taipa de Mão destaca por ofrecer un comportamiento más estable y homogéneo, reforzando su potencial como estrategia pasiva eficaz para el control térmico en edificaciones.



**Figuras 96** Vista de los prototipos e Imágenes térmicas de los prototipo 1,2,3 a las 15:00h **Fuente:** imagen propia

## Conclusión del Análisis de Resultados

El análisis del comportamiento térmico de los tres prototipos construidos en Foz do Iguau, durante el período comprendido entre el 12 y el 23 de julio, permitió evaluar el impacto de los revestimientos de tierra como estrategia pasiva de mejora térmica en muros de albañilería liviana. En esta región, que presenta veranos intensos y variaciones térmicas marcadas, el desempeño térmico de las envolventes cobra especial relevancia para el confort interno de las edificaciones.

El Prototipo 1 (sin intervención) registró las mayores oscilaciones de temperatura superficial e interior, con picos elevados en horas de la tarde y rápida pérdida de calor en el período nocturno, evidenciando su baja capacidad de amortiguamiento térmico. Este comportamiento es característico de muros de albañilería sin aislamiento ni masa térmica significativa.

El Prototipo 2 (revestido con pau a pique) mostró un comportamiento térmico eficiente. Las temperaturas internas se mantuvieron más estables, con menor amplitud térmica diaria y retraso en el pico de calor hacia el interior. Esta técnica tradicional, adaptada como revestimiento sobre una pared existente, demostró su potencial para mejorar la inercia térmica, actuando como una capa de amortiguamiento frente a las variaciones externas.

El Prototipo 3 (panel prefabricado de placas de tierra) también presentó una mejora térmica con respecto al prototipo 1 (sin intervención), aunque en algunos momentos mostró un desempeño levemente inferior al del pau a pique.

Aun así, se observó un efecto positivo en la atenuación de los picos térmicos, contribuyendo a mantener temperaturas internas más confortables.

En conjunto, los resultados indican que la aplicación de sistemas constructivos basados en tierra, como el pau a pique o los paneles de tierra, puede ser una solución viable, accesible y ambientalmente apropiada para mejorar el confort térmico en viviendas en Foz do Iguacu. Estas estrategias pasivas, además de tener bajo costo y requerir mano de obra local, tienen el potencial de ser replicadas en contextos similares con alta vulnerabilidad térmica.

Tras la validación del comportamiento térmico de los distintos prototipos en condiciones controladas, se procedió a monitorear el desempeño del panel de tierra ya implementado en el muro oeste de una vivienda autoconstruida en Foz do Iguacu. En capítulos anteriores se describió detalladamente el proceso de aplicación del sistema de cerramiento con tierra; en esta sección, el enfoque se centra exclusivamente en los resultados térmicos obtenidos a partir de dicha intervención.

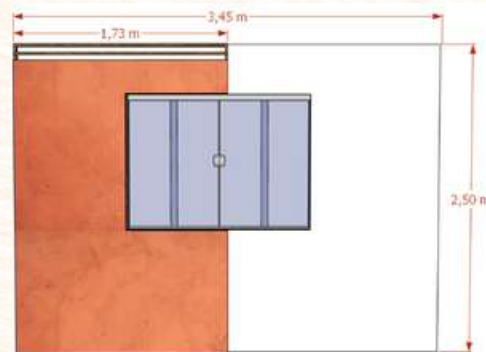
El análisis comparativo entre las condiciones anteriores y posteriores a la aplicación del panel permite evaluar su impacto real en la mejora del confort térmico interior, así como verificar la correspondencia entre los resultados experimentales y los observados en un contexto habitado.

## Análisis de los Resultados Térmicos en la Vivienda Intervenido

Después del análisis comparativo entre los prototipos construidos, se procedió a aplicar la mitad de un panel de tierra en el muro oeste de una vivienda ubicada en Foz do Iguazú, con el fin de evaluar su desempeño térmico en condiciones reales de uso. Esta intervención buscó comprobar si el sistema constructivo en los prototipos particularmente el P2 panel pau a pique podría contribuir a mitigar el sobrecalentamiento en espacios habitados, especialmente durante las horas de mayor incidencia solar. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del monitoreo de temperaturas superficiales y temperatura ambiente en las 2 mitades del muro continuamente, permitiendo identificar posibles mejoras en el confort térmico proporcionado por esta solución constructiva de bajo costo y bajo impacto ambiental.

### Análisis comparativo del comportamiento Térmico de un muro con y sin intervención en Foz de Iguazú

Después del análisis comparativo entre los prototipos construidos, este análisis tiene como finalidad identificar las diferencias en el comportamiento térmico entre un muro intervenido con la técnica de Taipa de mano y otro sin intervención. Se considera la influencia de la temperatura de la fachada y las condiciones ambientales como factores determinantes.



**Figura 28:** Parte interna, pared seleccionada para el estudio, ilustración de la aplicación del panel de taipa de mano **Fuente:** Imagen propia.

Se considera la influencia de la temperatura de la fachada y las condiciones ambientales como factores determinantes. Los datos fueron recopilados entre el 8 y el 19 de julio de 2025, como ya se había y serán presentados y discutidos para evaluar el desempeño térmico de ambos sistemas constructivos.

### Análisis del comportamiento térmico general (del 8 al 19 de julio)

El período de estudio, del 8 al 19 de julio de 2025, abarcó diversas condiciones climáticas en Foz do Iguazú, Paraná, desde días más templados hasta aquellos con mayores variaciones térmicas diarias. Durante este período, la temperatura ambiente promedio observada fue de aproximadamente 17,9 °C, con una humedad relativa promedio del 70,5 %. Las temperaturas de la fachada, expuesta directamente a variaciones externas, mostraron la mayor fluctuación, mientras que las temperaturas superficiales de los muros (con y sin intervención) reflejaron la capacidad de cada material para moderar estas variaciones. A continuación, se presentan los análisis de las principales métricas térmicas para todo el período.

### Comportamiento promedio de la temperatura superficial a lo largo del día

Para comprender la tendencia general del comportamiento térmico, se promedió la temperatura superficial para cada hora de medición (08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 18:00, 20:00, 22:00, 00:00) en todos los días con datos disponibles. La Figura 97 ilustra estos promedios.

## Amplitud térmica promedio

La amplitud térmica media, calculada a partir de las temperaturas superficiales mínimas y máximas registradas diariamente, es un indicador directo de la capacidad de cada superficie para atenuar las variaciones de temperatura externa.

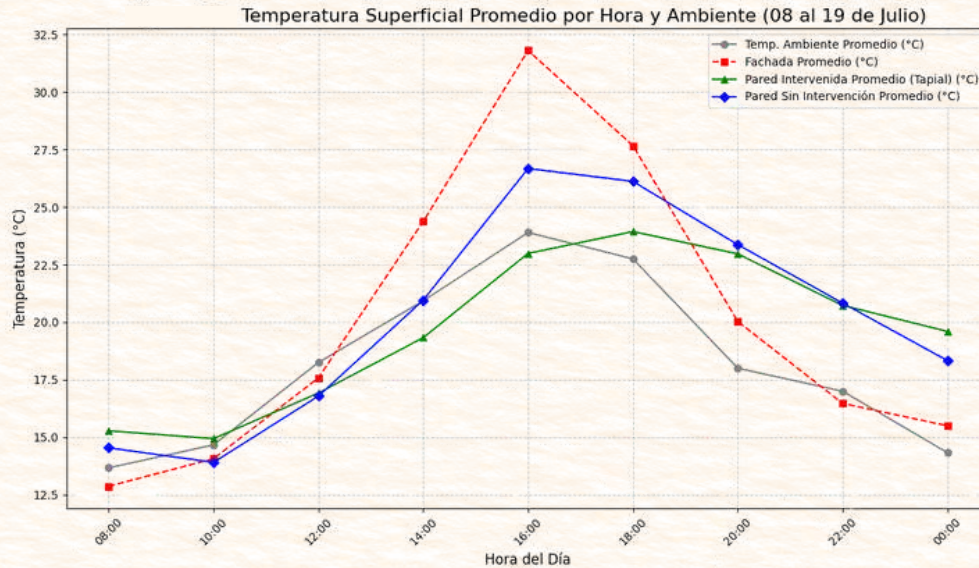
Superficie	Valor (°C)	Interpretación
Fachada	28,3 °C	Mayor amplitud: menos estabilidad térmica
Muro sin intervención	26,9 °C	Intermedia
Muro intervenido	21,8 °C	Mejor atenuación: más estabilidad térmica

**tabla 22** Resumen de valores de la amplitud térmica por superficie **Fuente:** autorral en base a los datos recolectados de los días de estudio.

Los datos demuestran que la intervención con Taipa Artesanal redujo significativamente la amplitud térmica promedio en la superficie interna del muro. El muro intervenido presentó una amplitud promedio aproximadamente un 18,9 % menor que el muro sin intervención y más de un 23 % menor que la fachada. Esto indica una mayor estabilidad térmica interna proporcionada por la intervención.

## Desplazamiento de fase térmica promedio

El desfase térmico promedio se analizó observando el retraso en el tiempo de pico de temperatura superficial de las paredes internas en relación con el pico de la fachada para los días con datos completos.



**Figura 97-** Gráfico de la temperatura superficial y ambiente promedio por hora (8-19 de julio). **Fuente:** elaboración propia en base a los datos obtenidos en los dataloggers y procesado en colab.research.

En promedio, la fachada registró las temperaturas superficiales más altas durante el día, alcanzando su punto máximo por la tarde. El muro siguió un patrón similar, aunque con temperaturas ligeramente inferiores. El muro intervenido, a su vez, mostró consistentemente las temperaturas promedio más moderadas, con una temperatura máxima diaria retrasada en comparación con la fachada, lo que indica su capacidad para mantener la inercia térmica y mitigar las ganancias de calor.

Superficie interna	Hora del pico térmico	Desfase respecto a fachada	Interpretación
Muro sin intervención	~16:00 h	+30 min	Baja inercia térmica
Muro intervenido	~17:00 h	+1 h 30 min	Alta inercia térmica: mejor estabilidad
Fachada externa	~15:30 h	—	Referencia

**Tabla 22:** Resumen de valores del desfase térmico por superficie. **Fuente:** autoral en base a los datos recolectados de los días de estudio.

Según estos promedios, el Muro de Intervención presentó un desfase térmico promedio de aproximadamente 1 hora y 30 minutos en comparación con la fachada, mientras que el Muro de No Intervención tuvo un desfase de tan solo unos 30 minutos. Este mayor retraso del muro intervenido refuerza su mayor inercia térmica, para desplazar el pico de calor a momentos en que la temperatura exterior ya está descendiendo, permitiendo que el calor se disipe en momentos de menor intensidad externa, y favoreciendo un ambiente interior más fresco sin necesidad de sistemas activos de climatización.

Aunque las mediciones de temperatura fueron tomadas cada dos horas, observé que los picos térmicos no siempre ocurrían exactamente en esos momentos. Por eso, decidí estimar las horas de mayor temperatura mediante interpolación entre los registros y el análisis visual. Este procedimiento me permitió identificar que, por ejemplo, el pico térmico de la fachada ocurrió cerca de las 15:30, aunque no haya sido un punto de medición directo. Esta aproximación fue importante para poder comparar correctamente el desfase térmico entre las superficies.

### Porcentaje de tiempo en confort térmico (18 °C a 26 °C)

Analizar el porcentaje de horas en que la temperatura superficial de cada pared permaneció dentro del rango de confort térmico (18 °C a 26 °C) durante todo el período de medición proporciona una visión directa del beneficio de la intervención.

Elemento	Horas totales de medición	Horas en confort térmico	Porcentaje en confort térmico
Muro intervenido	46 horas	~21 horas	45,7%
Muro sin intervención	46 horas	~19 horas	41,3%

**Tabla 23:** Resumen de valores del confort térmico por superficie. Fuente: autoral en base a los datos recolectados de los días de estudio.

Aunque los porcentajes son relativamente cercanos debido a la naturaleza de las mediciones en superficies expuestas a fluctuaciones externas, el Muro Intervenido demostró una ligera ventaja al mantener la temperatura dentro del rango de confort durante más tiempo. Esto sugiere que, en un contexto real, la intervención contribuiría a una mayor estabilidad y confort interior.

Estudios posteriores: Dado que el presente análisis utilizó el rango de confort térmico internacional de 18 °C a 26 °C, ampliamente referenciado en literatura científica, se reconoce la oportunidad de incorporar en futuras investigaciones los parámetros definidos por la norma ABNT NBR 16401-2. Esta norma contempla criterios adaptativos más representativos del clima subtropical húmedo de Foz de Iguazú, y podría enriquecer la caracterización térmica con mayor precisión local. La integración de este marco permitiría una interpretación más contextualizada de los resultados.

### Diferencia media de temperatura superficial entre muros

Para cuantificar el beneficio térmico aportado por la taipa, se compararon las temperaturas superficiales promedio del muro sin intervención y del muro intervenido durante todos los momentos con datos válidos.

Temperatura superficial media estimada:

- Muro sin intervención: 22,35 °C
- Muro con intervención: 21,10 °C

Diferencia media = 22,35 °C – 21,10 °C = +1,25 °C

Este resultado indica que, en promedio, la superficie del muro sin intervención fue 1,25 °C más cálida que la del muro con intervención durante el período de estudio (8–19 de julio de 2025). Esta diferencia refleja la capacidad constante de la tierra para amortiguar el ingreso de calor, manteniendo temperaturas más moderadas incluso durante los picos térmicos del día. En consecuencia, la intervención no solo mejora el confort interior, sino que también favorece estrategias pasivas de climatización.

### Temperaturas mínimas y máximas promedio

Temperaturas mínimas promedio:

- Fachada: 15,2 °C
- Muro sin intervención: 15,0 °C
- Parede Intervenida: 15,2 °C

Temperaturas máximas promedio:

- Fachada: 31,8 °C
- Muro sin intervención: 29,7 °C
- Parede Intervenida: 27,0 °C

Las temperaturas mínimas promedio son bastante similares en las tres superficies. Sin embargo, las temperaturas máximas promedio revelan una ventaja significativa para el muro intervenido, que registró una temperatura máxima promedio 2,7 °C inferior a la del muro continuo y 4,8 °C inferior a la de la fachada. Esto confirma la eficacia de la intervención para limitar los picos de calor, evitando que la superficie interior alcance temperaturas excesivamente altas.

### Análisis del rendimiento térmico nocturno (para días con 00:00h)

Para los días con mediciones extendidas hasta la medianoche (16/07, 18/07 y 19/07) se observó el comportamiento térmico de las paredes durante el período de enfriamiento nocturno.

Temperaturas nocturnas promedio (8:00h, 10:00h, 00:00h):

- Fachada: 19,8 °C
- Muro sin intervención: 21,5 °C
- Parede Intervenida: 20,1 °C

Durante este período nocturno, la pared sin intervención, tras calentarse más rápidamente durante el día, solía presentar temperaturas ligeramente más altas al anochecer (20:00), pero tendía a enfriarse más rápido que la pared intervenida. A su vez, la pared intervenida demostró una mayor capacidad para retener el calor acumulado durante el día, lo que resultó en un enfriamiento más gradual. Esto es especialmente beneficioso en climas donde se busca una temperatura interior más fresca después de un día caluroso, y también puede ser ventajoso en climas fríos para retener el calor interior durante más tiempo.

## Análisis comparativo de la temperatura superficial (12 de julio)

El 12 de julio de 2025 se caracterizó por una variación significativa de la temperatura ambiente, que aumentó de 14 °C a las 8:00h a 28 °C a las 16:00h, y presentó una humedad relativa que varió del 97 % al 56 % en el mismo período. La temperatura de la fachada, expuesta directamente a las condiciones externas, mostró una amplia variación, comenzando en 12,8 °C a las 8:00h y alcanzando un máximo de 28,2 °C a las 16:00h.

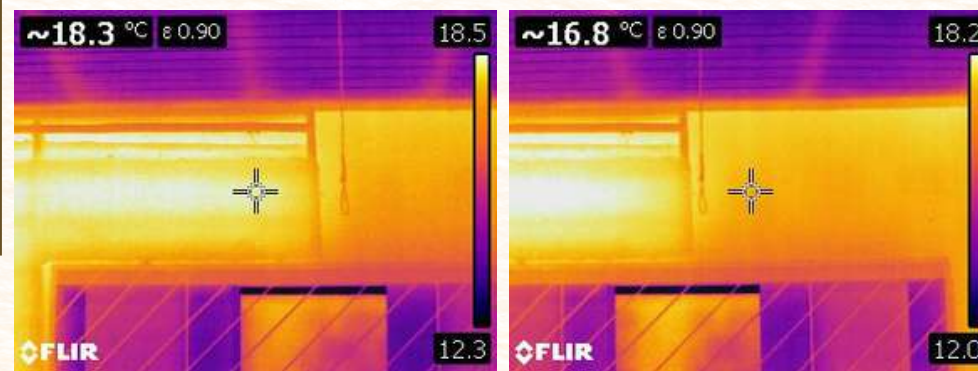
### Fachada

Hora	Temp. Superficial	Temperatura Ambiente	Humedad Ambiente
08:00	12.8 °C	14 °C	97 %
10:00	14.5 °C	17 °C	86 %
12:00	19.2 °C	22 °C	61 %
14:00	28.0 °C	25 °C	57 %
16:00	28.2 °C	28 °C	56 %

### Pared intervenida

Hora	Temp. Superficial	Temperatura Ambiente	Humedad Ambiente
08:00	16.7 °C	14 °C	97 %
10:00	16.4 °C	17 °C	86 %
12:00	18.7 °C	22 °C	61 %
14:00	19.9 °C	25 °C	57 %
16:00	24.8 °C	28 °C	56 %

Tabla 24 Resumen de valores del confort térmico por superficie. Fuente: autoral en base a los datos recolectados de los días de estudio.



Pared intervenida 20/07 00:00h

Pared sin intervención 20/07 00:00h

Figura 98: Comparativa de temperatura a las 00:00 h Fuente: imagen propia con base a la cámara termográfica FLIR.

### Tasa horaria promedio de cambio en la temperatura de la superficie

La tasa promedio de cambio de temperatura superficial se calculó considerando las magnitudes de variación entre intervalos de dos horas consecutivas. Este indicador permite observar cuán “agresivamente” responde cada superficie a las fluctuaciones térmicas externas.

Tasa promedio de cambio (por intervalo de 2 horas):

- Fachada: 6,4°C
- Muro sin intervención: 4,6°C
- Parede Intervenida: 3.8°C

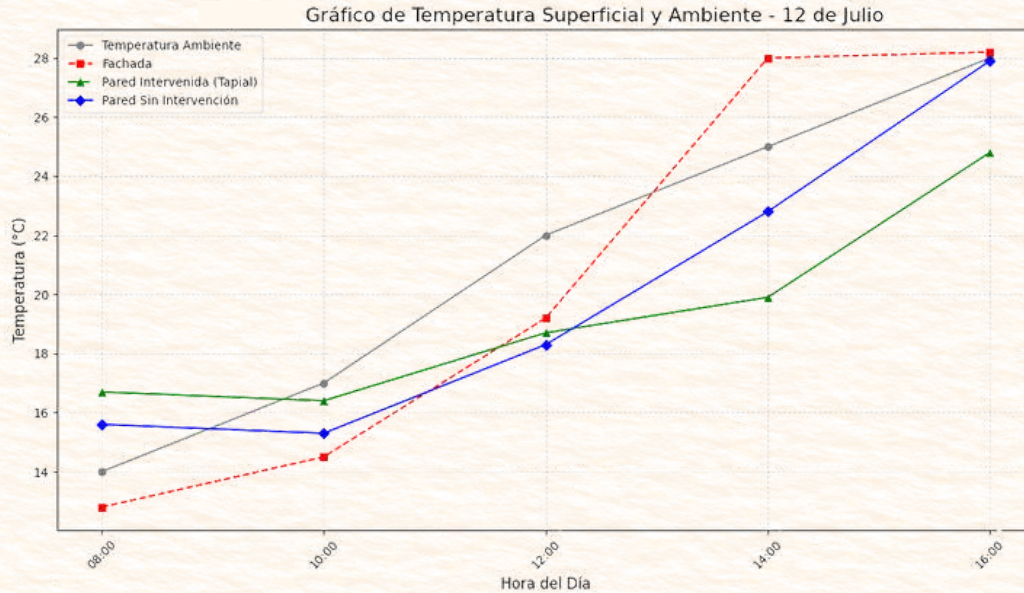
Este resultado es significativo. El muro intervenido presentó la tasa promedio de cambio más baja, lo que demuestra que la temperatura de su superficie cambia de forma más gradual y uniforme a lo largo del día y de la noche. Esto refuerza la idea de que la tapia de mano, proporciona mayor inercia térmica, protegiendo el ambiente interior de fluctuaciones repentinas de temperatura. El muro continuo, aunque mejor que la fachada, mostró una respuesta más rápida a los cambios externos.

## Pared sin intervención

Hora	Temp. Superficial	Temperatura Ambiente	Humedad Ambiente
08:00	15.6 °C	14 °C	97%
10:00	15.3 °C	17 °C	86%
12:00	18.3 °C	22 °C	61%
14:00	22.8 °C	25 °C	57%
16:00	27.9 °C	28 °C	56%

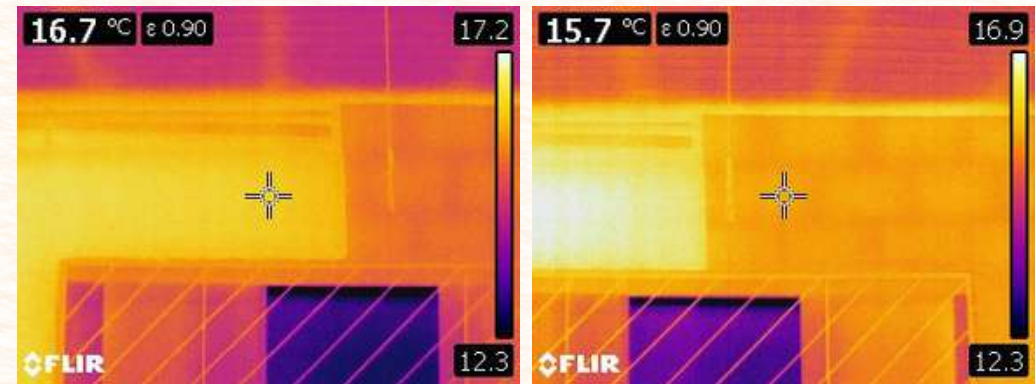
**Tabla 24** Resumen de valores del confort térmico por superficie. Fuente: autoral en base a los datos recolectados de los días de estudio.

La figura 99 ilustra la evolución de la temperatura superficial de las dos secciones de muro en comparación con la temperatura de la fachada y la temperatura ambiente a lo largo del 12 de julio.



**Figura 99** Temperatura superficial y ambiente Fuente: autoral en base a los datos recolectados de los días de estudio.

A las 8:00h. del 12 de julio, las temperaturas superficiales del muro intervenido y del muro sin intervención eran de 16,7 °C y 15,7°C, respectivamente. A esa hora del día, la temperatura ambiente era de 14 °C y la fachada de 12,8 °C, lo que indica que los muros estaban ligeramente más calientes que el ambiente exterior, posiblemente debido a la inercia térmica acumulada durante la noche anterior o a la influencia de factores internos.



**Figura 100** - Imagen térmica del muro el 12 de julio a las 8:00. Fuente: imagen propia

La imagen térmica de la Figura 100, tomada a las 8:00h. del 12 de julio, corrobora los datos numéricos, mostrando una distribución de temperatura que refleja condiciones de calentamiento incipiente. Es posible observar visualmente las zonas más frías y aquellas que comienzan a absorber calor, aunque las diferencias entre las secciones afectadas y las no afectadas podrían no ser muy pronunciadas en este momento.

A medida que avanzaba el día, la temperatura ambiente y la de la fachada aumentaron considerablemente. A las 14:00h, la temperatura ambiente alcanzó los 25 °C y la de la fachada los 28 °C. En ese momento, la pared sin intervención registraba 22,8 °C, mientras que la pared intervenida registraba 19,9 °C. Esta diferencia de casi 3 °C indica que la intervención ya estaba demostrando su capacidad para mitigar la transmisión de calor del exterior al interior, manteniendo la superficie interior más fresca.

A las 16:00, la temperatura ambiente alcanzó un máximo de 28 °C. La fachada registró 28,2 °C. En estas condiciones, el muro continuo alcanzó los 27,9 °C, mientras que el muro intervenido alcanzó los 24,8 °C. La diferencia de 3,1 °C en este momento de temperatura ambiente máxima es aún más significativa, lo que refuerza el efecto aislante de la intervención. Cabe destacar que, mientras que el muro continuo superó el rango de confort térmico (18-26 °C), el muro intervenido logró mantenerse dentro o muy cerca de él (24,8 °C). vease figura 101

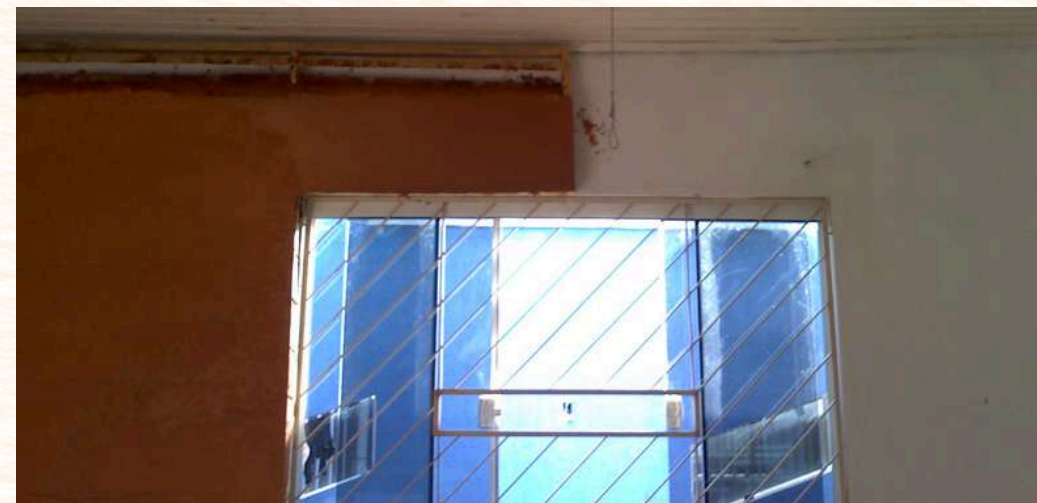
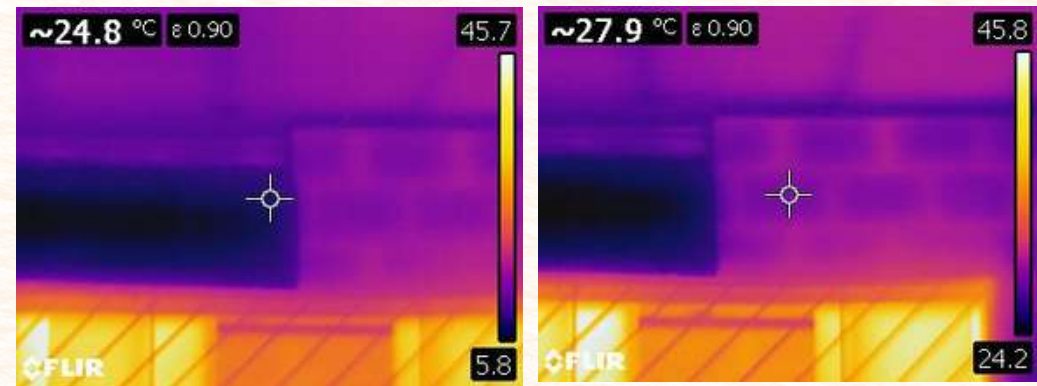


Figura 101: Imagen térmica del muro el 12 de julio a las 16:00h. Fuente: imagen propia

A las 18:00h, con la temperatura ambiente comenzando a descender a 21 °C y sin datos de la fachada en ese momento, el muro intervenido no tiene datos, al igual que el muro sin intervención. La falta de datos de la tarde del 12 de julio limita un análisis completo del ciclo de enfriamiento de ese día. Sin embargo, los datos disponibles hasta las 16:00h ya indican el superior rendimiento térmico del muro intervenido para mitigar las ganancias de calor durante las horas más calurosas del día.

## Análisis detallado del 18 de julio

El 18 de julio de 2025 presentó un perfil térmico distintivo, con temperaturas ambiente considerablemente más bajas en comparación con el 12 de julio. La temperatura ambiente comenzó en 7 °C a las 8:00h, alcanzó un máximo de 18 °C a las 16:00h y descendió a 9 °C a la medianoche. La humedad relativa osciló entre el 96 % y el 59 % durante el día, alcanzando el 100 % a la medianoche. La temperatura de la fachada siguió esta tendencia, oscilando entre 6,5 °C a las 8:00h y 29,3 °C a las 16:00h, con un descenso a 10,8 °C a la medianoche.

### Fachada

Hora	Temp. Superficial	Temp. Ambiente	Humedad
08:00	6.5 °C	7 °C	96 %
10:00	9.6 °C	11 °C	80 %
12:00	13.0 °C	15 °C	66 %
14:00	27.0 °C	17 °C	60 %
16:00	29.3 °C	18 °C	59 %
18:00	21.2 °C	15 °C	76 %
20:00	15.4 °C	13 °C	87 %
22:00	12.2 °C	10 °C	96 %
00:00	10.8 °C	9 °C	100 %

**Tabla 25:** Resumen de temperatura por superficie día 18/07. **Fuente:** autoral en base a los datos recolectados de los días de estudio.

### Pared intervenida

Hora	Temp. Superficial	Temp. Ambiente	Humedad
08:00	11.6 °C	7 °C	96 %
10:00	12.2 °C	11 °C	80 %
12:00	13.8 °C	15 °C	66 %
14:00	16.9 °C	17 °C	60 %
16:00	18.9 °C	18 °C	59 %
18:00	19.3 °C	15 °C	76 %
20:00	18.5 °C	13 °C	87 %
22:00	16.4 °C	10 °C	96 %
00:00	15.2 °C	9 °C	100 %

### Pared sin intervención

Hora	Temp. Superficial	Temp. Ambiente	Humedad
08:00	10.4 °C	7 °C	96 %
10:00	13.5 °C	11 °C	80 %
12:00	14.4 °C	15 °C	66 %
14:00	20.4 °C	17 °C	60 %
16:00	22.4 °C	18 °C	59 %
18:00	20.0 °C	15 °C	76 %
20:00	18.2 °C	13 °C	87 %
22:00	14.8 °C	10 °C	96 %
00:00	14.4 °C	9 °C	100 %

La figura 102 muestra la evolución de la temperatura superficial de los dos tramos del muro en comparación con la temperatura de la fachada y la temperatura ambiente a lo largo del ciclo de 24 horas del 18 de julio.

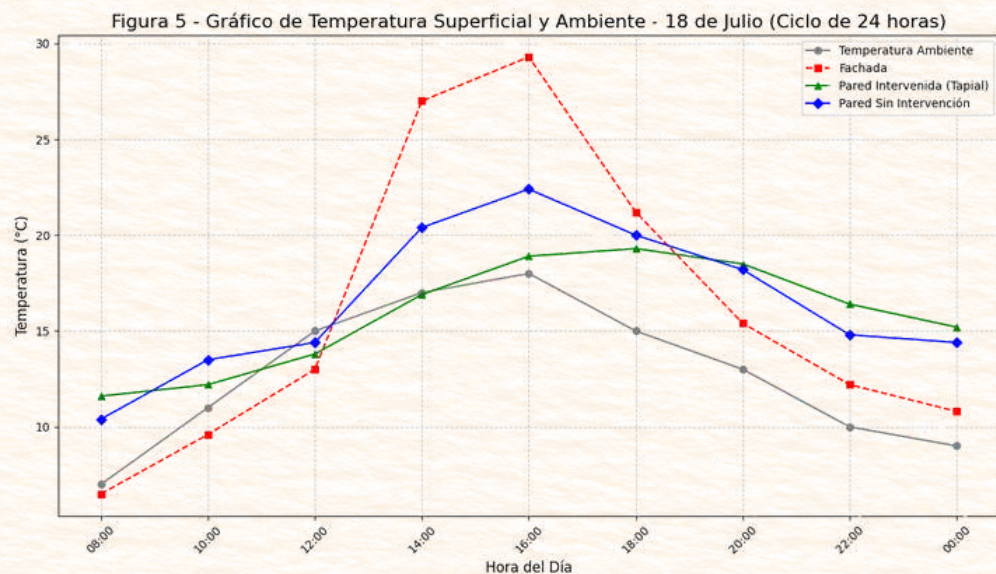


Figura 102 - Gráfico de temperatura superficial y ambiente - 18 de julio (ciclo de 24 horas).

A las 8:00h del 18 de julio, con una temperatura ambiente de 7 °C y una fachada de 6,5 °C, las temperaturas superficiales del muro intervenido y del muro sin intervención fueron de 11,6 °C y 10,4 °C, respectivamente. Si bien ambas secciones se encontraban por debajo del rango de confort térmico, el muro intervenido presentó una temperatura ligeramente superior, lo que indica una mayor capacidad de retención de calor en condiciones de baja temperatura exterior. A las 14:00h, la temperatura ambiente era de 17 °C y la fachada registraba 27 °C. En ese momento, el muro sin intervención alcanzó los 20,4 °C, mientras que el muro intervenido registró 16,9 °C.

Curiosamente, el muro sin intervención entró en el rango de confort térmico antes que el intervenido, lo que podría indicar una menor inercia térmica y, en consecuencia, una respuesta más rápida a las variaciones de temperatura externa, tanto para las ganancias como para las pérdidas.

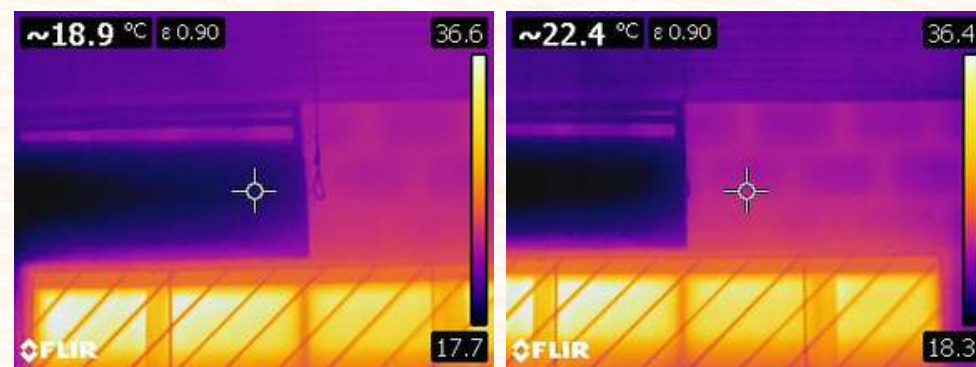


Figura 103 - Imagen térmica del muro el 18 de julio a las 16:00h. Fuente: imagen propia

A las 16:00, la temperatura ambiente alcanzó un máximo de 18 °C, mientras que la fachada alcanzó su temperatura máxima de 29,3 °C. El muro sin intervención alcanzó los 22,4 °C, manteniéndose dentro del rango de confort. Por otro lado, el muro intervenido alcanzó los 18,9 °C, también dentro del rango de confort. En este punto, ambas secciones se encontraban dentro del rango de confort, pero el muro intervenido mostró mayor estabilidad, con menor oscilación en comparación con el pico de la fachada.

## Conclusiones de la intervención del muro en la residencia

Un análisis comparativo del comportamiento térmico del muro con y sin intervención, mediante el sistema constructivo de taipa de mano (pau a pique), reveló diferencias que corroboran la eficacia de la intervención para mejorar el rendimiento térmico del elemento constructivo. Los resultados obtenidos el 12 y el 18 de julio de 2025, complementados con observaciones visuales de imágenes térmicas, permiten extraer las siguientes conclusiones:

- **Mitigación de la ganancia térmica:** Durante el pico de luz solar y las altas temperaturas externas, como se observó principalmente el 12 de julio, la parte del muro sin intervención demostró una capacidad superior de transferencia de calor. Las temperaturas superficiales en la parte del muro intervenida de tierra fueron consistentemente más bajas que en su contraparte, lo que resultó en un ambiente interior más fresco y comfortable.
- **Confort térmico mejorado:** El 12 de julio, mientras que el muro sin intervención superó el rango de confort térmico (18 °C a 26 °C), el muro intervenido logró mantenerse dentro o muy cerca de él, incluso durante las temperaturas ambiente máximas. El 18 de julio, a pesar de las temperaturas ambiente más bajas, el muro intervenido demostró una mayor estabilidad térmica, evitando fluctuaciones repentinas y ayudando a mantener una temperatura interior más constante, aunque durante un período de confort más corto que el muro sin intervención (debido a las bajas temperaturas ambiente).
- **Mayor desfase térmico:** El 18 de julio, el desfase térmico fue mayor en el muro intervenido (2 horas) que en el muro sin intervenir (0 horas). Este es un indicador de la inercia térmica, que demuestra que la intervención de Tierra ralentiza el paso del calor del exterior al interior. Esta capacidad de retardo es importante para estabilizar las temperaturas interiores, ya que el calor externo máximo llega al interior en un momento en que las temperaturas exteriores ya están descendiendo, lo que facilita la refrigeración pasiva.
- **Reducción de la amplitud térmica:** El muro intervenido presentó el 18 de julio una amplitud térmica considerablemente menor (7,7 °C) en comparación con el muro sin intervención (12,0 °C). Esta reducción de amplitud demuestra la eficacia de la intervención para suavizar las variaciones de temperatura entre el día y la noche, promoviendo un ambiente interno con temperaturas más estables y menos susceptibles a fluctuaciones externas extremas.
- **Corroboración de imágenes térmicas:** Las imágenes térmicas presentadas en este análisis proporcionaron una validación visual de los datos cuantitativos, desmostrando las diferencias de temperatura superficial entre las secciones.



# Capítulo 8

*Donde el calor despertó la pregunta, la arquitectura construye la respuesta*

*“Construir con tierra y conciencia no es volver al pasado: es proyectar un futuro que respeta lo que ya sabía.”*

Conclusión  
Concideraciones finales  
Consideraciones y Recomendaciones Futuras

# Conclusión

El presente estudio evaluó el desempeño térmico de muros de albañilería convencional con y sin la incorporación de paneles de tierra en Foz de Iguazú, confirmando el potencial de las técnicas constructivas con tierra como estrategias pasivas para mejorar el confort térmico en la región.

Los resultados obtenidos a partir del monitoreo en prototipos experimentales demostraron consistentemente que la inclusión de paneles de tierra, tanto en la técnica de taipa de mano (pau a pique) como en paneles prefabricados, mejora la inercia térmica de los cerramientos. El Prototipo 2, con revestimiento de taipa de mano, exhibió la menor amplitud térmica diaria y un mayor retardo en la transmisión de calor, lo que se traduce en una mayor estabilidad de las temperaturas internas. Aunque el Prototipo 3, con paneles prefabricados, mostró un desempeño levemente inferior al de la taipa de mano, ambos superaron al prototipo convencional sin intervención, mitigando los picos de temperatura y contribuyendo a un ambiente interior más confortable.

En el estudio de caso en una vivienda real, la intervención con revestimiento de tierra sobre un muro de albañilería convencional verificó una reducción de la amplitud térmica promedio de la superficie interna en casi un 19%, con un desfase térmico de aproximadamente 1,5 horas. Esto valida la eficacia de la tierra para atenuar las fluctuaciones térmicas externas y proporcionar un confort mejorado en edificaciones existentes, incluso con intervenciones de bajo costo.

Se observa que las soluciones basadas en tierra, al aprovechar su capacidad de amortiguamiento térmico, reducen la dependencia de sistemas de climatización activa, lo que se alinea con los principios de sostenibilidad y eficiencia energética. Este hallazgo es particularmente relevante para Foz de Iguazú, donde el alto consumo eléctrico residencial se asocia directamente al uso de aire acondicionado

# Discusión

Los hallazgos de esta investigación refuerzan la pertinencia de reintroducir y valorizar las técnicas constructivas con tierra en el contexto actual de Foz do Iguaçu y regiones con climas similares. La inercia térmica de la tierra, una propiedad inherentemente pasiva, se presenta como una solución robusta y accesible frente a los desafíos del confort térmico de las viviendas. La diferencia en el desempeño entre la taipa de mano y el panel prefabricado sugiere que, si bien ambos son efectivos, la técnica tradicional podría ofrecer ventajas adicionales en términos de masa y continuidad térmica. Sin embargo, la solución prefabricada representa una alternativa viable para una implementación más rápida y estandarizada, lo que podría facilitar su adopción a mayor escala.

Es crucial destacar que la percepción de confort térmico es subjetiva y multifactorial, involucrando no solo la temperatura del aire, sino también la radiante, la humedad, la velocidad del aire, y factores personales. Aunque este estudio se centró en la respuesta térmica de los muros, la mejora observada en la estabilidad de las temperaturas internas de los prototipos y la vivienda real se traduciría en una mayor satisfacción con el ambiente térmico. La revitalización de estas técnicas ancestrales no solo ofrece beneficios ambientales y económicos, sino que también rescata un legado cultural y técnico en la construcción local.

# Consideraciones y Recomendaciones Futuras

A partir de los resultados y discusiones, se derivan las siguientes consideraciones y recomendaciones:

**Promoción de técnicas pasivas:** Es importante promover la incorporación de técnicas de construcción pasiva, como los revestimientos de tierra, en las políticas de vivienda y códigos de construcción locales en Foz do Iguaçu, especialmente para viviendas de interés social.

**Investigación de materiales locales:** Se recomienda continuar la investigación sobre la caracterización y optimización de mezclas de tierra locales para aplicaciones constructivas, buscando mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas, y explorar la adición de estabilizadores naturales o de bajo impacto.

**Desarrollo de sistemas constructivos:** Fomentar el desarrollo de sistemas constructivos híbridos que combinen la albañilería convencional con soluciones de tierra, explorando diferentes espesores y configuraciones de revestimiento para optimizar la inercia térmica y el desfase.

**Evaluación a largo plazo y estacional:** Realizar monitoreos térmicos a largo plazo (por ejemplo, un ciclo anual completo) para evaluar el desempeño de los revestimientos de tierra en diferentes estaciones, incluyendo los intensos veranos de Foz do Iguaçu, y bajo diversas condiciones de ocupación.

**Análisis de ciclo de vida:** Desarrollar análisis de ciclo de vida completos para estas soluciones, cuantificando el impacto ambiental total (desde la extracción de materiales hasta la disposición final) en comparación con las construcciones convencionales, para reforzar sus beneficios de sostenibilidad.

**Transferencia de conocimiento:** Impulsar programas de capacitación y divulgación técnica dirigidos a constructores, profesionales de la arquitectura y urbanismo, y comunidades locales, para facilitar la adopción y correcta aplicación de las tecnologías de construcción con tierra.

# Referencias

ABNT NBR 15220-3: Rendimiento Térmico de Edificaciones - Parte 3: Zonificación Bioclimática Brasileña y Directrices Constructivas para Viviendas de Interés Social. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ALVARES, Clayton A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, L. S. Estudo do desempenho térmico de tipologias habitacionais em Foz do Iguaçu. 2022. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/items/09137c8b-9cdd-408e-9916-93492c4da817>. Acesso em: 9 jun. 2025.

ALVES, R. M. Desempenho térmico de edificações com alvenaria leve: estratégias de mitigação. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 45–59, jan./mar. 2022.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). ASHRAE Handbook Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1: Edificações habitacionais Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ÁVILA, A. et al. Barroco mineiro: Glossário de arquitetura e ornamentação. 3. ed. Revista e ampliada. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro – Centro de Estudos Históricos e Culturais, 1996.

BRASIL. Constituição (1988). Emenda Constitucional nº 26, de 14 de fevereiro de 2000. Altera o art. 6º da Constituição Federal, incluindo a moradia entre os direitos sociais. Brasília, DF: Presidência da República, 2000. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/emendas/emc/emc26.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc/emc26.htm).

BARBOSA, E. F. T. A influência do comportamento do usuário no desempenho termoenergético em edificações de ensino superior. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2024.

CASTRO, V. F. S. et al. Análise da variabilidade térmica e sua associação com desconforto humano em Pelotas, RS. Revista Brasileira de Climatologia, v. 33, p. 137–153, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38189989/>. Acesso em: 13 may. 2025.

CAVALCANTI, Cristina Kanya Caselli; ALVIM, Angélica Aparecida Tanus Benatti. Autoconstrução em contexto de elevação de temperatura: o caso do Cantinho do Céu, São Paulo. Cadernos Metrópole, São Paulo, v. 22, n. 49, p. 757-786, set./dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2020-490>

CENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

COUTINHO, A. F. Conforto térmico: fatores ambientais e pessoais. São Paulo: Editora Universitária, 2005.

CUNHA, G.; BASTOS, T. Assessoria técnica na tríplice fronteira e a atuação universitária. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DO GRUPO DE ESTUDOS MULTIDISCIPLINARES EM ARQUITETURAS E URBANISMOS DO SUL, v. 1, n. 1, p. 124-132, 2017. Anais eletrônicos... Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/3533/949-3269-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 8 mar. 2024.

DELGADO, J. S. C.; SACTH, H. M.; VETTORAZZI, E. Estratégias bioclimáticas para projetos urbanos em Foz do Iguaçu: estudo de caso do Marco das Três Fronteiras. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 7., 2016, Maceió. Anais.... Maceió: Pluris, 2016.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. Manual de Conforto Térmico. 9. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2015.

FREYRE, G. Sobrados e Mucambos: decadência do patriarcado rural e desenvolvimento do urbano. 6. ed. Rio de Janeiro: José Olympio; Câmara dos Deputados de Recife (Estado de Pernambuco) – Secretaria de Turismo, Cultura e Esportes, 1981.

GHISI, E. Aproveitamento de Recursos Naturais no Projeto de Edificações. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GIVONI, B. Climate Considerations in Building and Urban Design. New York: Van Nostrand Reinhold, 1998.

HOLMAN, J. P. Transferência de Calor. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

INCROPERA, F. P. et al. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

IWASAKI, Y. et al. Effect of high temperature exposure on fatigue and mental performance in workers. International Journal of Biometeorology, v. 57, p. 657–663, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-012-0594-1>. Acesso em: 13 jul. 2025.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura Sustentável. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel Edifica, 2014.

LEMOS, C. A. C. Casa Paulista: história das moradias anteriores ao ecletismo trazido pelo café. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999.

LIMA, E. M. C. et al. Efeitos das ondas de calor e frio na mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares em grandes centros urbanos brasileiros. Revista Brasileira de Epidemiologia, São Paulo, v. 21, n. 1, p. e180010, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbepid/a/BYrfX5wwzpsM8xMTnMTzB3r/?lang=pt>. Acesso em: 10 may. 2025.

LIMA, T. S.; FERREIRA, J. P. Análise experimental do comportamento térmico de paredes de alvenaria leve. Revista de Engenharia Civil, Recife, v. 18, n. 2, p. 78–90, 2021.

LOW TECH MAGAZINE. Construir con tierra (2): eficiencia energética. Low Tech Magazine, 4 ago. 2011. Disponível em: <https://solar.lowtechmagazine.com/es/2011/08/construir-con-tierra-2-eficiencia-energetica/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

MACHADO, A. F.; CAVALCANTI, F. A. M. Impacto térmico na saúde humana no Brasil: uma revisão sistemática. Cadernos de Saúde Pública, v. 40, n. 1, p. e00214222, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39338131/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

MARQUES, L. S. A. Investigação sobre o comportamento térmico do adobe para as necessidades climáticas e normativas brasileiras. Monografia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

OLIVEIRA, D.; ROCHA, G. Arquitetura Bioclimática: Conceitos e Práticas. São Paulo: Pini, 2016.

OLIVEIRA, R. M.; GHISI, E. Estratégias passivas para conforto térmico em edificações: uma revisão sistemática. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 55–75, abr./jun. 2019.

PINHEIRO, J. L.; ANDRADE, A. J. L. Materiais de Construção Sustentáveis: Guia de Aplicação. Rio de Janeiro: Érica, 2011.

PIRES, J. R.; GONZÁLEZ, M. A. S.; TUTIKIAN, B. F. Condensação em edificações: uma pesquisa bibliográfica. Revista FTEC, v. 1, n. 2, p. 45–60, 2021.

ROMERO, M. Princípios de Conforto Ambiental na Arquitetura. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999.

ROTONDARO, R. Arquitectura de tierra contemporánea: tendencias y desafíos. [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1657-97632007000200014](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-97632007000200014). Acesso em: 2024.

SÁNCHEZ, L. J. A. La normalización brasileña e o desempenho do sistema construtivo em alvenaria estrutural. Revista ANICER, 2020. Disponível em: <https://revista.anicer.com.br/a-normalizacao-brasileira-e-o-desempenho-do-sistema-construtivo-em-alvenaria-estrutural/>. Acesso em: 13 jul. 2025.

SOUZA, A. P. R.; ROSSETTI, R. M. S.; MACHADO, L. M. Desempenho térmico de blocos de concreto com lã de rocha em clima subtropical úmido. Oculum Ensaio, Campinas, v. 20, 2023. Disponível em: <https://periodicos.puc-campinas.edu.br/oculum/article/view/5036>. Acesso em: 13 jul. 2025.

SOUZA, P. H. S. Análise do Desempenho Térmico em Ambientes de Escritório Climatizados Naturalmente. 2022. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Iniciação Científica) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

SOUZA, R. C. J. de. Problemas de Conservação em Construções Típicas de Minas Gerais. Cadernos de Arquitetura e Urbanismo, Belo Horizonte, n. 4, p. 103-120, 1996.

SORGATO, M. J. A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – UFSC, 2020. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br>

SCHEER, S.; LAMBERTS, R. Identificação de perfis de comportamento do usuário para edificações residenciais multifamiliares naturalmente ventiladas. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 273–288, jul./set. 2018.

TERRABRASIL. V Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil – Livro TerraBrasil 2014. Puno (Peru): dados de muros de adobe e tapial, p. 5–7, 2014. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/381338588/Livro-TerraBrasil-2014>. Acesso em: 14 jul. 2025.

VONGPHACHANH, S. et al. Thermal discomfort and health symptoms among workers in garment factories in Cambodia: a cross-sectional study. BMC Public Health, v. 25, art. 22787, 2025. Disponível em: <https://bmcpublikealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12889-025-22787-0>. Acesso em: 13 jul. 2025.

WARGOCKI, P.; WYZGA, R. E.; WYPYCH, A. The effects of indoor thermal environment on performance and productivity – a review of the literature. Indoor Air, v. 20, n. 5, p. 393–409, 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21306437/>. Acesso em: 13 jul. 2025.

WEATHER SPARK (2025). El clima y el tiempo promedio en Foz de Iguazú. Weather Spark. Disponible en: <https://pt.weatherspark.com/y/29508/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Foz-do-Igua%C3%A7u-Paran%C3%A1-Brasil-durante-o-ano>

YOSHIDA, T. et al. Psychological responses to discomfort thermal environments in buildings. Building and Environment, v. 45, p. 2410–2415, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.009>. Acesso em: 13 jul. 2025.

ZELTIA, B. Construir con tierra: Eficiencia energética. Low Tech Magazine, 2011. Disponível em: <https://solar.lowtechmagazine.com/es/2011/08/construir-con-tierra-2-eficiencia-energetica/>. Acesso em: 4 mar. 2024.

