

6

ARTICULO DE INVESTIGACIÓN

PRINCIPIOS DE ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA PARA LA MITIGACIÓN DEL CALOR EXTREMO EN EL CHACO TARIJEÑO

Principles of Bioclimatic Architecture for the Mitigation of
extreme heat in the Chaco Region of Tarija

Fecha de recepción: 13/05/2026 | Fecha de aceptación: 29/05/2026

Autor(es):

¹ Bertha Benítez Reinoso

¹ Investigadora

¹ Correspondencia del autor(es): bertha.benitez.reinoso@gmail.com



Principios de Arquitectura Bioclimática para la Mitigación del calor extremo en el Chaco Tarijeño

Principles of Bioclimatic Architecture for the Mitigation of extreme heat in the Chaco Region of Tarija

RESUMEN

El cambio climático global ha exacerbado los fenómenos térmicos extremos, consolidando al periodo reciente (2023-2025) con los registros de temperatura más altos de la historia. En este escenario, el sector de la edificación global ejerce una presión ambiental crítica al aportar el 39% de las emisiones de CO₂. La presente investigación evalúa el desempeño térmico de las envolventes habitacionales en la región del Chaco Tarijeño (Yacuiba, Villamontes y Caraparí), un área caracterizada por un clima semiárido con fluctuaciones que superan los 40 °C. Mediante un enfoque mixto que incluyó mediciones termohigrométricas *in situ* durante el año 2025 y simulaciones basadas en las propiedades de los materiales locales, se evidenció que el 90% de las viviendas actuales emplean materiales industrializados ineficientes (ladrillo de seis huecos y cubiertas de calamina) que anulan el confort térmico interior (13.2 °C a 36.6 °C). A partir de estos hallazgos, y fundamentado en los modelos de Szokolay y Givoni, se proponen principios de diseño pasivo orientados al control de la envolvente, inercia térmica selectiva y ventilación cruzada nocturna. Se concluye la necesidad urgente de una reforma normativa local fundamentada en la norma boliviana NB 1211001 para mitigar la huella de carbono operacional y garantizar la habitabilidad regional.

Abstract

Global climate change has exacerbated extreme thermal phenomena, establishing the recent period (2023–2025) as the phase with the highest recorded temperatures in history. Within this scenario, the global building sector exerts critical environmental pressure, accounting for 39% of global CO₂ emissions. This research evaluates the thermal performance of residential building envelopes in the Chaco Tarijeño region (Yacuiba, Villamontes, and Caraparí), an area characterized by a semi-arid climate with temperature fluctuations exceeding 40 °C. Utilizing a mixed-method approach that included *in situ* thermohygrometric measurements during the year 2025 and simulations based on the properties of local materials, the evidence demonstrated that 90% of current dwellings utilize inefficient industrialized materials (six-hole brick and corrugated galvanized iron roofing) that compromise indoor thermal comfort (13.2 °C to 36.6 °C). Based on these findings, and grounded in the Szokolay and Givoni bioclimatic models, passive design principles are proposed, focusing on building envelope control, selective thermal inertia, and nocturnal cross-ventilation. The study concludes that there is an urgent need for a local regulatory reform aligned with the Bolivian standard NB 1211001 to mitigate the operational carbon footprint and guarantee regional habitability.

Palabras Claves: Arquitectura bioclimática, Confort térmico, Desfase térmico, Chaco Tarijeño, Materiales de envolvente

Keywords: Bioclimatic architecture, Thermal comfort, Thermal lag, Chaco Tarijeño, Building envelope materials.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático global, impulsado por actividades antrópicas, ha elevado significativamente la temperatura media y exacerbado los fenómenos climáticos extremos a nivel mundial. Datos actualizados al año 2026 emitidos por organismos internacionales como el IPCC, la NASA y la OMM confirman que el periodo 2023-2025 registró las temperaturas más altas de la historia documentada; el año 2025 se consolidó formalmente como el tercer año más cálido registrado, aproximando al planeta al límite crítico de 1.5 °C de calentamiento respecto a los niveles preindustriales. En este contexto, las emisiones anuales de gases de efecto invernadero están alcanzando concentraciones históricas de CO₂, CH₄ y N₂O. De acuerdo con el último informe de la Alianza Global para los Edificios y la Construcción (Global ABC) del PNUMA, el sector de la construcción es responsable del 39% de las emisiones globales de CO₂.

En Bolivia, la expansión urbana del eje central (Santa Cruz, La Paz y El Alto) muestra una tendencia ascendente en los impactos ambientales del sector. La investigación de la Universidad UNIFRANZ (2023) señala que la industria del cemento aporta el 5% de las emisiones totales de CO₂ del país, mientras que el transporte de materiales representa entre el 6% y 8% del impacto de los proyectos constructivos en dichas urbes. En el departamento de Tarija, y específicamente en la Región del Gran Chaco (Yacuiba, Villamontes y Caraparí), la obtención de datos desagregados es compleja debido a la centralización de inventarios. Sin embargo, la manufactura de materiales regionales (ladrillo y cemento) mediante hornos de gas natural representa entre el 10% y 12% de las emisiones industriales departamentales. Asimismo, la escala de la infraestructura vial e hidrocarbúfera modifica el perfil de la región; la construcción de campos de explotación de gas genera picos de emisiones y el transporte desde Santa Cruz añade una

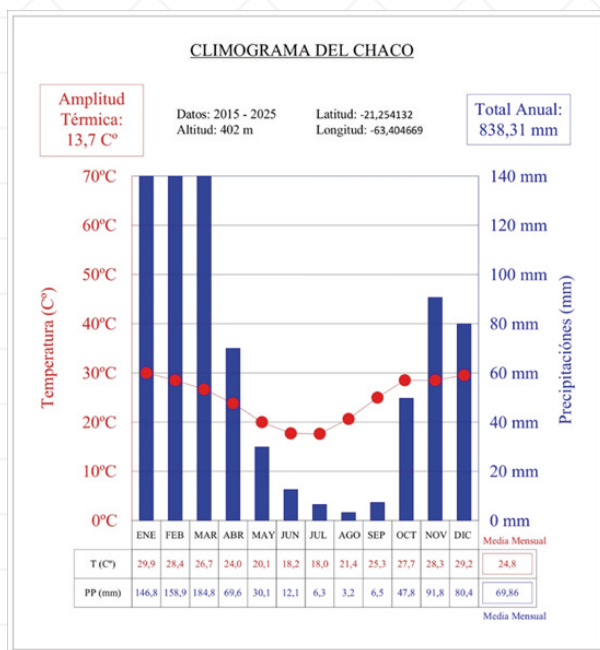
huella logística un 15% superior al promedio nacional por restricciones geográficas.

A nivel de vivienda formal, el impacto térmico en el Chaco boliviano es severo, enfrentando temperaturas extremas de hasta 40 °C. Las edificaciones modernas omiten el uso de materiales aislantes, lo que dispara las emisiones operacionales debido al uso intensivo de sistemas mecánicos de aire acondicionado. Existe un conflicto latente entre estas nuevas técnicas constructivas y la arquitectura vernácula tradicional. La modernización ha impuesto el uso generalizado de cemento y chapas metálicas, incrementando los residuos, mermando la eficiencia energética y degradando el confort térmico interior.

Frente a esta problemática, la presente investigación busca incentivar la arquitectura bioclimática como una solución sostenible y adaptada al contexto local de la región. Como base teórica fundamental, Olgyay (1963) postula a la edificación como un “filtro ambiental dinámico” que media entre las variables macroclimáticas y los requerimientos fisiológicos humanos, buscando el equilibrio térmico mediante mecanismos pasivos. Asimismo, Givoni (1969) corrobora la relación intrínseca entre el confort, el clima y la arquitectura mediante el uso del diagrama psicrométrico para trazar zonas de confort higrotérmico específicas. El *objetivo principal* de este estudio es desarrollar pautas de diseño arquitectónico bioclimático y mapas climáticos para la vivienda residencial del Chaco Tarijeño, evaluando la viabilidad de la inercia térmica y los sistemas pasivos para alcanzar el confort térmico sin dependencia energética artificial.

2. METODOLOGÍA

La investigación es de tipo descriptivo, analítico y experimental. El procedimiento metodológico se estructuró en tres fases principales:



1. **Recopilación y Análisis Climatológico:** Se analizaron los datos de las variables climáticas clave (temperatura, radiación solar, vientos y humedad relativa) de los últimos 10 años, con especial énfasis en las anomalías del año 2023 a 2025. Las fuentes de datos oficiales correspondieron al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y al Centro de Monitoreo Agroclimático de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UA-JMS).

Resultados según el clasificador climático de Köppen:

- ▶ Clima tipo BWh
 - ▶ Seco árido cálido (BWh)
 - ▶ La temperatura media anual está por encima de los 18 °C. En este caso es de 24.8 °C
2. **Estudios de Caso e Instrumentación *In Situ*:** Se seleccionó una muestra de 15 viviendas existentes distribuidas en los municipios de Villa Montes, Yacuibá y Caraparí. En cada inmueble se realizaron

levantamientos técnicos de la envolvente (muros, pisos y techos) y se aplicaron encuestas y entrevistas semiestructuradas a los habitantes para evaluar la percepción de la habitabilidad. Las mediciones cuantitativas de temperatura interior (T°) y humedad relativa ($H\%$) se registraron directamente en campo utilizando un termohigrómetro calibrado durante las dos estaciones más extremas (invierno y verano) en horarios fijos (10:00 a. m. y 14:00 p. m.).

3. **Modelación Termofísica:** Para evaluar el comportamiento de los materiales y el desfase térmico (U y λ), se aplicaron las ecuaciones de transferencia de calor y difusividad térmica basadas en la metodología de Szokolay (2004) y los parámetros estipulados para la Zona Cálida Seca dentro de la Norma Boliviana NB 1211001 de Eficiencia Energética en Edificaciones.

La difusividad térmica (α), componente crítico para calcular la velocidad de la onda de calor a través de la masa del muro, se determinó mediante la siguiente expresión matemática:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

Donde:

λ : Conductividad térmica del material ($W/m \cdot K$).

ρ : Densidad del material (kg/m^3).

c_p : Calor específico del material ($J/kg \cdot K$).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización Técnica de las Envolventes Locales

El levantamiento físico en los tres municipios evidenció una homogeneidad crítica en la selección de componentes constructivos. El 90% de las viviendas visitadas emplean mampostería de ladrillo industrializado con mortero de cemento y cubiertas de chapa metálica (calamina), catalogadas como poco adecuadas para las condiciones del sitio.

Tabla 1. Matriz de componentes de envolvente en viviendas de la muestra.

MUESTRA	ITEM/MATERIAL ENVOLVENTE			MUNICIPIO
	Muro	Piso	Techo	
VIVIENDA 1	Ladrillo Gambote	Cemento	Calamina	Villamontes
VIVIENDA 2	Ladrillo 6H	Cerámica	Calamina	Villamontes
VIVIENDA 3	Adobe	Cemento	Calamina	Villamontes
VIVIENDA 4	Ladrillo Gambote	Cemento	Losa H°A°	Villamontes
VIVIENDA 5	Ladrillo 6H	Cemento	Calamina	Villamontes
VIVIENDA 6	Ladrillo 6H	Cerámica	Calamina	Yacuiba
VIVIENDA 7	Ladrillo 6H	Mosaico	Calamina	Yacuiba
VIVIENDA 8	Ladrillo 6H	Cerámica	Losa H°A°	Yacuiba
VIVIENDA 9	Ladrillo 6H	Cerámica	Teja	Yacuiba
VIVIENDA 10	Ladrillo Gambote	Cemento	Calamina	Yacuiba
VIVIENDA 11	Ladrillo 6H	Cemento	Calamina	Caraparí
VIVIENDA 12	Ladrillo 6H	Ladrillo Gambote	Calamina	Caraparí
VIVIENDA 13	Adobe	Cemento	Calamina	Caraparí
VIVIENDA 14	Ladrillo 6H	Cerámica	Teja	Caraparí
VIVIENDA 15	Ladrillo 6H	Cerámica	Calamina	Caraparí

3.2. Monitoreo Higrotérmico Estacional

Las mediciones físicas revelaron un desfase generalizado respecto al estándar internacional de confort humano, el cual se sitúa normativamente en torno a los 22 °C. En invierno se registraron mínimas interiores de 13.2 °C, mientras que en la temporada estival de 2025 las temperaturas en el interior de los espacios habitables escalaron hasta los 36.6 °C. Las entrevistas asociadas expusieron que, debido al almacenamiento térmico incontrolado, las familias se ven obligadas a evacuar las habitaciones hacia patios o vías públicas a partir de las 19:00 horas, denotando la ausencia de confort tanto diurno como nocturno.

Tabla 2. Registro termohigrométrico in situ por muestra y municipio.

Municipio	Muestra	Variables	Invierno (10:00)	Invierno (14:00)	Verano (10:00)	Verano (14:00)
Villamontes	M - 1	T° / H%	16.6 °C/42%	17.7 °C/41%	31.1 °C/44%	33.6 °C/42%
Villamontes	M - 2	T° / H%	13.2 °C/ 6%	17.0 °C/42%	31.7 °C/38%	35.5 °C/40%
Villamontes	M - 3	T° / H%	16.2 °C/38%	18.5 °C/37%	29.7 °C/44%	32.0 °C/42%
Villamontes	M - 4	T° / H%	13.7 °C/44%	17.6 °C/34%	27.2 °C/43%	31.1 °C/40%
Villamontes	M - 5	T° / H%	15.6 °C/40%	20.8 °C/36%	30.1 °C/42%	36.3 °C/38%
Yacuiba	M - 6	T° / H%	15.2 °C/38%	17.5 °C/35%	30.7 °C/42%	34.0 °C/38%
Yacuiba	M - 7	T° / H%	13.2 °C/46%	17.0 °C/42%	29.7 °C/44%	34.5 °C/40%
Yacuiba	M - 8	T° / H%	16.4 °C/38%	18.1 °C/39%	30.9 °C/42%	33.6 °C/40%
Yacuiba	M - 9	T° / H%	15.2 °C/38%	17.5 °C/35%	30.7 °C/42%	34.0 °C/38%
Yacuiba	M - 10	T° / H%	13.7 °C/44%	17.6 °C/34%	31.2 °C/42%	35.1 °C/36%
Caraparí	M - 11	T° / H%	15.6 °C/40%	20.8 °C/36%	31.1 °C/42%	36.3 °C/38%
Caraparí	M - 12	T° / H%	16.4 °C/38%	18.1 °C/39%	31.9 °C/42%	34.6 °C/40%
Caraparí	M - 13	T° / H%	20.6 °C/50%	21.1 °C/51%	34.1 °C/48%	36.6 °C/46%
Caraparí	M - 14	T° / H%	13.2 °C/46%	17.0 °C/42%	30.7 °C/44%	34.5 °C/40%
Caraparí	M - 15	T° / H%	15.2 °C/38%	17.5 °C/35%	31.7 °C/42%	34.0 °C/38%

3.3. Comportamiento Termofísico de Materiales Locales

Los cálculos basados en la física de la edificación determinaron que los materiales tradicionales vernáculos, como el adobe estabilizado y los bloques de tierra comprimida (BTC), exhiben una difusividad térmica baja. Esto se traduce de forma directa en una alta capacidad de desfase y amortiguamiento de la onda de calor diurna, superando ampliamente las deficiencias del hormigón armado y del ladrillo tradicional.

Tabla 3. Análisis comparativo de desfase térmico en cerramientos exteriores.

Material	Espesor sugerido	Desfase estimado	Difusividad térmica (α)
Ladrillo macizo (gambote)	24 cm	6.5 a 7 horas	Moderada
Adobe estabilizado con cal	30 cm	9 a 10 horas	Baja (mejor para desfase)
Hormigón Armado	20 cm	5 horas (insuficiente sin aislante)	Alta
Bloque de tierra comprimida BTC	25 cm	8.5 horas	Baja (mejor para desfase)

3.4. Análisis de Simulación Térmica Dinámica de la Vivienda

3.4.1. Configuración del Modelo y Protocolo de Simulación

Para la evaluación del comportamiento térmico y la eficiencia energética de la vivienda de Bloque de Tierra Comprimida (BTC), se desarrolló un modelo de simulación dinámica multi-zona. El flujo de trabajo se estructuró en el entorno de diseño asistido Rhinoceros 3D® y su editor de algoritmos paramétricos Grasshopper®.

Como puente de conexión ambiental, se utilizaron los complementos de código abierto Ladybug Tools (específicamente el componente Honeybee), los cuales permiten parametrizar los materiales, perfiles de ocupación, ganancias internas y condiciones climáticas locales del Chaco a partir del archivo meteorológico (EPW).

Finalmente, el procesamiento analítico y la resolución de las ecuaciones diferenciales de transferencia de calor se ejecutaron a través del motor de cálculo EnergyPlus™ (desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, DOE). Este motor garantiza un análisis térmico transitorio con intervalos de tiempo horarios, validando científicamente los resultados de temperatura interna y comportamiento de la envolvente opaca presentados en esta investigación.

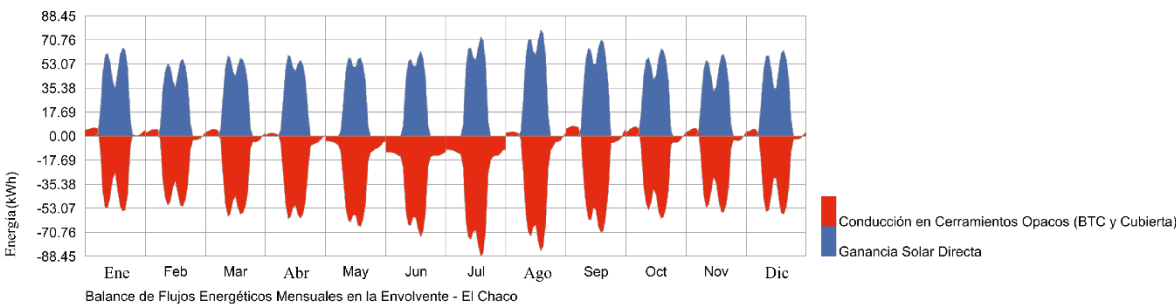
Ficha Técnica 1 y Metadatos Climáticos del Modelo

	Valor
Versión y Compilación del Software	EnergyPlus, Version 25.1.0-1c11a3d85f (Fecha: 25.05.2026)
Período de Ejecución	PERÍODO DE SIMULACIÓN 1
Archivo Meteorológico de Referencia	Yacuiba.AP TR BOL SRC-TMYx WMO#=853650
Latitud [°]	-22.0° (Sur)
Longitud [°]	-63.7° (Oeste)
Altitud sobre el Nivel del Mar [m]	645.00 m
Zona Horaria	-4.0 (GMT-4 / Hora de Bolivia)
Ángulo del Eje Norte [°]	0.00° (Orientación Norte Real)
Rotación para Apéndice G [°]	0.00° (Línea base sin rotación)
Horas Totales Simuladas [h]	8,760.00 h (Año completo continuo)

3.4.2. Balance Térmico General de la Edificación

El siguiente grafico se procesó en kWh para analizar la sensibilidad mensual detallada mientras que en la tabla los datos están expresados originalmente en Gigajulios [GJ], que es la unidad métrica internacional utilizada por el motor de cálculo EnergyPlus para balances anuales consolidados.

Análisis Anual de Componentes de Ganancia y Pérdida de Calor



La Figura expone el balance dinámico mensual de los flujos térmicos de la edificación, expresado en kilovatios-hora (kWh). En el eje de las ordenadas, los valores positivos representan las ganancias de calor hacia el espacio interior, mientras que los valores negativos cuantifican las pérdidas térmicas hacia el ambiente exterior. El gráfico demuestra un acoplamiento estacional eficiente y adaptado al clima del Chaco. Durante el periodo invernal (junio y julio), se maximiza la “Ganancia Solar Directa” a través de las superficies vidriadas debi-

do a la menor altura angular del sol, lo que provee una fuente pasiva de calefacción en las horas críticas. En contraparte, los flujos por “Conducción en Cerramientos Opacos” (muros de BTC y cubierta) se mantienen en rangos altamente controlados tanto en el cuadrante positivo (verano) como en el negativo (invierno). Esto evidencia la elevada capacidad de amortiguamiento y la alta inercia térmica de la mampostería de tierra comprimida, la cual estabiliza el microclima interno de forma 100% pasiva.

Tabla 4 Desglose Numérico de Cargas Térmicas Sensibles

Annual Building Sensible Heat Gain Components

	HVAC Zone Eq & Other Sensible Air Heating [GJ]	HVAC Zone Eq & Other Sensible Air Cooling [GJ]	HVAC Terminal Unit Sensible Air Heating [GJ]	HVAC Terminal Unit Sensible Air Cooling [GJ]	HVAC Input Heated Surface Heating [GJ]	HVAC Input Cooled Surface Cooling [GJ]	People Sensible Heat Addition [GJ]	Lights Sensible Heat Addition [GJ]	Equipment Sensible Heat Addition [GJ]	Window Heat Addition [GJ]	Interzone Air Transfer Heat Addition [GJ]	Infiltration Heat Addition [GJ]	Opaque Surface Conduction and Other Heat Addition [GJ]	Equipment Sensible Heat Removal [GJ]	Window Heat Removal [GJ]	Interzone Air Transfer Heat Removal [GJ]	Infiltration Heat Removal [GJ]	Opaque Surface Conduction and Other Heat Removal [GJ]
ROOM_10_2256392B	4.624	-5.590	0.000	0.000	0.000	0.000	0.693	0.438	2.214	11.295	0.000	3.224	0.000	0.000	-0.903	0.000	-6.038	-9.956
ROOM_11_626C32D3	2.923	-2.799	0.000	0.000	0.000	0.000	0.260	0.164	0.830	4.326	0.000	1.735	0.000	0.000	-0.542	0.000	-3.149	-3.748
ROOM_12_F549328D	7.393	-7.608	0.000	0.000	0.000	0.000	0.880	0.554	2.802	14.034	0.000	4.621	0.000	0.000	-1.280	0.000	-8.458	-12.937
Total Facility	14.940	-15.997	0.000	0.000	0.000	0.000	1.832	1.155	5.847	29.655	0.000	9.579	0.001	0.000	-2.725	0.000	-17.646	-26.641

La Tabla consolida los datos acumulados anuales expresados en Gigajulios (GJ), extraídos directamente del reporte normativo de EnergyPlus (Sensible Heat Gain Summary) para los tres ambientes analizados (Room 10, 11 y 12, números asignados aleatoriamente por el programa para identificar los 3 ambientes de los que se compone la geometría de una vivienda básica). Para garantizar la transparencia y validez metodológica en el uso del software, la auditoría térmica se centra en los dos componentes principales de la envolvente, los cuales se desglosan en tres columnas algorítmicas. Primero, la columna *Window Heat Addition [GJ]* (Ganancia Térmica por Superficies Vidriadas) mapea el impacto radiativo que ingresa por las ventanas. Segundo, el comportamiento de la mampostería de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) y cubierta se audita mediante dos columnas complementarias: **Opaque Surface Conduction and Other Heat Addition [GJ]** (para las ganancias por conducción) y *Opaque Surface Conduction and Other Heat Removal [GJ]* (para las pérdidas por conducción). Los datos demuestran un comportamiento térmico homogéneo y equilibrado entre las tres habitaciones; la estabilidad conductiva del BTC evita desbalances o picos de sobrecalentamiento focalizados,

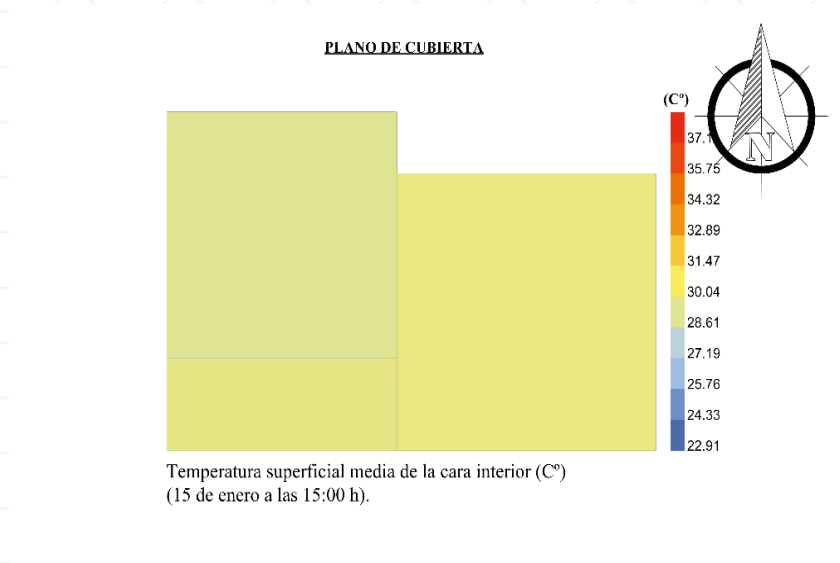
validando la eficiencia global del diseño arquitectónico.>

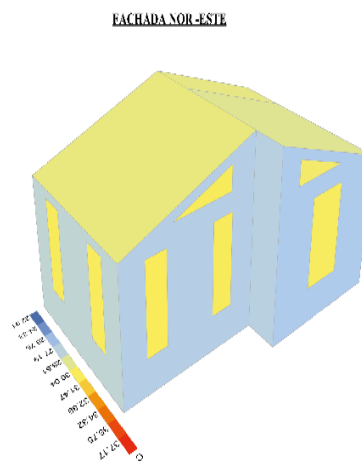
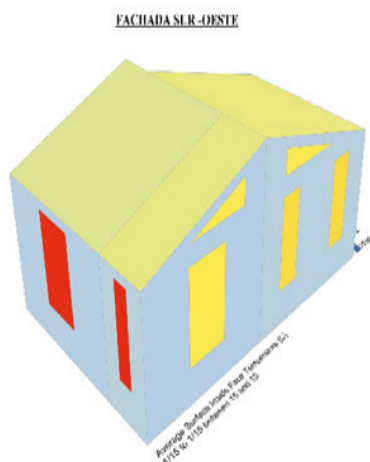
3.4.3. Comportamiento Térmico Superficial en Periodos Críticos

Para evaluar el comportamiento térmico interior de la vivienda en El Chaco, se generó un mapeo tridimensional utilizando el motor de simulación Honeybee y EnergyPlus. Es fundamental precisar que, aunque la visualización se presenta sobre la volumetría exterior del edificio para facilitar la comprensión arquitectónica global, los gradientes de color representan estrictamente la variable *Surface Inside Face Temperature* (Temperatura de la Cara Interna de la Superficie).

Es decir, el gráfico no muestra el impacto del sol directo sobre la fachada exterior, sino la temperatura real radiante que adquiere el muro de BTC por el lado de adentro, estando en contacto directo con el usuario. Con esto se demuestra la capacidad de inercia térmica del BTC: permite observar tridimensionalmente cómo el espesor y la masa térmica del material logran amortiguar y retrasar la penetración de la onda de calor externa hacia los espacios habitables interiores durante los momentos críticos del año.

3.4.4. Evaluación de Desempeño y Respuesta Térmica en Verano (15 de enero, 15:00 has)





El análisis del periodo crítico de verano, evaluado el 15 de enero a las 15:00 h, representa el momento de máxima exigencia climática en Yacuiba, registrando un límite térmico superior en el modelo de 37.17 °C. Bajo estas condiciones de riguroso calor exterior, el comportamiento cromático de la edificación evidencia la alta eficiencia por amortiguamiento de la envolvente diseñada:

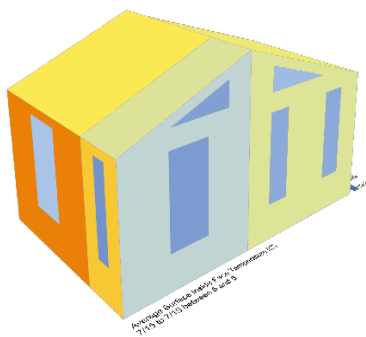
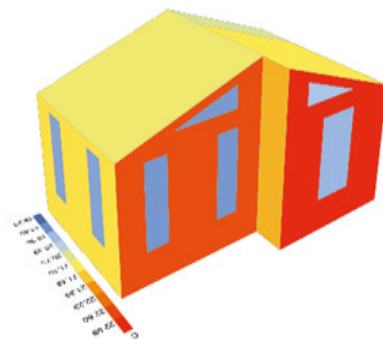
Inercia Térmica de la Envolvente de BTC: De manera generalizada, la totalidad de la envolvente opaca exterior (muros) se estabiliza en tonalidades celestes, situándose muy cerca del rango mínimo de la escala (22.91 °C). La fachada norte y los paramentos expuestos al recorrido solar directo exhiben un celeste ligeramente más marcado que la fachada posterior sur. Este fenómeno visual es la comprobación científica del amortiguamiento térmico del Bloque de Tierra Comprimida (BTC); gracias a su elevada masa térmica, los muros actúan como un escudo que ralentiza y frena el ingreso de la onda de calor diurna, manteniendo las superficies interiores frescas y desfasadas del pico de temperatura exterior.

Respuesta de Vanos y Cubierta: Los componentes acristalados de la edificación revelan un comportamiento térmico diferenciado según su orientación y exposición directa en el horario crítico de análisis (15:00 h). De manera particular, los vanos ubicados en la fachada oeste se registran en tonalidades rojas intensas, alcanzando los picos más elevados del espectro del modelo (próximos a los 37.17 °C). Este fenómeno responde a que, a mitad de la tarde estival, el azimut solar se desplaza hacia el oeste, haciendo que la radiación directa incida con máxima intensidad sobre este paramento; al carecer el vidrio de inercia térmica, el componente experimenta un calentamiento inmediato por radiación directa de onda corta. En contraste, las ventanas de las orientaciones restantes exhiben tonos amarillos fuertes, vinculados únicamente a la ganancia por conducción del aire ambiental y radiación difusa. Por último, la cubierta se manifiesta en un amarillo más suave, lo que demuestra que, a pesar de su exposición horizontal continua a la radiación cenital del mediodía, la transferencia calórica hacia el interior se encuentra eficazmente atenuada y controlada por las propiedades físicas de su composición material.

Evaluación de Desempeño y Respuesta Térmica en Invierno (15 de Julio, 05:00 has)

PLANO DE CUBIERTA

Temperatura superficial media de la cara interior (C°)
(15 de julio a las 05:00 h).

FACHADA SUR-OFESTEFACHADA NOR-ESTE

El escenario crítico de invierno se analizó el 15 de julio a las 05:00 AM, el horario nocturno más frío del año. La simulación revela un comportamiento interno altamente confortable y homogéneo, operando en un ran-

go estrecho y controlado entre los 19.23 °C (mínima en azul) y los 22.98 °C (máxima en rojo). Los colores del modelo explican de forma directa el fenómeno de conservación pasiva de energía:

1. **Fenómeno de Desfase Térmico en Fachada Norte:** La fachada norte se visualiza por completo en color rojo, alcanzando el pico máximo de la escala interna (22.98 °C). En la latitud -22.0° Sur, el sol de invierno mantiene una trayectoria baja y oblicua, incidiendo perpendicularmente sobre el norte durante todo el día previo. El BTC absorbió esa radiación solar y, en virtud de su *desfase térmico* (retardo de la onda de calor de aproximadamente 10 a 12 horas), libera ese calor latente hacia el interior del ambiente precisamente a las 05:00 AM, cuando el exterior se encuentra en su punto más crítico. Las fachadas laterales acompañan este comportamiento en tonos amarillos (con transiciones naranjas en

el oeste debido a la acumulación solar del atardecer), mientras que la fachada sur —que no recibe sol directo— se mantiene estable en la gama de amarillos y celestes suaves.

2. **Comportamiento de Ventanas y Cubierta:** En un comportamiento diametralmente opuesto al de verano, las ventanas se pintan de color celeste (el rango más bajo de este escenario). Al ser elementos no masivos, pierden calor rápidamente hacia el exterior por radiación de onda larga durante la madrugada. Por su parte, la cubierta mantiene tonalidades amarillas, confirmando una retención térmica aceptable que evita la fuga acelerada de la energía acumulada en el espacio habitable.

Tabla 5 Propiedades Termofísicas y Transmitancia de la Envolvente Opaca



Opaque Exterior

	Construction	Zone	Space	Reflectance	U-Factor with Film [W/m2-K]	U-Factor no Film [W/m2-K]	Gross Area [m2]	Net Area [m2]	Azimuth [deg]	Tilt [deg]	Cardinal Direction
ROOM_1_CE08D1E9_FACE0	MURO BTC 30CM	ROOM_1_CE08D1E9	ROOM_1_CE08D1E9_SPACE	0.40	1.429	1.818	12.00	9.60	270.00	90.00	W
ROOM_1_CE08D1E9_FACE2	MURO BTC 30CM	ROOM_1_CE08D1E9	ROOM_1_CE08D1E9_SPACE	0.40	1.429	1.818	16.80	13.44	90.00	90.00	E
ROOM_1_CE08D1E9_FACE5	MURO BTC 30CM	ROOM_1_CE08D1E9	ROOM_1_CE08D1E9_SPACE	0.40	1.429	1.818	14.40	11.52	0.00	90.00	N
ROOM_1_CE08D1E9_FACE3	PISO CERMICA	ROOM_1_CE08D1E9	ROOM_1_CE08D1E9_SPACE	0.30	3.624	8.779	16.00	16.00	0.00	180.00	
ROOM_1_CE08D1E9_FACE4	CUBIERTA TEJA	ROOM_1_CE08D1E9	ROOM_1_CE08D1E9_SPACE	0.30	0.244	0.252	16.70	16.70	270.00	16.70	
ROOM_2_CAC92250_FACE0	MURO BTC 30CM	ROOM_2_CAC92250	ROOM_2_CAC92250_SPACE	0.40	1.429	1.818	4.50	3.60	270.00	90.00	W
ROOM_2_CAC92250_FACE1	MURO BTC 30CM	ROOM_2_CAC92250	ROOM_2_CAC92250_SPACE	0.40	1.429	1.818	14.40	11.52	180.00	90.00	S
ROOM_2_CAC92250_FACE2	MURO BTC 30CM	ROOM_2_CAC92250	ROOM_2_CAC92250_SPACE	0.40	1.429	1.818	6.30	5.04	90.00	90.00	E
ROOM_2_CAC92250_FACE3	PISO CERMICA	ROOM_2_CAC92250	ROOM_2_CAC92250_SPACE	0.30	3.624	8.779	6.00	6.00	0.00	180.00	
ROOM_2_CAC92250_FACE4	CUBIERTA TEJA	ROOM_2_CAC92250	ROOM_2_CAC92250_SPACE	0.30	0.244	0.252	6.26	6.26	270.00	16.70	
ROOM_3_5D27A618_FACE0	MURO BTC 30CM	ROOM_3_5D27A618	ROOM_3_5D27A618_SPACE	0.40	1.429	1.818	13.50	10.80	90.00	90.00	E
ROOM_3_5D27A618_FACE1	MURO BTC 30CM	ROOM_3_5D27A618	ROOM_3_5D27A618_SPACE	0.40	1.429	1.818	16.20	12.96	0.00	90.00	N
ROOM_3_5D27A618_FACE2	MURO BTC 30CM	ROOM_3_5D27A618	ROOM_3_5D27A618_SPACE	0.40	1.429	1.818	18.90	15.12	270.00	90.00	W
ROOM_3_5D27A618_FACE5	MURO BTC 30CM	ROOM_3_5D27A618	ROOM_3_5D27A618_SPACE	0.40	1.429	1.818	16.20	12.96	180.00	90.00	S
ROOM_3_5D27A618_FACE3	PISO CERMICA	ROOM_3_5D27A618	ROOM_3_5D27A618_SPACE	0.30	3.624	8.779	20.25	20.25	0.00	180.00	
ROOM_3_5D27A618_FACE4	CUBIERTA TEJA	ROOM_3_5D27A618	ROOM_3_5D27A618_SPACE	0.30	0.244	0.252	20.96	20.96	90.00	14.93	

Con el propósito de validar y fundamentar las propiedades geométricas y termofísicas que estructuran el modelo de simulación dinámica en EnergyPlus™, la sección **Envelope Summary - Opaque Exterior** sintetiza las características directas de los componentes opacos perimetrales de la edificación. Este reporte de-

talla variables morfológicas críticas para cada plano de la volumetría, tales como el área neta expuesta, el azimuth (orientación respecto al norte real) y el ángulo de inclinación (*tilt*), distinguiendo rigurosamente entre paramentos verticales (muros a 90°) y superficies horizontales (cubiertas a 0°).

No obstante, desde la perspectiva del desempeño energético, el indicador de mayor relevancia científica es la **Transmitancia Térmica con Película de Aire (*U-Factor with Film*)**, expresada en $W/m^2 \cdot K$. Este parámetro cuantifica la tasa de transferencia de calor por unidad de área y diferencia de temperatura a través de las capas del sistema constructivo, incluyendo los efectos de las capas de aire limítrofes exterior e interior. En la lectura desagregada del modelo, el comportamiento de este factor permite establecer dos diagnósticos fundamentales en las caras de la vivienda:

- ▶ **Valores U más bajos (Mayor Resistencia Térmica):** Identifican a los elementos con una capacidad superior de aislamiento frente al flujo calórico. En estas superficies, la baja transmitancia —asociada al espesor y a las propiedades intrínsecas del material— garantiza que el paso de calor por conducción sea mínimo, actuando como una barrera térmica eficiente.
- ▶ **Valores U más altos (Mayor Transferencia Térmica):** Indican los puntos de la envolvente donde el calor se transfiere con mayor velocidad. Generalmente, estos valores se concentran en elementos horizontales (cubiertas) debido a que los coeficientes de película superficial varían ante el flujo de calor ascendente, o en componentes con menor resistencia material, señalando las zonas bioclimáticas que requieren mayor atención o estrategias de sombreado.

La moderación global de este factor U, combinada con la capacidad de almacenamiento térmico del Bloque de Tierra Comprimida (BTC) y sus coeficientes de absortividad solar (albedo), fundamenta matemáticamente la aptitud de la envolvente para mitigar pasivamente las oscilaciones térmicas extremas del Chaco boliviano, estabilizando los requerimientos de climatización interior.

4. DISCUSIÓN

4.1. Interpretación de Variables de Mitigación Pasiva

Los resultados fundamentan de forma directa la adopción de principios de arquitectura bioclimática estructurados en tres categorías esenciales para contrarrestar la oscilación térmica del Chaco:

1. **Control Térmico y Envolvente:** Al registrarse temperaturas exteriores que llegan a los $45^\circ C$, resulta imperativo inducir un desfase térmico de entre 8 y 10 horas mediante materiales masivos (adobe o ladrillo gambote). Al retrasar la onda de calor solar del mediodía (ocurrida entre las 14:00 y 15:00 horas), esta penetra al espacio habitable durante la noche, instante en que la carga térmica puede disiparse con facilidad debido al descenso de la temperatura del aire exterior. Esto debe complementarse con aislamiento en cubiertas mediante sistemas de doble techo con cámaras de aire ventiladas para neutralizar la transferencia por conducción, reduciendo así la transmitancia térmica total (U).
2. **Estrategias de Ventilación e Higrometría:** Debido a que la humedad relativa en la estación seca oscila en rangos muy bajos (30% a 50%), se plantea el enfriamiento evaporativo mediante la adición de fuentes, espejos de agua y vegetación nativa en patios internos para elevar la humedad y descender la temperatura de bulbo seco. El uso de chimeneas de extracción o torres de viento (inspiradas en las tipologías de Persia) permite capturar las brisas a mayor altura e introducirlas por presión, activando mecanismos de ventilación cruzada nocturna para enfriar la masa estructural acumulada. De no integrarse la ventilación nocturna, la masa térmica actuaría negativamente, acumulando calor de forma

consecutiva.

3. **Protección Solar y Diseño de Vanos:** Atendiendo a la geometría solar del Chaco Tarijeño (aproximadamente 21°S), se prescribe la inclusión de aleros profundos, galerías tradicionales, parasoles de fachada y cubiertas sombreadas. Asimismo, el uso de vegetación caducifolia proporciona sombra densa en verano, perdiendo el follaje en invierno para posibilitar la captación solar pasiva cuando las temperaturas descienden hasta los 10 °C.

4.2. Análisis Comparativo Regional y Marco Normativo

Al contrastar estos resultados con el modelo bioambiental desarrollado por Evans y de Schiller para el Chaco Argentino, se constata una convergencia técnica. Dichos autores recomiendan priorizar la orientación norte-sur para captación controlada, techos ventilados, colores claros reflectantes y patios internos humidificados. El gran aporte de estos investigadores radica en la *“democratización de la eficiencia energética”*, evidenciando que el diseño pasivo es capaz de sustituir o disminuir significativamente la demanda de climatización mecánica en entornos climáticos severos.

A nivel nacional, el Ministerio de Obras Públicas dictó en 2014 la normativa técnica NB 1211001 (“Eficiencia energética en edificaciones-Acondicionamiento térmico”). Esta norma divide a Bolivia en zonas bioclimáticas y exige explícitamente para el Chaco la reducción de la ganancia solar y la limitación de los coeficientes de transmitancia térmica (U) a partir de las propiedades de los materiales locales. No obstante, los gobiernos municipales autónomos restringen la aplicación de sus códigos urbanísticos a preceptos puramente estéticos, ignorando la eficiencia energética. En consecuencia, se requiere sustituir el actual modelo de vivienda social

-basado genéricamente en ladrillo de 6 huecos y cubiertas de chapa de calamina- e incorporar normativas técnicas obligatorias de diseño bioclimático, ordenamiento de loteos orientados al sol, obligatoriedad de suelos permeables para abatir el efecto de isla de calor urbano, y exenciones impositivas para edificaciones que demuestren un consumo energético neto cercano a cero.

5. CONCLUSIONES

La implementación de principios de arquitectura bioclimática en el Chaco Tarijeño es una ruta científicamente viable para restaurar las condiciones de habitabilidad y confort higrotérmico sin forzar la dependencia de artefactos eléctricos de climatización. Se demostró cuantitativamente que los materiales de alta inercia y baja difusividad, como el adobe y el BTC, logran un desfase térmico óptimo de entre 8 y 10 horas, protegiendo los espacios interiores de los picos extremos de radiación solar.

Aunque la inercia del mercado y la falta de transferencia de conocimiento técnico priorizan el uso ineficiente del ladrillo hueco y el cemento, la articulación de políticas públicas municipales alineadas con la norma NB 1211001 aliviará los costos operativos de las familias y mitigará el impacto de la huella de carbono regional. Las edificaciones en entornos críticos no deben diseñarse en un esquema de confrontación con su clima, sino a partir de él, transformando las variables ambientales en los ejes rectores de una estética técnica sostenible y firmemente arraigada en su territorio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ▶ Alianza Global para los Edificios y la Construcción (Global ABC) / PNUMA. (2025). *Informe sobre el estado global de las emisiones en el sector de la edificación y la construcción*.
- ▶ Copernicus. (2025). *Servicio de Cambio Climático de la Unión Europea: Reportes globales de anomalías*.

lias térmicas.

- ▶ EEIA. (2024). *Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental: Tramo Campo Pajoso - Yacuiba*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Bolivia.
- ▶ Evans, J., Martin, & de Schiller, S. (1984). *Diseño Bioambiental y Arquitectura Solar*. Secretaría de Investigación y Posgrado, Universidad de Buenos Aires (UBA).
- ▶ Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Architectural Science Series.
- ▶ Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. John Wiley & Sons.
- ▶ IPCC. (2023). *Sexto Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- ▶ Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda. (2014). *Norma Boliviana NB 1211001: Eficiencia energética en edificaciones - Acondicionamiento térmico*. Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA).
- ▶ NASA. (2026). *Global Climate Change and Global Warming Dataset Reports*. National Aeronautics and Space Administration.
- ▶ Olgyay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.
- ▶ OMM. (2026). *Declaración sobre el estado del clima mundial*. Organización Meteorológica Mundial.
- ▶ Gobierno Autónomo Departamental de Tarija. (2025). *Plan Territorial de Desarrollo Integral (PTDI) del Departamento de Tarija*.
- ▶ Szokolay, S. V. (2004). *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*. Architectural Press.
- ▶ Universidad UNIFRANZ. (2023). *Estudio sobre emisiones de dióxido de carbono asociadas a la industria cementera y transporte de materiales en el eje central de Bolivia*. Publicado el 17 de octubre de 2023.
- ▶ YPFB Chaco. (2025). *Reportes de Sostenibilidad Corporativa y facilidades de producción en la región del Gran Chaco*.