

TEKS DEL SUD

SUSTENTABILIDAD, URBANISMO Y PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO



VOL

06

DICIEMBRE
2025

 UCASAL | FACULTAD DE
ARQUITECTURA Y URBANISMO

| EUCASA 

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA (UCASAL)

Facultad de Arquitectura y Urbanismo TEKS DEL SUD. Sustentabilidad, urbanismo y patrimonio arquitectónico

N.º 6 | 2025

Comité Editorial:

Director: Dr. Arq. Pedro Daniel Fernandez
| Decano de la Facultad de Arquitectura y
Urbanismo de la Universidad Católica de
Salta (FAU-UCASAL)

Subdirectora: Dra. Ing. María Laura Gatto
D'Andrea | FAU UCASAL

Editor en jefe: Arq. Camila Gea | INENCO
CONICET- FAU UCASAL

Corrección y diseño editorial: Dra. Camila
Gea | INENCO CONICET- FAU UCASAL
Flavio Burstein | FADU UBA

Imagen de la tapa
Diseñador industrial Matías Fernandez.

Traducciones: Dra. Camila Gea | INENCO
CONICET- FAU UCASAL

Edición web Marcaje XML EUCASA
Flavio Burstein | FADU UBA

Responsable técnico portal EUCASA:
Ing. Matías Nicolás Amor | FAU UCASAL

Indexaciones, representación, análisis y

gestión documental digital EUCASA:

Lic. Andrés Vuotto | UNQUI, FH UNMDP

Miembros

Dra. Amalita Fernández
FAU UNT

Lic. Camila Binda
INENCO CONICET- FAU UCASAL

Dr. Federico Colombo Speroni
FAU UCASAL

Dr. Pablo Prone
FAU UCASAL

e-ISSN 2684-0375

Domicilio editorial: Campus Universitario Castañares -

4400 Salta - Argentina

Tel.: (54-387) 4268643

e-mail: revistaintersticios@ucasal.edu.ar

web: <http://revistas.ucasal.edu.ar/index.php/IN>



TEKS DEL SUD

Publicación Académica

N.º 6 | AÑO 2025



EUCASA

EDICIONES UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA

FACULTAD DE
ARQUITECTURA Y URBANISMO



Sobre la revista

Teks del Sud - Sustentabilidad, urbanismo y patrimonio arquitectónico es una revista científica de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Católica de Salta, Argentina, creada en el año 2019 y publicada bajo el sello EUCASA (Ediciones Universidad Católica de Salta). Es una publicación de periodicidad anual, que contiene artículos, estudios de caso y experiencias de cátedra organizados temáticamente. Los trabajos son inéditos y originales, y son sometidos a un proceso de evaluación por pares externos.

El nombre de la revista responde a las acepciones del indoeuropeo Teks, tejer, construir; y Sud (del sur), integrando aquellas expresiones que miran a la arquitectura como tejidos que posibilitan el hábitat y la convivencia humana y no humana en sus diferentes escalas y temáticas.

Teks del Sud brinda una plataforma de discusión, reflexión y exploración a la comunidad universitaria, teniendo como punto de partida la producción intelec-

tual y material de docentes e investigadores del ámbito del diseño proyectual, la sustentabilidad, el urbanismo, la arquitectura patrimonial; con particular énfasis en el contexto sudamericano.

Esta publicación ha sido creada con el fin de promover la divulgación de la producción científica y académica de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, así como facilitar el intercambio y la articulación con otras instituciones nacionales e internacionales.

La revista recibe artículos en español y publica versiones de los mismos en la lengua original del autor. Para mayor información sobre las convocatorias y las pautas idiomáticas, diríjase a la sección Políticas de secciones y contribuciones en el portal web de revistas EUCASA.



► SUMARIO

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

- Evaluación de propiedades mecánicas y térmicas en baldosas de hormigón con agregados de residuos plásticos (EPS y PEBD) 7
Andrés Emanuel Díaz,, Haitham Al-Hakemi, Nicolas Di Lalla, Alejandro Luis Hernández.
- Pavimentos de mezcla asfáltica modificados con TiO₂ y su aporte a la sustentabilidad urbana 21
Pablo Cabrera, Eliana Elorza, Ignacio Zapata Ferrero, Gerardo Botasso, Ana M. Castro Luna.
- Predicción de consumo eléctrico de un edificio público con Machine Learning 35
Camila Escudero, Tomás Concha, Marcos Hongn.
- Evaluación del comportamiento térmico de una vivienda unifamiliar construida con tierra en Vaqueros, La Caldera (Salta, Argentina). 51
Sol Araceli Ramírez, Camila Escudero, Camila Gea Salim.
- Monitoreo higrotérmico y confort en CAPS de San Miguel de Tucumán 67
Amalita Fernández, Beatriz S. Garzón.

EXPERIENCIAS DE CÁTEDRA

- Mapeo socioambiental de la ciudad de Santiago del Estero 79
Matías Ortega, María Laura Cortez, Camila Rubio.

06



Artículos Científicos

► **Evaluación de propiedades mecánicas y térmicas en baldosas de hormigón con agregados de residuos plásticos (EPS y PEBD)**

Evaluation of mechanical and thermal properties of concrete tiles with recycled plastic aggregates (EPS and LDPE)

Andrés Emanuel Díaz^{1,2}, Haitham Al-Hakemi², Nicolas Di Lalla¹, Alejandro Luis Hernández^{1,2}

Artículos científicos

Citar: Díaz, A. et al. (2025) Evaluación de propiedades mecánicas y térmicas en baldosas de hormigón con agregados de residuos plásticos (eps y pebd). Teks del Sud, 6, pp. 07-20

Resumen

La gestión de residuos plásticos es un desafío ambiental global. Esta investigación explora una solución sostenible mediante el desarrollo de baldosas de hormigón con agregados de plástico reciclado. Se diseñó una metodología experimental donde se evaluaron tres mezclas: una de control sin residuos (B_1), y dos mezclas con sustitución parcial de áridos tradicionales por desechos de Poliestireno Expandido (EPS) y Polietileno de Baja Densidad (PEBD) (B_2 y B_3). Se analizaron las propiedades en estado fresco (asentamiento) y endurecido (resistencia a flexión y compresión, absorción, densidad, conductividad térmica y resistencia al impacto) siguiendo normas nacionales IRAM. Los resultados indican que las mezclas con residuos plásticos (B_2 y B_3) cumplieron con los requisitos normativos, mostrando una reducción significativa en la densidad (hasta 14%) y conductividad térmica (hasta 47%) en comparación con el control. La mezcla B_2 exhibió el mejor desempeño global, con una resistencia a flexión de 7,64 daN/cm² y una absorción del 7,4%. El estudio concluye que es factible producir baldosas con mejor aislamiento térmico y propiedades mecánicas adecuadas utilizando residuos de EPS y PEBD, ofreciendo una alternativa viable para la valorización de residuos en la industria de la construcción.

Palabras clave: baldosas de hormigón, residuos plásticos, propiedades térmicas, construcción sostenible, reciclaje de eps, reciclaje de pebd, valorización de residuos.

¹ Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO)- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) e-mail: andres@exa.unsa.edu.ar

² Departamento de Física- Universidad Nacional de Salta (UNSa) e-mail: haitham.alhakemi@gmail.com; ndilalla@gmail.com; alejoher65@gmail.com

Abstract

The management of plastic waste is a global environmental challenge. This research explores a sustainable solution by developing concrete tiles incorporating recycled plastic aggregates. An experimental methodology was designed, evaluating three mixes: a control mix (B_1) without waste, and two mixes with partial replacement of traditional aggregates by Expanded Polystyrene (EPS) and Low-Density Polyethylene (LDPE) waste (B_2 and B_3). The properties in both fresh (slump) and hardened state (flexural and compressive strength, absorption, density, thermal conductivity, and impact resistance) were analyzed following international standards. The results indicate that the mixes with plastic waste (B_2 and B_3) met regulatory requirements, showing a significant reduction in density (up to 14%) and thermal conductivity (up to 47%) compared to the control. Mix B_2 exhibited the best overall performance, with a flexural strength of 7.64 daN/cm² and 7.4% absorption. The study concludes that it is feasible to produce tiles with improved thermal insulation and adequate mechanical properties using EPS and LDPE waste, offering a viable alternative for waste valorization in the construction industry.

Keywords: concrete tiles, recycled plastic, expanded polystyrene (eps), low-density polyethylene (ldpe), thermal properties, mechanical properties.

Introducción

La gestión de residuos plásticos representa uno de los mayores desafíos ambientales a escala global, debido a su persistencia en el medio ambiente y el alto volumen generado. Paralelamente, la industria de la construcción, en su constante búsqueda de materiales más sostenibles, se presenta como un potencial canal para la valorización de estos desechos, contribuyendo así a los principios de la economía circular.

El sector cerámico y de materiales para la construcción ha demostrado un creciente interés en la incorporación de residuos de diversa naturaleza. Existe un impulso significativo por evolucionar las técnicas de producción tradicionales hacia modelos de manufactura de cero residuos, integrando desechos de otras industrias para minimizar el impacto ambiental. Esta transición no solo es deseable desde una perspectiva ecológica, sino que también está siendo impulsada por incentivos regulatorios y políticas de mercado que promueven la circularidad (Javed *et al.*, 2025). En esta misma línea, investigaciones recientes han explorado el uso de residuos agrícolas (Bwambale *et al.*, 2025) y subproductos de la fabricación de baldosas de porcelana (Zanatta *et al.*, 2020) como materias primas alternativas, validando técnicamente esta práctica.

Dentro de este marco, los plásticos de tipo poliolefina, como el polietileno de baja densidad (PEBD) y el poliestireno expandido (EPS), son candidatos ideales para su reutilización en matrices cementicias. Su incorporación como agregados en morteros y hormigones no solo aborda el problema de su disposición final, sino que puede conferir propiedades beneficiosas al material compuesto, como la reducción de la densidad y la mejora del aislamiento térmico. Además, como demostraron con baldosas de pavimento (Duguma Debele *et al.*, 2024), el uso de desechos de polietileno de baja densidad (LDPE) como aglutinante puede resultar en productos con propiedades mecánicas que cumplen los estándares requeridos, mostrando una absorción de agua muy baja y una resistencia adecuada para aplicaciones en exteriores.

Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se han centrado en su uso como áridos en elementos de hormigón masivo o como aglutinante principal en composites plásticos. Existe un vacío de conocimiento específico respecto a la fabricación de baldosas premoldeadas de hormigón delgadas (usualmente de 1,5-2,5 cm de espesor) que utilicen una combinación de agregados plásticos (PEBD) y partículas de EPS, orientadas a aplicaciones donde se requiera un equilibrio entre propiedades mecánicas, peso reducido y aislamiento térmico.

Este trabajo presenta una investigación experimental sobre el desarrollo y caracterización de baldosas de hormigón con agregados de desechos plásticos PEBD y EPS. El objetivo principal fue evaluar el efecto de la sustitución parcial de los áridos tradicionales por estos residuos plásticos en las propiedades frescas y endurecidas del hormigón, con especial énfasis en la resistencia a la flexión, la absorción de agua, la conductividad térmica y la resistencia al impacto. Los resultados demuestran que es posible producir baldosas que cumplan con los requisitos normativos vigentes, ofreciendo además una significativa mejora en el aislamiento térmico, contribuyendo así a una práctica de construcción más sostenible y ofreciendo una solución viable para la valorización de residuos plásticos.

Metodología

El presente estudio se llevó a cabo mediante un enfoque experimental sistemático destinado a desarrollar y caracterizar baldosas de hormigón con agregados de desechos plásticos. Para ello, se diseñaron tres dosificaciones distintas: una mezcla de control sin residuos (B_1) y dos mezclas con sustitución parcial de áridos tradicionales por residuos de EPS y PEBD (B_2 y B_3). Se evaluaron las propiedades en estado fresco (asentamiento) y endurecido (resistencia a flexión, compresión, absorción, densidad, conductividad térmica y resistencia al impacto), siguiendo normativas internacionales vigentes. A continuación, se detallan los materiales utilizados, los procedimientos de dosificación, fabricación y los métodos de ensayo empleados para la caracterización de las probetas.

Dosificaciones

Las dosificaciones se plantearon con el Método del Instituto Americano del Hormigón (ACI), que permite llegar a la dosificación final de una manera práctica, haciendo correcciones sucesivas por asentamiento y resistencia. La base para el cómputo es la expresión del m^3 de hormigón como suma del volumen sólido de cada uno de los componentes de la mezcla (ACI 211.1, 2009). El diseño de una mezcla es un proceso que consiste en tres pasos interrelacionados:

- Selección de los constituyentes.
- Determinación de sus cantidades relativas para producir, lo más económicamente posible, una mezcla de las características apropiadas, tanto en estado fresco como endurecido
- Ajuste de las cantidades estimadas mediante su ensayo en pastones de prueba.

La norma que rige los diseños de mezclas de hormigón es la ACI 211.1 que, a su vez, está basada en la norma ASTM C33, donde se hace referencia a las especificaciones granulométricas. Para esta etapa de prueba se utilizó en la mezcla un agregado de óxido férrico (pigmento rojo), que genera un color rojo en la mezcla (Tabla 1). Se procedió a diseñar tres grupos de dosificaciones y sus designaciones fueron:

- B_1 : Sin agregados de desechos. Relación $a/c=0,65$. 2,22 kg de pigmento rojo (cumple con norma ASTM C 979). Porcentaje de agregado fino y cemento (Portland CPC 30): 55 % fino y 45 % grueso.
- B_2 : Agregados de 9 kg de desechos de EPS (triturados de entre 1 a 3 mm) y 45 kg de desechos plásticos PEBD (pellets de 5 mm). 2,4 kg de pigmento rojo (9 % más que probeta B_1). Relación $a/c=0,56$. Porcentaje de agregado fino y cemento: 55 % fino y 45 % grueso (9,5 % menos de agregados finos y gruesos que probeta B_1).
- B_3 : 9 kg de desechos de EPS (igual que probeta B_2). 54 kg de desechos plásticos PEAD (16 % más que probeta B_2). 3,6 kg de pigmento rojo (63 % más que la probeta B_1 y 50 % más que probeta B_2). Relación $a/c=0,73$. Porcentaje de agregado fino y grueso: 55 % fino y 45 % grueso (12 % menos de agregados finos y gruesos que probeta B_1).

Componentes [kg]	B ₁	B ₂	B ₃
Agua	176	140	122
Cemento	270	250	167
Agregado fino: Módulo de Finura 3,75	569	515	500
Agregado EPS	0	9	9
Agregado Plástico	0	45	54
Aditivo Superligante: Densidad 1,09 kg/m ³	120	120	120
Pigmento	2,22	2,40	3,6
Densidad [kg/m ³]	1137	1081	975

Tabla 1:
Dosificaciones de la serie de baldosas por cada m³ de mezcla.

Elaboración de pastones

El procedimiento para la elaboración de las mezclas fue el siguiente:

- 1º) Incorporar agua a los agregados reciclados, mezclar y dejar secar unos 15 minutos. En la Figura 1 se muestran los agregados para formar la pasta para las baldosas.



Figura 1.
Agregados utilizados para la elaboración de la Serie de Baldosas.

- 2º) Introducir el o los agregados reciclados (según corresponda la dosificación) a la hormigonera.
- 3º) Mezclar un 20 % del agua con el pigmento.
- 4º) Agregar aditivo y cemento con un 20 % de agua de amasado.
- 5º) Luego de unos minutos de mezclado introducir el agregado fino con un 10 % de agua de amasado. Ver Figura 2(a).

Figura 2.
(a) Inclusión de los agregados para la realización de la baldosa, (b) Etapa final de la pasta



- 6º) Luego de tres minutos de mezclado agregar el agua restante (50%). Ver Figura 2(b).
7º) Medir la temperatura de la mezcla y procedemos a llenar los moldes cuadrados para la conductividad térmica y los moldes cilíndricos de acero para los pastones (Figura 3).

Figura 3.
Llenado de los moldes para sus posteriores ensayos de conductividad térmica.



Ensayos sobre estado fresco

Para verificar la influencia de los agregados reciclados en la trabajabilidad de las mezclas se realizaron ensayos en estado fresco para determinar el asentamiento con el cono de Abrams (Norma IRAM 1536). Se llenó el cono con la mezcla y se repitió dos veces el ensayo por cada pastón sacando un valor promedio de asentamiento.

Ensayos sobre estado endurecido

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo a los 7 días y 28 días de curado de las probetas cilíndricas de 10 cm x 20 cm, según norma IRAM 1546. Los ensayos de flexión y choque se realizaron a los 7 y 28 días de realizadas las probetas siguiendo la Norma IRAM 1522. Las probetas tienen la forma prismática de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Para analizar el comportamiento térmico, se determinó el coeficiente de conductividad térmica mediante un equipo de placa caliente, de acuerdo con Norma IRAM 11559 (Díaz y Hernández, 2025). Para las mediciones realizadas se necesitaron dos probetas mellizas de cada mezcla, dado que este modelo de equipo necesita dos muestras de similares características para medir la conductividad térmica. Las dimensiones de las probetas eran de 30 cm de alto x 30 cm ancho x 4 cm de espesor.

Resultados

Los resultados del ensayo de asentamiento se presentan en la Tabla 2. Por lo apreciado, se aumentó la relación de agua/cemento (a/c) para que la mezcla fuera más fluida. El de mayor asentamiento es la mezcla B₃, que tiene más contenido en peso de agregados plásticos. Mientras que la de menor asentamiento es la probeta B₂ que contiene menos agregado plástico y más de agregados finos y gruesos.

Probeta	Reciclado	Relación a/c	Asentamiento [cm]
B ₂	EPS y PEBD	0,56	3,5
B ₃		0,73	4,5
B ₁	—	0,65	4,0

Tabla 2.
Resultados
de los
asentamientos
y relación a/c
utilizada.

En la Figura 4(a) se puede observar cómo se realizó el ensayo de resistencia a la flexión de las probetas. La imagen muestra la probeta B₂ con un valor de 7,64 daN/cm² y la probeta B₃ 5,7 daN/cm². Estos resultados superan los 5 daN/cm² establecidos por la norma IRAM 1522. Finalmente, la probeta de control B₁ obtuvo el valor más alto de 9,68 daN/cm². En la Figura 4(b) se observan las probetas B₂ y B₃ luego del ensayo de resistencia a la flexión. Se puede observar en la parte superior de la imagen cómo se distribuyó el agregado de EPS y PEBD.

El gráfico de la Figura 5 se muestra los resultados de la resistencia a la flexión ordenados de mayor a menor resistencia a la flexión, siendo B₁ la probeta de control. B₂ tiene 9,5 % menos de agregado fino y grueso que la probeta de control, mientras que B₃

Figura 4.
(a) Ensayo de la resistencia a la flexión. (b) Probetas B₃ (superior de la imagen) y B₂ (inferior de la imagen) luego del ensayo de resistencia a la flexión

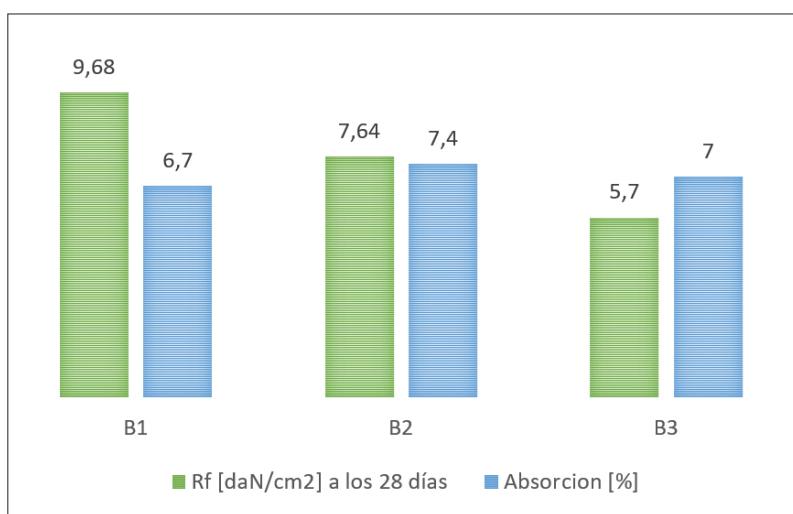


Figura 5.
Resultados de la resistencia a la flexión R_f y el porcentaje de absorción.

un 12 % menos. La Figura 5 también detalla los porcentajes de absorción de las probetas. De acuerdo con los resultados de absorción de las tres probetas B₁, B₂ y B₃ todas fueron menores al 10 %, cumpliendo con la norma IRAM 1522.

Los ensayos de densidad y conductividad térmica fueron satisfactorios, como muestra Figura 6, se redujo la densidad y por consecuencia la conductividad térmica con respecto a la probeta de control B₁. La probeta B₂ obtuvo un 40 % menos de conductividad térmica y un 9 % menos de densidad, mientras que la probeta B₃ presentó un 47 % menos de conductividad térmica y un 14% menos de densidad.

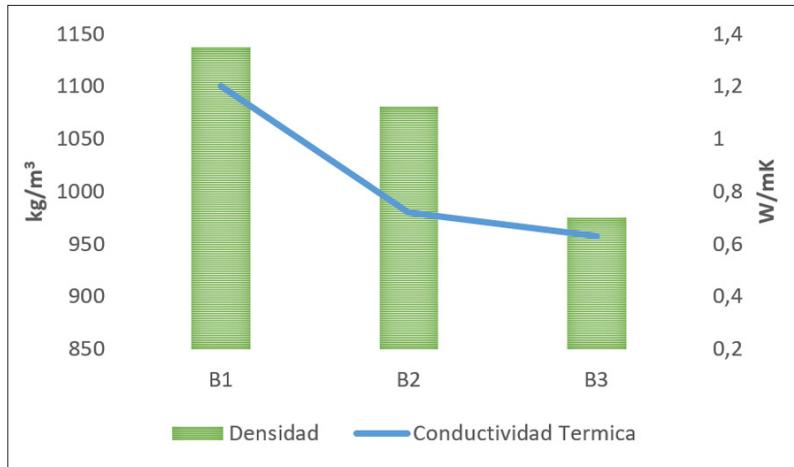


Figura 6.
Resultados
de la
densidad y la
conductividad
térmica.

Para el ensayo de choque se utilizó una caja de 60 cm x 60 cm y 20 cm de alto, con 10 cm de alto lleno de arena mediana, Figura 7(a). Se arrojó una esfera (Figura 7(b)) de 650 gramos de hierro desde diferentes alturas hasta obtener la ruptura de las baldosas. Las dimensiones de las baldosas ensayadas son de 30 cm x 30 cm x 2 cm de espesor.

La esfera de hierro fue arrojada desde nueve diferentes alturas comenzando desde los 30 cm hasta los 250 cm, altura a la cual las baldosas B_1 y B_2 se rompieron, Figura 8(a). Mediante el análisis de las Figura 8(a) y Figura 8(b) podemos apreciar la diferencia en las grietas de las baldosas, ya que la baldosa B_2 no presentó una grieta continua ante el impacto final de choque, mientras que en la baldosa B_1 la grieta fue continua y llegó a abarcar todo el largo de la baldosa, Figura 8(b). Esto se debe a los agregados de desechos plásticos y de EPS que fueron amortiguando al choque de la esfera de hierro.



Figura 7.
a) Caja de arena. b)
Esfera de hierro para
ensayo de choque.

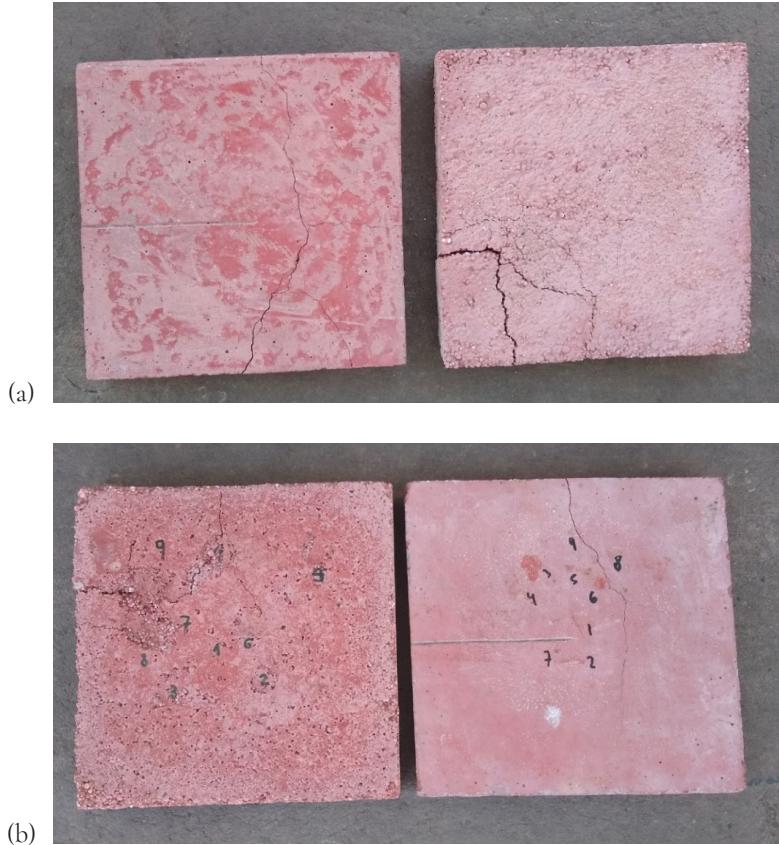


Figura 8.
(a) Marcas de las caídas de la esfera donde a la izquierda esta la probeta B₂ y a la derecha la probeta B₁, (b) Diferencia de las grietas en las probetas al momento de la ruptura.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la incorporación de residuos plásticos (EPS y PEVD) como agregados en la fabricación de baldosas de hormigón es técnicamente viable y ambientalmente prometedora. La reducción significativa en la densidad (hasta un 14%) y la conductividad térmica (hasta un 47%) en las mezclas B₂ y B₃ coincide con lo reportado en la literatura para composites cementicios con agregados plásticos (Duguma Debele *et al.*, 2024). Esta mejora en las propiedades térmicas es particularmente relevante para aplicaciones en exteriores, donde el aislamiento térmico puede contribuir a la eficiencia energética de edificaciones, un aspecto clave en la construcción sostenible (Javed *et al.*, 2025). La disminución en la resistencia a flexión observada en las mezclas con plástico (B₂ y B₃) en comparación con el control (B₁) era esperable, dado la pobre adhesión entre la matriz cementicia y los agregados plásticos hidrofóbicos, un fenómeno ampliamente documentado (Bwambale *et al.*, 2025). Sin embargo, es crucial destacar que ambos valores (5,7 y 7,64 daN/cm²) superaron el mínimo

requerido por la norma IRAM 1522 (5 daN/cm^2), lo que confirma que la pérdida de resistencia no compromete la funcionalidad del producto para su uso previsto. Este hallazgo es consistente con el de (Duguma Debele *et al.*, 2024), quien también reportó resistencias mecánicas adecuadas en baldosas con PEBD.

El comportamiento superior de la mezcla B₂ sobre la B₃ sugiere que existe un porcentaje óptimo de sustitución más allá del cual las propiedades mecánicas pueden degradarse más significativamente sin ganancias proporcionales en las propiedades térmicas, este resultado se condice con la menor relación a/c. Esto subraya la importancia de optimizar la dosificación para lograr un equilibrio entre desempeño mecánico y térmico, un desafío común en el desarrollo de materiales con residuos (Zanatta *et al.*, 2020).

La mayor ductilidad y el patrón de grietas no continuo observado en el ensayo de impacto para las baldosas B₂ y B₃ es un resultado novedoso y altamente favorable. Este comportamiento, atribuible a la capacidad de los plásticos para absorber y distribuir la energía del impacto, no es típicamente reportado en baldosas cerámicas o de hormigón tradicionales. Esta ventaja podría abrir nuevas aplicaciones en áreas donde se requiera cierto grado de resiliencia al impacto.

Si bien este estudio demostró éxito a escala de laboratorio, una limitación reconocida es la necesidad de evaluar el desempeño a largo plazo de estas baldosas, incluyendo su resistencia a la intemperie, ciclos de hielo-deshielo y la posible degradación UV de los plásticos expuestos. Futuras investigaciones deberían escalar la producción a nivel industrial para validar la viabilidad económica y técnica del proceso. Asimismo, se recomienda explorar tratamientos superficiales en los agregados plásticos para mejorar aún más la adhesión a la matriz cementicia y, potencialmente, incrementar la resistencia mecánica sin sacrificar las beneficiosas propiedades térmicas y de densidad.

Los resultados de este trabajo se alinean y fortalecen al cuerpo de literatura que aboga por la economía circular en la industria de la construcción. Se confirma que los residuos plásticos, lejos de ser un desecho problemático, pueden transformarse en un recurso valioso para desarrollar materiales de construcción innovadores y con propiedades mejoradas, contribuyendo directamente a la sostenibilidad del sector.

Conclusiones

Este estudio demostró la viabilidad técnica de utilizar residuos plásticos (EPS y PEBD) como agregados en la fabricación de baldosas de hormigón. La sustitución parcial de áridos tradicionales por estos desechos resultó en composites con propiedades mecánicas que cumplen con los estándares normativos (IRAM 1522), a la vez que confirieron características beneficiosas clave.

Las dosificaciones con plásticos (B_2 y B_3) presentaron una significativa reducción en la densidad (hasta un 14% menos) y una mejora notable en el aislamiento térmico, con una disminución de la conductividad térmica de hasta un 47% en comparación con la mezcla de control (B_1). Si bien se observó una disminución en la resistencia a flexión respecto al control, los valores obtenidos (5,7 y 7,64 daN/cm² para B_3 y B_2 , respectivamente) superaron el mínimo exigido por la norma. La mezcla B_2 mostró el mejor equilibrio global de propiedades. Además, el ensayo de impacto reveló un comportamiento más dúctil en las baldosas con plásticos, las cuales desarrollaron grietas menos continuas que la baldosa tradicional ante la misma energía de impacto.

Esta investigación valida el uso de residuos de EPS y PECD para producir baldosas ligeras, con mayor aislamiento térmico y adecuadas para aplicaciones en exteriores, representando una solución prometedora y sostenible para la valorización de residuos plásticos en la industria de la construcción.

Referencias

- ACI 211.1, 2009. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute.
- Yunusu B., Yiga V.A., Lubwama M. (2025). Utilization of agricultural residues in ceramic tiles: A review. Open Ceramics, 100783. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2025.100783>.
- Duguma Debele A., Demeke S., Bekele T., Malimo M. (2024). Recycling and reusing potential of disposable low-density polyethylene plastic waste for exible paver tile construction for outdoor application. Heliyon, 10(3), e29381. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29381>.
- Díaz A. E. & Hernandez A.L. (2025). Experimental study to measure conductive heat transfer properties in new materials with environmental waste aggregates. Am. J. Phys. Appl. 13 (2), 17–27. <https://doi.org/10.11648/j.ajpa.20251302.11>.
- IRAM 11559, 1995. Acondicionamiento térmico: Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de la placa caliente con guarda. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM 11601, 2004. Aislamiento térmico de edificios: Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM 1522, (2020). Baldosas de cemento. Métodos de ensayo. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- IRAM 1536, 2023. Hormigón fresco de cemento: Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono. Instituto Argentino de Normalización.

IRAM 1546, 2017. Hormigón de cemento: Método de ensayo de compresión. Instituto Argentino de Normalización.

Javed S., Conte S., Molinari C., Rosa R., Ferrari A.M., Dondi M., Chiara Zanelli C. (2025). Strategies and pathways to improve circularity in ceramic tile production. Journal of Cleaner Production, 145788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145788>.
Zanatta T., Rozineide A. Boca Santa A., Padoin N., Soares C., Gracher Riella H. (2020). Eco-friendly ceramic tiles: development based on technical and market demands. Journal of Materials Research and Technology, 12, 2153-2165. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.081>.

► Pavimentos de mezcla asfáltica modificados con TiO₂
y su aporte a la sustentabilidad urbana

TiO₂-Modified Asphalt Mixtures and their
Contribution to Urban Sustainability

Pablo Cabrera^{1,2}, Eliana Elorza^{1,2}, Ignacio Zapata Ferrero^{1,2}, Gerardo Botasso^{1,2}, Ana M. Castro Luna²

Artículos científicos

Citar: Cabrera, P. et al. (2025) Pavimentos de mezcla asfáltica modificados con tio2 y su aporte a la sustentabilidad urbana. *Teks del Sud*, 6, pp. 21-34

Resumen

El crecimiento urbano ha incrementado el uso de pavimentos asfálticos, los cuales contribuyen a la formación de islas de calor urbanas debido a su bajo albedo. Este estudio evalúa mezclas asfálticas modificadas con dióxido de titanio (TiO₂) para mejorar la sostenibilidad urbana. Se utilizó una mezcla tipo MAC F10 con un 2% de TiO₂ incorporado por vía seca, comparándola con una convencional. Las propiedades opto-térmicas (albedo y emisividad) se midieron experimentalmente, y el comportamiento térmico se simuló con el software PLM-Term bajo condiciones climáticas históricas de las ciudades de La Plata y Salta (Argentina). Los resultados demostraron que la mezcla con TiO₂ presentó un mayor albedo (0,17 frente a 0,10) y una mayor emisividad (0,97 frente a 0,91), lo que resultó en una reducción significativa de la energía total transferida al entorno. Se concluye que la incorporación de TiO₂ constituye una tecnología efectiva para mitigar las ICU, reducir el consumo energético en refrigeración y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: pavimentos fríos, tio2, isla de calor urbana, sustentabilidad urbana.

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata (UTN FRLP), Centro de Investigaciones Viales (LEMaC) La Plata, Buenos Aires, Argentina.
e-mail: pcabrera@frlp.utn.edu.ar; eelorzaperez@alu.frlp.utn.edu.ar; izapata@frlp.utn.edu.ar; gbotasso@frlp.utn.edu.ar

² Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC PBA), La Plata, Argentina.
e-mail: acastro@frlp.utn.edu.ar

Abstract

Urban growth has increased the use of asphalt pavements, which contribute to the formation of urban heat islands (UHI) due to their low albedo. This study evaluates asphalt mixtures modified with titanium dioxide (TiO₂) to improve urban sustainability. A MAC F10 type mixture with 2% TiO₂ incorporated using the dry process was used and compared to a conventional one. The opto-thermal properties (albedo and emissivity) were measured experimentally and the thermal behavior was simulated using PLM-Term software under historical weather conditions from the cities of La Plata and Salta (Argentina). The results showed that the mixture with TiO₂ had a higher albedo (0,17 compared to 0,10) and a higher emissivity (0,97 compared to 0,91), which resulted in a significant reduction in the total energy transferred to the environment. It is concluded that the incorporation of TiO₂ constitutes an effective technology to mitigate UHIs, reduces energy consumption for cooling and contributes to environmental sustainability.

Keywords: cold pavements, tio₂, urban heat island, urban sustainability.

Introducción

La acelerada urbanización del planeta representa uno de los principales desafíos para la sostenibilidad ambiental del siglo XXI. Se estima que para 2050, cerca del 70% de la población mundial residirá en ciudades, ejerciendo una presión sin precedentes sobre la infraestructura urbana (Akbari *et al.*, 2015). Este crecimiento ha llevado a la sustitución generalizada de superficies naturales por pavimentos impermeables, predominantemente asfálticos, los cuales exhiben propiedades opto-térmicas inadecuadas que exacerbán el consumo energético y alteran el balance térmico local (Santamouris, 2013).

Un efecto crítico de esta transformación es la formación de Islas de Calor Urbanas (ICU), fenómeno por el cual las áreas metropolitanas experimentan temperaturas significativamente más altas que sus entornos periurbanos. Los pavimentos asfálticos convencionales, de color oscuro y bajo albedo (valores típicos entre 0,05 y 0,10), son contribuyentes clave a este problema. Pueden alcanzar temperaturas superficiales próximas a los 70 °C (L. Xu *et al.*, 2021), absorbiendo y almacenando calor durante el día para liberarlo gradualmente durante la noche, lo que prolonga la incomodidad térmica y aumenta la demanda de energía para refrigeración (Asaeda *et al.*, 1996). Además, la naturaleza viscoelástica del asfalto hace que su resistencia mecánica se degrade a altas temperaturas, acelerando fenómenos de deformación permanente y envejecimiento, lo que reduce su vida útil (Fernández-Gómez *et al.*, 2013).

Para contrarrestar estos efectos, una estrategia de mitigación prometedora es el desarrollo de “pavimentos fríos”, diseñados para reflejar una mayor fracción de la radiación solar. Entre las diversas técnicas exploradas, la incorporación de pigmentos de alto albedo, como el dióxido de titanio (TiO₂) en las mezclas asfálticas ha demostrado un potencial significativo para reducir la temperatura superficial (Chen *et al.*, 2019; Zhong, 2021). Estudios previos indican que el TiO₂ no sólo puede aumentar la reflectancia solar del pavimento, sino que también actúa como estabilizante, mitigando el envejecimiento foto-oxidativo del ligante asfáltico inducido por la radiación ultravioleta (UV) (Ayar *et al.*, 2024; Zeng *et al.*, 2018).

Más allá del beneficio local inmediato de mejorar el confort térmico urbano y reducir el consumo energético, el aumento del albedo en las superficies pavimentadas tiene implicaciones profundas para la mitigación del cambio climático. Investigaciones recientes cuantifican que incrementar el albedo de las superficies urbanas en 0,01 puede equivaler a una reducción de emisiones de CO₂ equivalente de entre 0,8 a 1,6 kgCO_{2eq}/m² si se consideran las superficies pavimentadas e incluyendo el sombreado urbano y los aerosoles (X. Xu *et al.*, 2020), al disminuir la necesidad de refrigeración mecánica y alterar el balance radiativo local (Sanjuán *et al.*, 2021). Por lo tanto, optimizar las propiedades reflectantes de los pavimentos se erige como una estrategia de sostenibilidad con un doble beneficio: adaptación al cambio climático a escala local y contribución a su mitigación a escala global.

En este marco, el presente estudio evalúa la utilización de una mezcla asfáltica tipo MAC Frio (DNV, 2017), modificada con un 2% de micropartículas de TiO₂ incorporadas por vía seca en lugares con clima templado-húmedo como La Plata, y cálido-seco como Salta. La evaluación se realizó utilizando el software de simulación PLM-Term, desarrollado por el LEMaC (Centro de Investigaciones Viales de la UTN FRLP – CIC PBA). Esta herramienta permitió modelar y cuantificar parámetros clave como la temperatura superficial del pavimento, el flujo de calor sensible y la radiación de onda larga emitida hacia el entorno, bajo condiciones representativas de un espacio urbano sin cobertura vegetal. Los resultados obtenidos muestran que utilizar este tipo de pavimento modificado, con mayor albedo, disminuye las emisiones de calor sensible y de onda larga hacia el entorno urbano.

Metodología

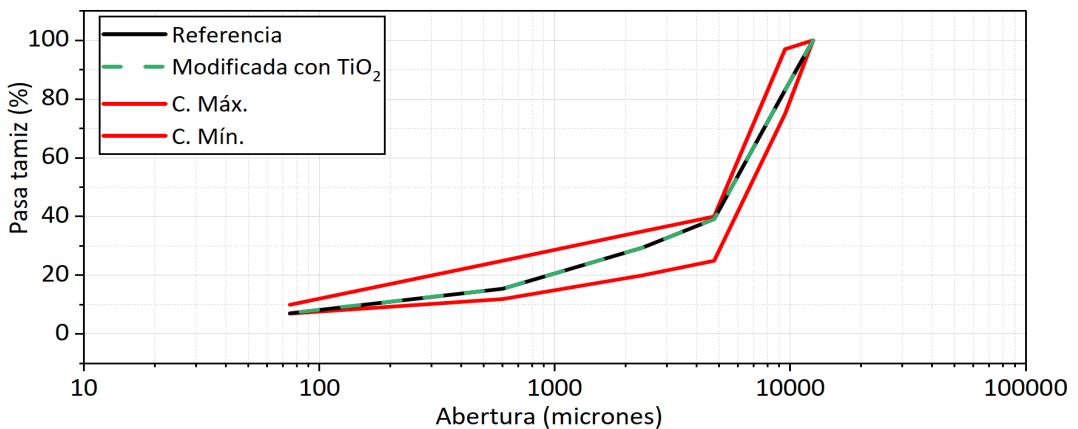
Pavimento asfáltico utilizado

Para la realización de este estudio se empleó como referencia una mezcla asfáltica del tipo microaglomerado en caliente con agregado de tamaño máximo nominal de 12 mm (MAC Frio), designada según el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de Vialidad Nacional (DNV). La dosificación de la mezcla se llevó a cabo en el LEMaC, ajustándose a las directrices del DNV y su esqueleto granular, cuyos límites se encuentran

dentro de los parámetros admisibles, se presenta en la Figura 1. Como ligante se utilizó asfalto modificado con polímeros (tipo AM-3) en un porcentaje del 5% sobre el peso total de la mezcla. La composición final de esta mezcla de referencia se detalla en la Tabla 1.

Sobre esta formulación base se incorporó un 2% de TiO₂ en peso, sustituyendo una parte del contenido de cal. Adicionalmente, el porcentaje de asfalto modificado se ajustó al 4,8%. La Tabla 1 incluye asimismo la dosificación de esta variante modificada, mientras que la Figura 1 muestra el esqueleto granular, común para ambas mezclas.

Figura 1.
Esqueletos
granulares de la
mezcla asfáltica
de referencia y
modificada con
2% de TiO₂.



Materiales	Referencia	Modificada con 2% de TiO ₂
	Contenido (%)	Contenido (%)
Piedra granítica triturada 6-12	57,0	57,1
Arena de trituración 0-6	35,0	35,1
Pigmento TiO ₂	0,0	2,0
Cal	3,0	1,0
Asfalto modificado AM-3	5,0	4,8
TOTAL	100,0	100,0

Medición de propiedades opto-térmicas

El valor de albedo de cada muestra de mezcla asfáltica resultante se evaluó según la norma ASTM E1918 (ASTM, 2006), modificada por (Akbari *et al.*, 2008), en un día despejado de abril de 2024 y abril de 2025 en un área adyacente al estacionamiento.

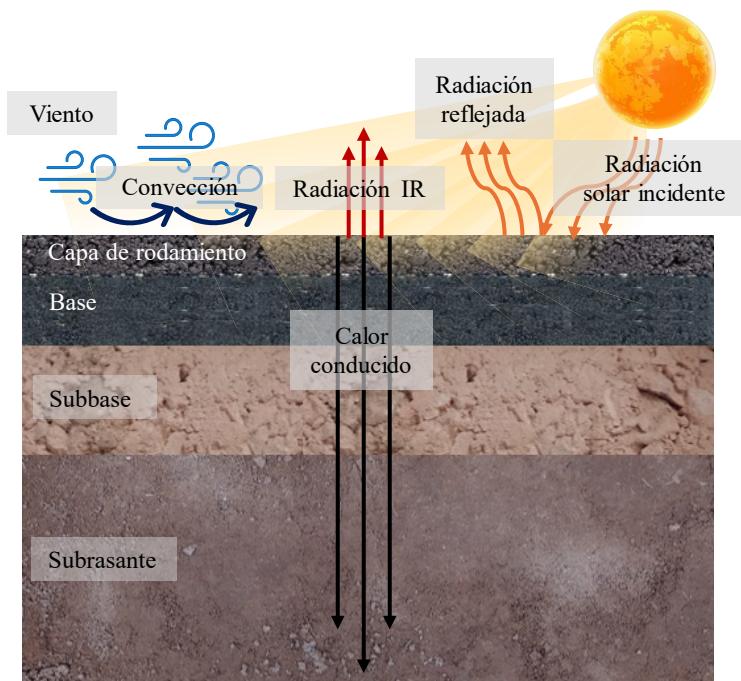
to de la Facultad Regional de la Universidad Tecnológica Nacional de La Plata. La instrumentación utilizada fue un piranómetro marca Kipp&Zonen CMP-3 (sensibilidad: 25,7 $\mu\text{V.m}^2/\text{W}$; incertidumbre: 0,67 $\mu\text{V.m}^2/\text{W}$) asociado a un datalogger Campbell Scientific CR300. El albedo de cada espécimen se midió mediante seis repeticiones experimentales, con una desviación estándar de $\pm 0,3\%$.

Para determinar la emisividad (ϵ) de cada espécimen, se utilizó una cámara termográfica Testo 865 con una resolución infrarroja de 320 x 240 píxeles y una visualización de diferencia de temperatura de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, de acuerdo con la norma (ASTM, 2014).

Las temperaturas superficiales de los espécímenes expuestos al sol, necesarias para validar la simulación que se llevará a cabo, se registraron utilizando termopares tipo K conectados a dataloggers. Los valores se tomaron durante cuatro días en abril de 2024 y abril de 2025.

Principios físicos utilizados por el software PLM-Term

El comportamiento térmico del pavimento se ve afectado conjuntamente por factores propios del material, como los parámetros opto-térmicos, y factores externos como el clima local. Los primeros incluyen el albedo y la emisividad de la capa de rodamiento, así como la conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica de todas las capas del paquete estructural, Figura 2.



La transferencia de calor entre el suelo y las capas subyacentes es tratada como una transferencia de calor transitoria unidimensional en un cuerpo semiinfinito que obedece a la Ec. 1:

$$(1) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

donde T (K) es el perfil de temperatura del suelo, Cp (J/kg.K) es el calor específico de cada capa, ρ (kg/m³) es la densidad de cada capa, t (s) es el tiempo, z (m) es la coordenada vertical que comienza desde la superficie del pavimento con el positivo hacia abajo, y k (W/m.K) es la conductividad térmica de cada capa.

La variación de temperatura del paquete estructural es impulsada por la radiación solar incidente (I_{sol}) que, dependiendo del albedo (a) que tenga la superficie de la capa de rodamiento, una parte se refleja nuevamente hacia el entorno. El albedo es una propiedad óptica de la superficie del material, cuyos valores van de 0 a 1, e indica qué fracción de la irradiancia solar incidente sobre la superficie del pavimento es reflejada nuevamente hacia el entorno. Si el valor de albedo es igual a cero, el material absorbe el 100% de la irradiancia solar incidente, y si el valor de albedo es igual a uno, el material refleja el 100% de la irradiancia solar incidente. La radiación solar restante se absorbe y se divide en conducción, convección, y radiación infrarroja (IR). El equilibrio de energía en la superficie del suelo obedece a la Ec. 2 (Qin & Hiller, 2014) :

$$(2) \quad I_{sol} \cdot (1 - a) = -k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} + h_c \cdot (T_s - T_{aire}) + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{cielo}^4)$$

donde el término a la izquierda del igual representa la irradiación solar absorbida (W/m²), el primer término de la derecha representa el calor conducido en sentido vertical a través de las distintas capas (W/m²), el segundo término representa el término convectivo (W/m²), siendo h_c (W/(m².K)) el coeficiente convectivo que se calcula según la Ec. 3 y T_s (K) la temperatura superficial de la capa de rodamiento:

$$(3) \quad h_c = \begin{cases} 5,6+4 \cdot v & v < 5 \\ 7,2 \cdot v^{0,78} & v \geq 5 \end{cases}$$

donde v (m/s) es la velocidad del viento.

El tercer término de la Ec. 2 es la radiación IR neta (W/m²), donde ε es la emisividad superficial de la capa de rodamiento, σ es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es de $5,67 \times 10^{-8}$ (W/(m².K⁴)), y T_{cielo} es la temperatura del cielo calculada según la Ec. 4. La emi-

sividad superficial es un parámetro del material, con valores de 0 a 1, que indica cuánto se asemeja el comportamiento de un cuerpo caliente al comportamiento de un cuerpo negro, siendo un cuerpo negro un objeto teórico que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre sí y, al mismo tiempo, un emisor perfecto de radiación térmica. La temperatura del cielo es la temperatura promedio derivada de la superficie del suelo en estudio y la temperatura en la tropósfera superior, donde el contenido de vapor de agua es mínimo.

$$(4) \quad T_{\text{sky}} = \epsilon_{\text{sky}}^{0,25} \cdot T_{\text{aire}}$$

donde la emisividad del cielo (ϵ_{sky}) se calcula según la Ec. 5:

$$(5) \quad \epsilon_{\text{sky}} = 0,754 + 0,0044 \cdot T_{\text{ocio}}$$

donde T_{ocio} (°C) se calcula según la Ec. 6:

$$(6) \quad T_{\text{ocio}} = \frac{b_0 \cdot \gamma}{(a_0 - \gamma)}$$

donde $a_0 = 17,3$, $b_0 = 237,7$ y $\gamma = a_0 \cdot T_{\text{aire}} / (b_0 + T_{\text{aire}}) + \ln(H/100)$, siendo H la humedad ambiente, y T_{aire} está en °C.

Método de validación de los datos simulados con el software PML-Term

La validación del modelo de simulación térmica se realizó comparando resultados de temperatura superficial simulados utilizando datos climáticos de la zona de la UTN FRLP, con datos experimentales de temperatura superficial medidos in situ durante un período de cuatro días consecutivos. Las mediciones se efectuaron sobre una muestra asfáltica compacada, cuyas propiedades ópticas críticas se determinaron experimentalmente:

- Albedo superficial: 0,05 (medido con piranómetro Kipp & Zonen CMP3).
- Emisividad superficial: 0,91 (medida con cámara termográfica Testo 865 y termocuplas tipo K). La densidad de la mezcla se cuantificó en laboratorio, obteniendo un valor de 2322 kg/m³. Los parámetros termofísicos restantes se adoptaron de literatura técnica especializada (Correa et al., 2003):

Capas	Espesor (m)	k (W/m.K)	P (kg/m3)	Cp (J/kg.K)
1	0,05	1	2322	920
2	0,10	0,032	26	1100

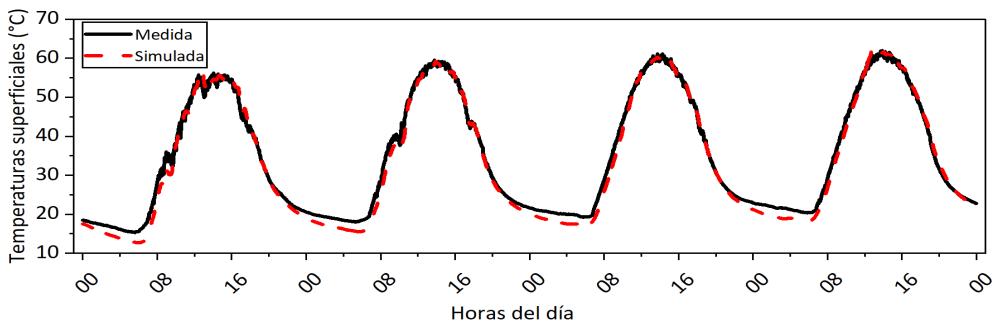
Tabla 3.
 Configuración de
 sistema multicapa.

Resultados

Validación de los datos obtenidos con el software PLM-Term

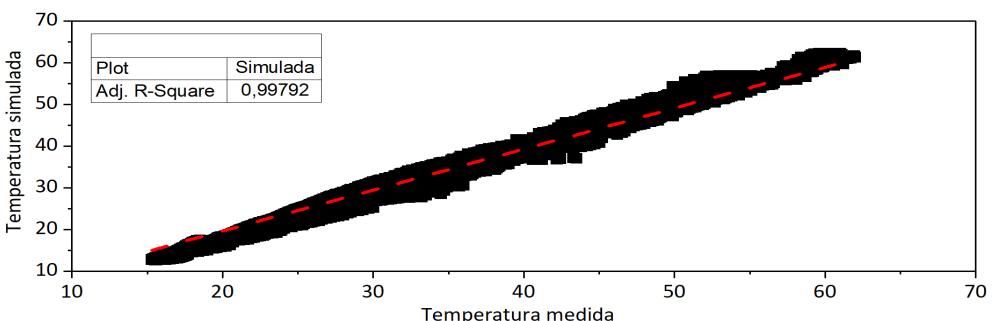
La Figura 3 presenta la comparación temporal de las temperaturas simuladas y medidas a lo largo del ciclo diario completo. Se observa una correspondencia casi perfecta entre ambas series de datos en todos los períodos evaluados, capturando el modelo con alta fielidad la dinámica del proceso térmico, incluyendo la magnitud de los máximos térmicos y la evolución de las transiciones. Los patrones de calentamiento y enfriamiento muestran una sincronización destacable, evidenciando la capacidad del simulador para reproducir la respuesta térmica real del sistema bajo las condiciones de contorno definidas.

Figura 3.
Comparación entre temperaturas superficiales registradas (línea continua negra) y temperaturas superficiales simuladas (línea discontinua roja) durante cuatro días del mes de enero de 2025.



Para una evaluación cuantitativa, la Figura 4 muestra el diagrama de dispersión de los valores medidos (eje horizontal) frente a los simulados (eje vertical), incluyendo la línea de igualdad 1:1 (45°) como referencia teórica. El análisis de regresión lineal forzado al origen ($0,0$) arrojó un coeficiente de determinación excepcional ($R^2 = 0,99792$), confirmando numéricamente la robustez y precisión global del modelo.

Figura 4.
Correlación entre valores de temperatura superficial simulados y valores de temperatura superficial registrados en campo.

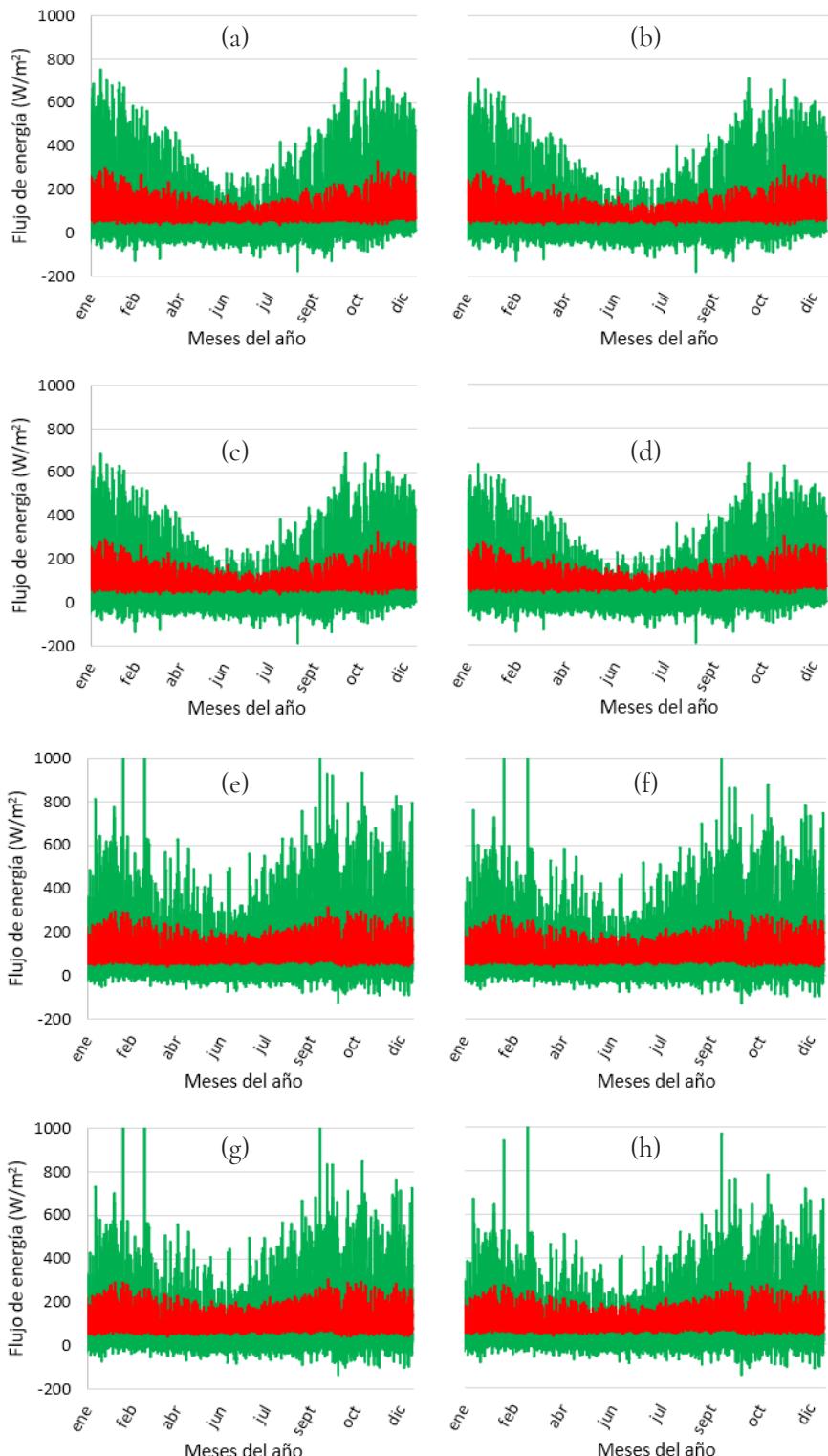


Valores anuales de temperatura superficial en Salta y La Plata

En la Figura 5 se presentan los valores de calor sensible y radiativo emitidos por pavimentos asfálticos en diferentes condiciones durante un año completo, para ello se utilizaron datos climáticos históricos. En primer lugar, se muestran los pavimentos nuevos en La Plata (a) y en Salta (e), con un albedo inicial de 0,05. A continuación, se incluyen los resultados correspondientes a pavimentos envejecidos en La Plata (b) y en Salta (f), cuyo albedo aumenta a 0,10. Por otra parte, se exponen los valores registrados en pavimentos modificados con 2% de TiO₂, recién colocados en La Plata (c) y en Salta (g), y, posteriormente, los de los mismos pavimentos tras el envejecimiento, con un albedo de 0,17. El envejecimiento considerado corresponde al proceso natural de exposición de los pavimentos a las condiciones climáticas. Cabe destacar que estudios previos han demostrado que la incorporación de TiO₂ en la mezcla asfáltica retrasa los procesos de envejecimiento inducidos por radiación UV (Cabrera et al., 2025). Finalmente, un resumen anual de los valores mostrados en la Figura 5 se presenta en la Tabla 4.

A partir del estudio realizado con archivos climáticos históricos de las ciudades de Salta y La Plata, se observa que la modificación de un pavimento de mezcla asfáltica convencional mediante la incorporación de un 2% de TiO₂ contribuye a reducir la energía transferida al entorno y a mejorar el enfriamiento radiativo. Esto se debe a la mayor emisividad alcanzada por la mezcla modificada (0,97), en comparación con la mezcla convencional (0,91). Asimismo, se destaca que la energía transferida hacia el entorno por los pavimentos en la ciudad de Salta resulta superior a la registrada en La Plata, lo que resalta la importancia de considerar, entre las estrategias de mitigación del efecto isla de calor urbano, la implementación de pavimentos fríos como el analizado en este estudio.

Figura 5.
Flujos de energía sensible (verde) y de onda larga (rojo) emitidos por pavimentos asfálticos de referencia recién colocados y luego de 1 año de exposición a la intemperie en La Plata (a, b) y por pavimentos asfálticos modificados con 2 % de TiO₂ recién elaborados y luego de 1 año de exposición en La Plata (c, d). En tanto, las figuras (e, f) y (g, h) corresponden a los mismos pavimentos en la ciudad de Salta.



La Plata			
Tipo de pavimento	Radiación IR anual	Calor sensible anual	Calor total transferido al entorno
	Wh/m ²	Wh/m ²	Wh/m ²
Referencia	850446,10	859129,96	1709576,06
Referencia envejecido	830261,60	789655,88	1619917,48
Modificado	867794,69	734683,17	1602477,86
Modificado envejecido	842637,92	652237,57	1494875,49
Salta			
Tipo de pavimento	Radiación IR anual	Calor sensible anual	Calor total transferido al entorno
	Wh/m ²	Wh/m ²	Wh/m ²
Referencia	914748,19	868461,37	1783209,56
Referencia envejecido	889421,57	800221,71	1689643,28
Modificado	825718,97	745790,53	1671509,50
Modificado envejecido	894264,39	664951,45	1559215,84

Tabla 4.
 Energía acumulada
 transferida desde
 los pavimentos
 hacia el entorno .

Conclusiones

Del análisis realizado en el presente trabajo se destacan las siguientes conclusiones:

- La incorporación de un 2% de TiO₂ en mezclas asfálticas tipo MAC F10 incrementa significativamente el albedo superficial, tanto en estado inicial como después del envejecimiento, reduciendo la absorción de radiación solar y, consecuentemente, la temperatura superficial del pavimento.
- Las simulaciones termo-ópticas realizadas con el software PLM-Term, validadas experimentalmente, confirmaron que los pavimentos modificados transfieren anualmente menos energía al entorno en forma de calor sensible y radiación infrarroja, tanto en el clima templado-húmedo de La Plata como en el cálido-seco de Salta.
- La reducción en la transferencia total de energía al entorno urbano demuestra el potencial de esta tecnología para mitigar el efecto de isla de calor urbana, lo que se traduce en un mayor confort térmico y una potencial disminución en la demanda energética para refrigeración de edificios.

- La implementación de pavimentos asfálticos modificados con TiO₂ se erige como una estrategia de doble beneficio: adaptación al cambio climático a escala local (reducción de ICU) y contribución a su mitigación a escala global (disminución de emisiones de CO₂eq asociadas al menor uso de aire acondicionado).

Referencias

- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnef, A., Wong, N. H., & Zinzi, M. (2015). LOCAL CLIMATE CHANGE AND URBAN HEAT ISLAND MITIGATION TECHNIQUES – THE STATE OF THE ART. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 22(1), 1-16. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>
- Akbari, H., Levinson, R., & Stern, S. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*, 82(7), 648-655. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001>
- Asaeda, T., Ca, V. T., & Wake, A. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, 30(3), 413-427. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00140-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00140-5)
- ASTM. (2006). *Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1918-06>
- ASTM. (2014). *Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1933-14>
- Ayar, P., Ruhi, A., Baibordy, A., Asadi Azadgoleh, M., Mohammadi, M. M., & Abdipour, S. V. (2024). Toward sustainable roads: A critical review on nano-TiO₂ application in asphalt pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(5), 148. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01450-4>
- Cabrera, P., Botasso, G., & Castro-Luna, A. M. (2025). Contribution of an asphalt pavement modified with TiO₂ to the moderation of the Urban Heat Island (UHI). *DYNA*, 92(237), 80-88. <https://doi.org/10.15446/dyna.v92n237.119489>
- Chen, J., Zhou, Z., Wu, J., Hou, S., & Liu, M. (2019). Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials. *Construction and Building Materials*, 202, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.028>
- Correa, E. N., Flores Larsen, S., Lesino, G. (2003). ISLA DE CALOR URBANA: EFECTO DE LOS PAVIMENTOS. INFORME DE AVANCE. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7 (2), 11-25.
- DNV. (2017). *PLIEGO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA MICROAGLOMERADOS ASFÁLTICOS EN CALIENTE Y SEMICALIENTE DEL TIPO f*.

- Fernández-Gómez, W. D., Rondón Quintana, H. A., & Reyes-Lizcano, F. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging. *Ingeniería e Investigación*, 33(1), 5-12. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v33n1.37659>
- Qin, Y., & Hiller, J. E. (2014). Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings*, 85, 389-399. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>
- Sanjuán, M. Á., Morales, Á., & Zaragoza, A. (2021). Effect of Precast Concrete Pavement Albedo on the Climate Change Mitigation in Spain. *Sustainability*, 13(20), 11448. <https://doi.org/10.3390/su132011448>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Xu, L., Wang, J., Xiao, F., El-Badawy, S., & Awed, A. (2021). Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. *Applied Energy*, 281, 116077. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077>
- Xu, X., Swei, O., Xu, L., Schlosser, C. A., Gregory, J., & Kirchain, R. (2020). Quantifying Location-Specific Impacts of Pavement Albedo on Radiative Forcing Using an Analytical Approach. *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2411-2421. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04556>
- Zeng, W., Wu, S., Pang, L., Chen, H., Hu, J., Sun, Y., & Chen, Z. (2018). Research on Ultra Violet (UV) aging depth of asphalts. *Construction and Building Materials*, 160, 620-627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.047>
- Zhong, Y. (2021). Research on Thermal Reflection and Cooling Curing Coating Material of Nano Modified Emulsified Asphalt for Urban Road Pavement. *E3S Web of Conferences*, 261, 02051. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126102051>

► **Predicción de consumo eléctrico de un edificio no residencial con Machine Learning**

Prediction of electricity consumption in a non-residential building using Machine Learning

Camila Escudero¹, Tomás Concha¹, Marcos Hongn^{1,2}

Artículos científicos

Citar: Escudero, C. et al. (2025) Predicción de consumo eléctrico de un edificio no residencial con *Machine Learning*. *Teks del Sud*, 6, pp. 35-50

Resumen

Dado que las personas pasan gran parte del tiempo en el interior de los edificios, es necesario diseñar ambientes interiores que les garanticen salud, bienestar y productividad. Esto podría lograrse a expensas de la energía consumida por los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, que representan hasta el 56% del consumo total de los edificios. Para reducir este consumo, estrategias como *precooling* o *preheating* podrían resultar beneficiosas, siempre que se cuente con información anticipada sobre el comportamiento energético del edificio. En este trabajo, se aplicaron técnicas de *machine learning* para abordar el relleno de vacíos en series de datos y la predicción de consumo eléctrico del edificio del Rectorado de la Universidad Nacional de Salta. Se utilizaron datos meteorológicos de estaciones propias, del Servicio Meteorológico Nacional y datos satelitales. Mediante redes neuronales, se llenaron datos faltantes en las series de temperatura y radiación solar, y se entrenaron 16 modelos, basados en Deep Learning, para predecir el consumo eléctrico a diferentes temporalidades. Se evaluó el rendimiento, el horizonte de predicción y el costo computacional. Los resultados obtenidos muestran una buena capacidad predictiva del modelo seleccionado, con un valor de correlación superior a 0,95 para predicciones a 15 minutos y de 0,75 para predicciones a 6 horas.

Palabras clave: eficiencia energética, predicción de consumo, machine learning, series temporales.

¹ Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) CONICET

² Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Física, Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina. e-mail: mhongn@unsa.edu.ar

Abstract

Given that people spend a significant portion of their time in buildings, it is essential to design indoor environments that promote their health, well-being, and productivity. This could be achieved at the expense of the energy consumed by heating, ventilation, and air conditioning systems, which account for up to 56% of total building energy consumption. To reduce this consumption, strategies such as precooling or preheating could be beneficial, provided there is advanced information on the building's energy performance. In this work, machine learning techniques were applied to address gap filling in data series and predict electricity consumption at the Rector's Office building of the National University of Salta. Meteorological data from own stations, the National Meteorological Service, and satellite data were used. Using neural networks, missing data in the temperature and solar radiation series were filled, and sixteen models based on deep learning were trained to predict electricity consumption at different time periods. Performance, prediction horizon, and computational cost were evaluated. The results obtained demonstrate a good predictive capacity for the selected model, with correlation values greater than 0.95 for 15-minute predictions and 0.75 for 6-hour predictions.

Keywords: energy efficiency, electricity consumption prediction, machine learning, time series analysis.

Introducción

El consumo energético de los edificios es responsable de una cantidad significativa de energía utilizada en las ciudades. La Agencia Internacional de Energía (IEA) estima, en su último informe (IEA, 2025), que el sector de la construcción y los edificios, impulsó una mayor demanda de electricidad en 2024, creciendo cuatro veces más rápido que en 2023. Así, para abordar los desafíos de la expansión urbana, la creciente necesidad de confort humano y el consiguiente aumento del consumo de energía, surgen soluciones en el desarrollo de infraestructuras edilicias inteligentes y sostenibles, donde la modelización y la previsión del consumo energético es esencial para gestionar la energía de manera eficiente.

Las técnicas basadas en datos (*data-driven*, D-D) emplean algoritmos de aprendizaje automático (ce, ML) para proporcionar métodos flexibles de predicción del requerimiento energético de los edificios para su posterior implementación en estrategias de control predictivo para sistemas HVAC (Bourdeau *et al.* 2019). El aprendizaje profundo (*Deep Learning*, DL) es un subgrupo dentro de ML y permite que los modelos computacionales

compuestos por múltiples capas de procesamiento aprendan representaciones de datos con múltiples niveles de abstracción, imitando así el cerebro humano. La literatura científica ha demostrado que las técnicas de DL se han aplicado con éxito en diversos tipos de predicción del consumo energético en edificios. Por ejemplo, los modelos de Redes Neuronales Recurrentes (RNN) han mostrado un rendimiento favorable en la predicción de la carga eléctrica (Kim *et al.* 2019; Uhrig *et al.* 2025). La naturaleza de los datos operacionales en las series de datos de los edificios convierte a las RNN en una técnica adecuada para la predicción del consumo energético.

En este contexto, se propone trabajar con una serie temporal de potencia eléctrica consumida por el edificio de Rectorado de la Universidad Nacional de Salta (UNSa) para el periodo desde el 1 de mayo 2024 al 31 de agosto 2025. El medidor inteligente registra los datos de consumo sólo de climatización mediante equipos de aire acondicionado. Además, se cuenta con datos climáticos de una estación meteorológica propia instalada en el edificio de Ingeniería del campus universitario. Por otro lado, se cuenta con datos públicos de variables meteorológicas registradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y por el servicio en base satelital CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service).

El objetivo del presente trabajo es la predicción del consumo de potencia mediante una RNN a diferentes horizontes de tiempo, en función de sus valores pasados y de las variables meteorológicas que tengan influencia en su comportamiento. La estimación a tiempos futuros de la energía o potencia consumida por edificios, de uso público en este caso, permitirá estudiar y optimizar las estrategias de control de uso de sistemas HVAC y, con ello, promover escenarios de mayor eficiencia energética.

Metodología

Obtención y organización de datos

Se utilizaron datos de potencia eléctrica (kW) consumida por el edificio de Rectorado de la UNSa, medidos mediante un registrador inteligente instalado en el marco del proyecto EUROCLIMA, con registros en intervalos de 15 minutos a partir de abril de 2024. También se utilizaron datos climáticos de la ciudad de Salta, tomados de una estación meteorológica Davis VantagePro 2 del Laboratorio de Edificios Bioclimáticos, ubicada en la terraza del edificio de ingeniería de la UNSa, con datos registrados cada 15 minutos, este set cuenta con medidas de temperatura de bulbo seco (°C), humedad relativa (%), temperatura de punto de rocío (°C), velocidad del viento (m/s) y radiación solar (W/m²), entre otros. Finalmente, para completar faltantes en la serie de datos de temperatura de la estación mencionada, se emplearon datos horarios del SMN (Servicio Meteorológico Nacional | Argentina.gob.ar, s. f.) y datos satelitales de CAMS (SoDa PRODUCTS, s. f.).

Selección de variables para el análisis

Para simplificar el análisis inicial, se seleccionaron únicamente las series temporales de temperatura, radiación y consumo eléctrico. Los datos de humedad y temperatura de punto de rocío no se utilizaron, debido a su alta correlación con la temperatura de bulbo seco. La velocidad del viento puede influir a través de fenómenos como la infiltración y la convección forzada, su efecto depende de factores específicos del edificio (por ejemplo, hermeticidad y aislamiento). Para simplificar el análisis, esta variable se excluyó en la etapa inicial. Las series de datos finales consideradas en el estudio se representan en la Figura 1.

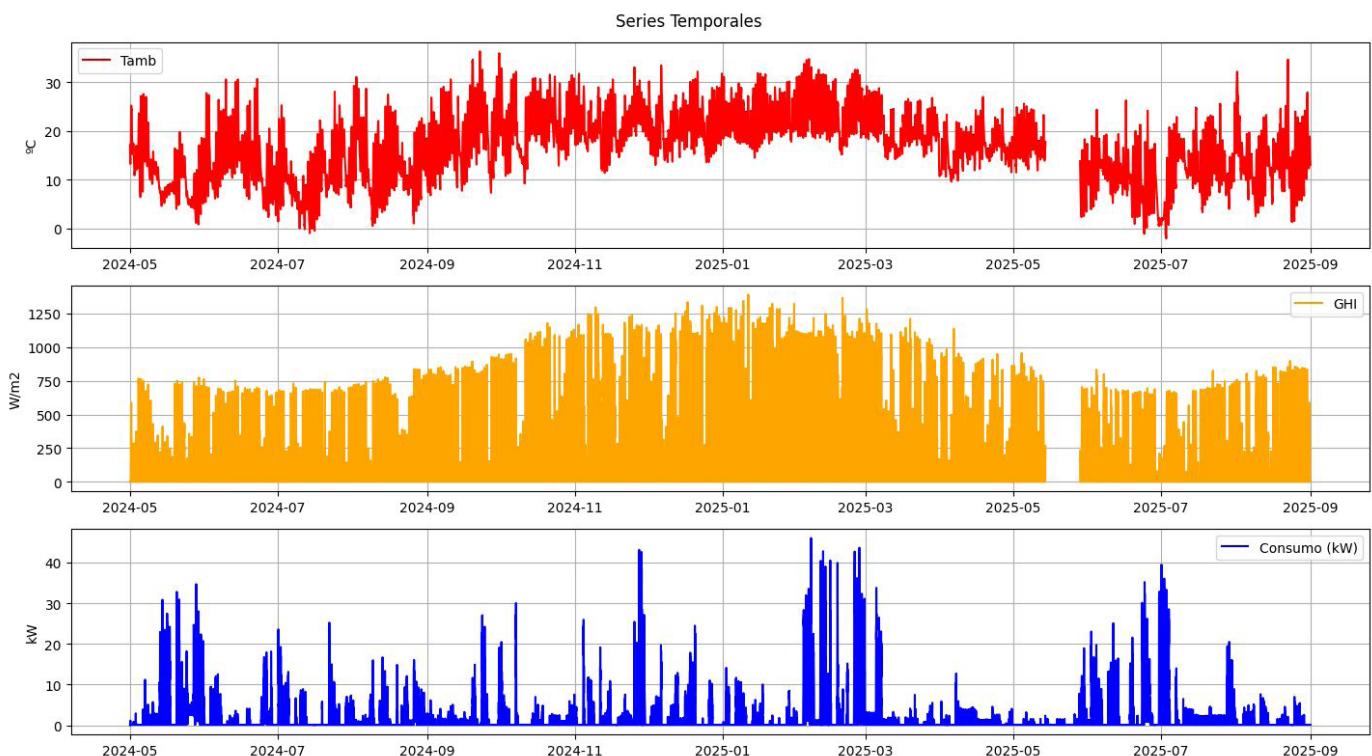


Figura 1.
Conjunto de datos consideradas en el estudio: temperatura ambiente exterior ($^{\circ}\text{C}$, arriba), irradiancia solar horizontal (W/m^2 , centro) y potencia eléctrica consumida (kW , abajo)

Identificación y tratamiento de datos faltantes

Se identificaron faltantes en las series de datos meteorológicos. Mediante la librería “missingno”, se generó una representación visual del conjunto de datos completo para conocer la ubicación y extensión de los períodos sin datos, mostrados como franjas blancas en la Figura 2.

Con el objetivo de completar los huecos presentes en las series de datos seleccionadas, se decidió trabajar con modelos de *machine learning*, siguiendo metodologías de *site adaptation*. Estas correlacionan series de datos completos (satelitales o de estaciones de



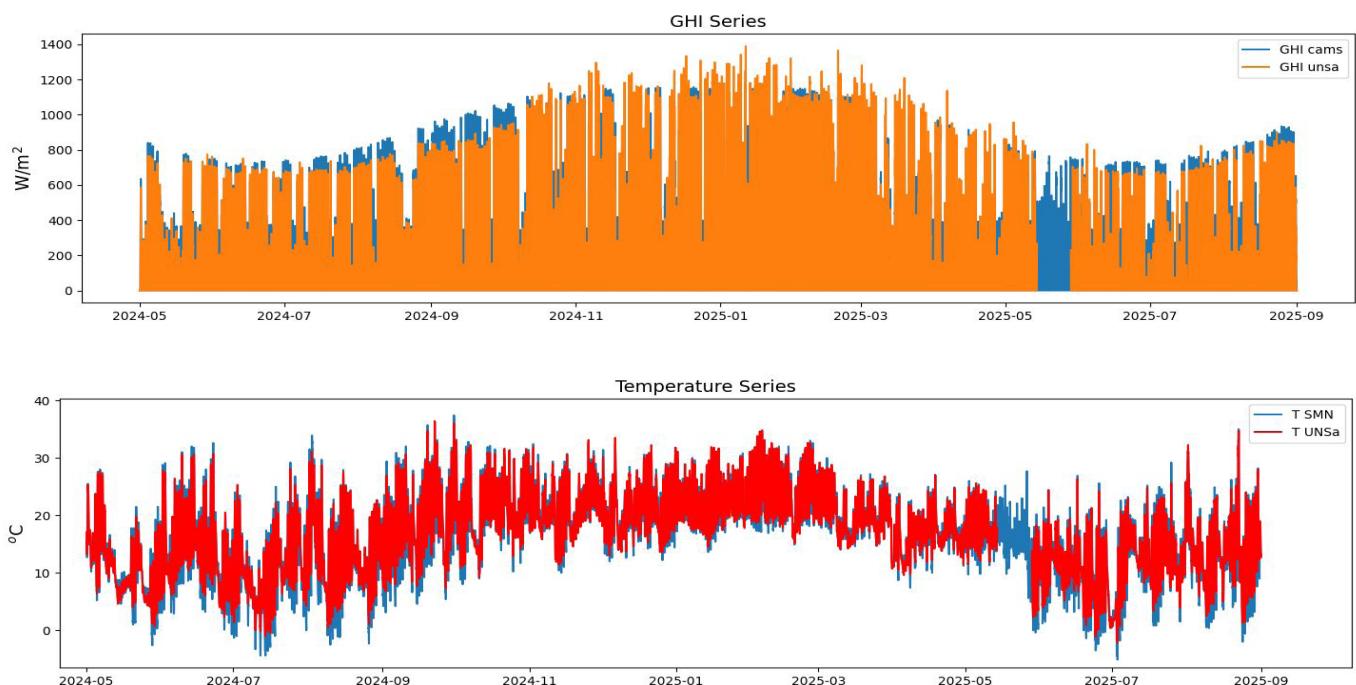
Figura 2.
Visualización de la consistencia del set de datos, desde 01-05-2024 al 31-08-2025.

referencia) con los datos medidos en el sitio de interés durante períodos coincidentes, permitiendo llenar los valores ausentes (Salazar *et al.* 2025; Zainali *et al.* 2023).

Imputación de datos de temperatura e irradiancia

La serie de datos de temperatura de la estación DavisPro de la UNSa se completó utilizando datos horarios provistos por el SMN de la estación Salta (aeropuerto). Para los datos de la UNSa, muestreados cada 15 minutos, se aplicó un remuestreo (*resample*) a frecuencia horaria para que ambas series posean la misma resolución temporal. Se puede realizar una primera inspección visual de ambas series en la Figura 3, donde se aprecian los datos faltantes de la serie de la UNSa. Además, se puede observar una correspondencia general de ambas series.

Figura 3.
Comparación del set de datos de la estación DavisProz de la UNSa y de temperatura del SMN (arriba) y de irradiancia global horizontal de CAMS (abajo), desde 01-05-2024 al 30-08-2025.



Para completar la serie de datos de irradiancia global horizontal (GHI), se utilizó la base de datos SoDa (*Solar Radiation Data*), generada mediante el modelo CAMS *Radiation Service*, con una resolución temporal de 15 minutos durante el período de interés.

Modelo de imputación y validación

Para cada variable (temperatura e irradiancia), se construyó un modelo de red neuronal de tipo Perceptrón Multicapa (MLP) (Rumelhart *et al.* 1986), con una única capa oculta de 10 neuronas y activación ReLU (*Rectified Linear Unit*). Su objetivo es modelar la relación entre las mismas variables medidas por distintas estaciones o provenientes de diferentes fuentes de datos. Para la temperatura, se utilizaron como entrada los valores horarios de temperatura del SMN, y como salida esperada, los valores correspondientes a la estación meteorológica de la UNSa. En el caso de la radiación solar, se ingresaron los datos satelitales como entrada y, como salida, los valores de la estación de la universidad.

Los datos se dividieron en conjuntos de entrenamiento (70%) y validación (30%). Cada modelo fue entrenado durante 100 épocas utilizando el optimizador Adam, que emplea una tasa de aprendizaje adaptativa, lo que mejora la velocidad de convergencia y la estabilidad en el entrenamiento (Kingma & Ba. 2014). Como función de pérdida, se utilizó el Error Cuadrático Medio (MSE). Una vez obtenidos los valores de radiación solar predichos por el MLP, se filtró la serie para asegurar que los datos tuvieran sentido físico. Para ello, se aplicó un “cereado” (forzar a 0 los valores de GHI) según un modelo de cielo claro (Duffie & Beckman, 2013), utilizando la librería pvlib (Pvlib Python — Pvlib Python 0.13.0 Documentation, s. f.).

Finalmente, se compararon los errores de pérdida de los conjuntos de entrenamiento y validación de cada serie temporal, para verificar la ausencia de sobreajuste (*overfitting*) y se calcularon los errores absolutos medios (MAE). Con ello, se generó un conjunto de datos completo, revirtiendo la serie de temperatura a su frecuencia original de 15 minutos mediante interpolación temporal.

Red neuronal para predecir datos de consumo eléctrico

Para predecir el consumo eléctrico en función de sus valores históricos y de variables meteorológicas (radiación solar y temperatura ambiente), se decidió utilizar una red neuronal LSTM (*Long Short-Term Memory*). Se seleccionó este tipo de red por su efectividad en la captura de dependencias temporales a largo plazo, lo que permite modelar con mayor precisión series con dependencias temporales (Joseph, 2022).

El modelo desarrollado toma como entrada una secuencia de datos meteorológicos y de consumo pasados y produce como salida una secuencia (predicha) de

valores de consumo eléctrico. La predicción de múltiples salidas es útil para aplicaciones de gestión energética, que requieren anticiparse a la demanda con cierto horizonte temporal.

Descripción del modelo LSTM

El modelo implementado en PyTorch, se compone de los siguientes bloques:

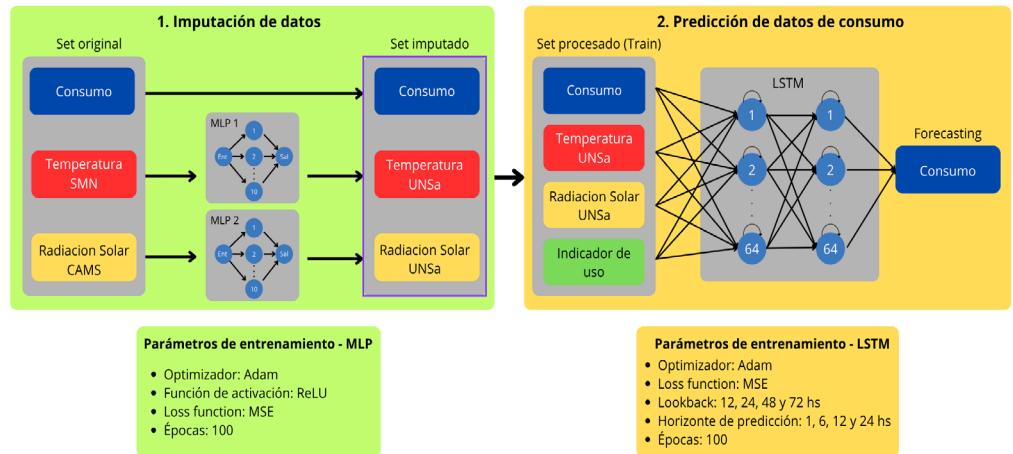
- **Capa LSTM:** Recibe secuencias de entrada con múltiples características (temperatura, radiación solar, potencia eléctrica y dos variables que indican ocupación del edificio según día y horario) y genera una representación interna de la dinámica temporal. La red está configurada para procesar lotes de datos de una dimensionalidad de: $[batch_size, lookback, num_features]$.
- **Capa lineal:** Transforma la salida de la capa LSTM para obtener una predicción de consumo eléctrico por cada paso de tiempo del horizonte de predicción. La capa lineal se aplica sobre cada salida de la secuencia.
- **Función de pérdida:** Se utilizó el error cuadrático medio (*MSELoss*).
- **Optimizador:** Se empleó el algoritmo Adam.

El entrenamiento se realizó por lotes (*batches*), donde cada lote entrena al modelo a predecir una secuencia de H pasos futuros (*horizon*) de consumo eléctrico, a partir de las condiciones meteorológicas pasadas y la evolución del consumo en una ventana de tiempo pasado (*lookback*). Para los modelos evaluados, se fijó una arquitectura de 2 capas de 64 neuronas cada una. Se varió el valor de *lookback* entre 12, 24, 48 y 72 horas, y en cada caso se predijeron horizontes máximos de 1, 6, 12 y 24 horas. Cada una de las 16 combinaciones resultantes fue entrenada durante 100 épocas.

En base a los resultados obtenidos de los modelos anteriores, se seleccionó el de mejor rendimiento, teniendo en cuenta el compromiso entre su desempeño, el horizonte máximo de predicción y el costo computacional de su entrenamiento. Este modelo fue reentrenado, con el conjunto de datos de entrenamiento y validación, para obtener un modelo entrenado con una mayor cantidad de datos, lo cual mejora su rendimiento (Abu-Mostafa *et al.*, 2012). Mientras que las métricas de desempeño se calcularon con el conjunto de testeo.

En la Figura 4, se observa un diagrama de flujo, con una síntesis de los procedimientos realizados a los datos utilizados.

Figura 4:
Flujo de datos, síntesis de procedimientos realizados para llegar al forecasting del consumo eléctrico.

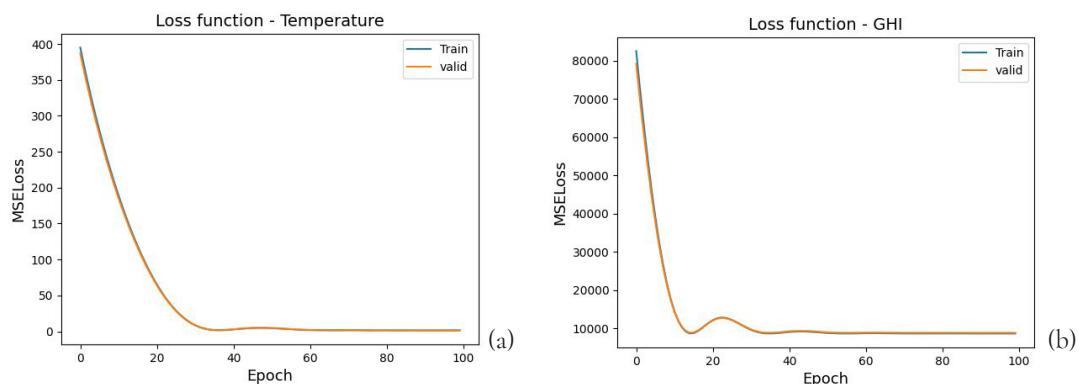


Resultados

Tratamiento de datos faltantes

La Figura 5 muestra la evolución de la función de pérdida durante las fases de entrenamiento y de validación de los modelos de correlación de variables meteorológicas, es decir, temperatura ambiente y radiación solar. En ambos casos, las curvas convergen adecuadamente y la brecha entre el error de entrenamiento y el de validación es mínima, lo que indica que los modelos no presentan sobreajuste (*overfitting*).

Figura 5.
Evolución de la función de pérdida en las 100 épocas para los conjuntos de entrenamiento y validación de la serie de temperaturas (a) y GHI (b).



Los errores absolutos medios (MAE) calculados para los conjuntos de prueba fueron de 0,89 °C para la temperatura y de 42,6 W/m² para la radiación solar. Estos valores confirman la robustez del método de imputación. La Figura 6 presenta las series temporales completas, destacando en azul los datos que fueron agregados por los modelos.

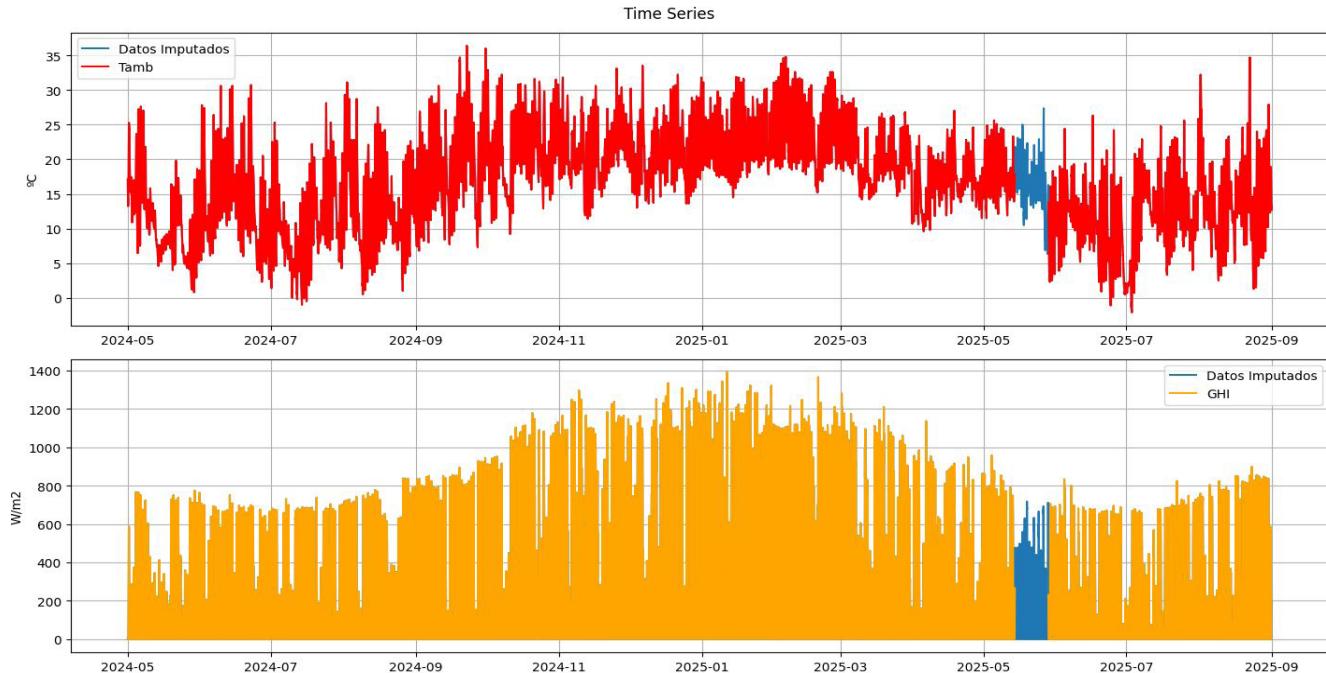
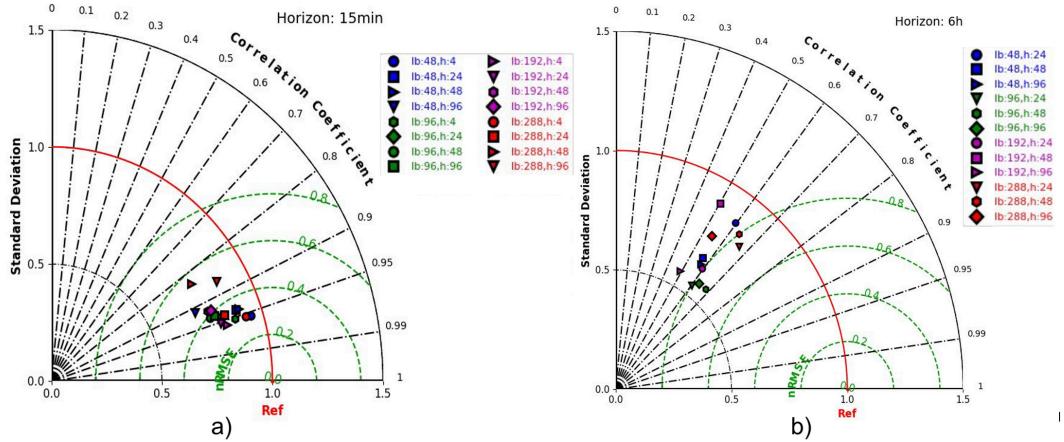


Figura 6.
Datos imputados en las series temporales de temperatura ambiente (arriba) y de radiación solar (abajo). En el período del 01-05-2024 al 30-08-2025.

Predicción de datos de consumo eléctrico Elección del modelo LSTM

Los resultados obtenidos para los modelos evaluados se presentan en los diagramas de Taylor de la Figura 7. Esta representación gráfica refleja el grado de ajuste de los modelos entrenados, incluyendo parámetros estadísticos como la desviación estándar relativa (σ_p), el coeficiente de correlación (p) y la raíz del error cuadrático medio normalizado con la desviación estándar de las observaciones (nRMSE). Ya que los modelos comparten estructura, se han etiquetado teniendo en cuenta el *lookback* que utilizan y el horizonte máximo de predicción que alcanzan. Por ejemplo, el modelo que utiliza *lookback* 12 horas (48 pasos temporales) y predice como horizonte máximo 1 hora en el futuro (4 pasos temporales) se etiqueta como lb:48, h:4.

Figura 7:
Diagrama de Taylor para: a) los 16 modelos evaluados, comparando sus predicciones para 15 minutos, b) los 12 modelos evaluados, que pueden predecir de 6 horas en adelante. Comparando sus predicciones para 6 horas.



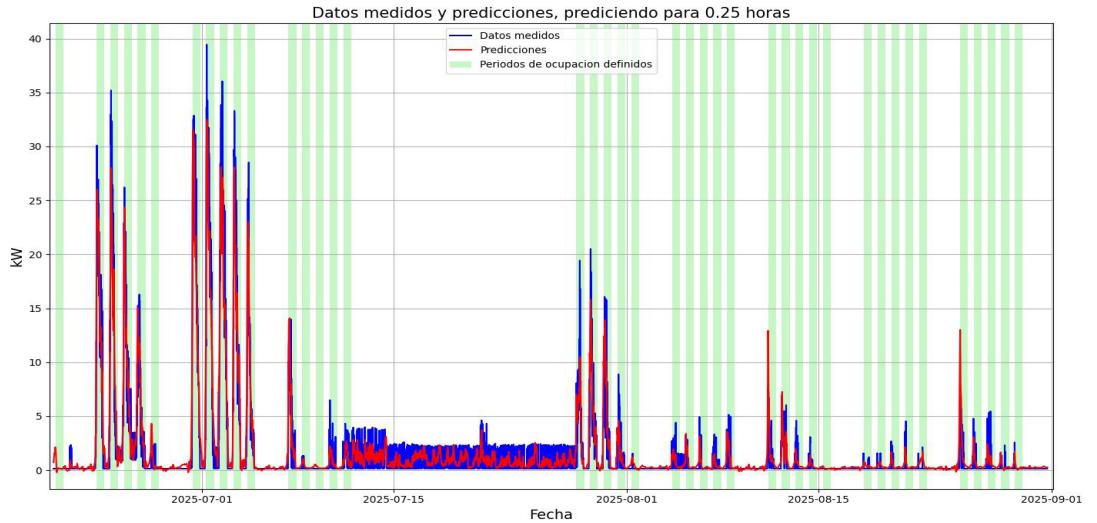
En la Figura 7a, se observa que los modelos que realizan predicciones a horizontes máximos menores (horizonte h:4, equivalente a una hora) presentan un mejor desempeño. No se observan grandes diferencias entre el desempeño de los modelos, donde la mayoría presenta $\rho > 0,9$ y los mejores $\rho > 0,95$, nRMSE entre 0,4 y 0,2 y $\sigma_r < 1$. En la Figura 7b se muestran las métricas correspondientes a una predicción de 6 horas por parte de los 12 modelos capaces de realizar este tipo de estimación. En este caso, los resultados obtenidos son más diversos y no se observa un horizonte máximo o *lookback* que indique qué tipo de modelo se desempeñaría mejor. Los modelos lb:48, h:24; lb:288, h:24 y lb:288, h:48, son los que presentan un mejor rendimiento.

El modelo lb:48, h:24 fue seleccionado como el mejor modelo para ser reentrenado, con buenas prestaciones predictivas según Figura 7 (horizontes de 1 y 6 horas), además de ser un modelo de menor costo computacional en comparación con otros que tienen un *lookback* mayor.

Predicciones del mejor modelo

Una vez reentrenado el modelo seleccionado (lb:48, h:24), se utilizaron por primera vez los datos del conjunto de testeo para evaluar su rendimiento. En la Figura 8, se observa la superposición de la predicción del modelo a 15 minutos con los datos medidos. Considerando los períodos de ocupación, sombreados en verde, se observa que el modelo capta correctamente los patrones usuales de ocupación del edificio, ya que predice un consumo mínimo (base) para los fines de semana y los períodos de receso, independientemente de las condiciones meteorológicas. El periodo de receso invernal de 2025 tuvo lugar entre el 14-07-2025 y el 25-07-2025.

Figura 8:
Datos medidos y predicciones para 15 minutos del modelo lb:48, h:24, junto con los períodos de ocupación del edificio, conjunto de datos de prueba.



En la Figura 9, se observan recortes aleatorios de porciones del conjunto de datos, junto con las predicciones del modelo para las 6 horas posteriores, comparadas con los datos medidos para esas 6 horas. El modelo respeta las tendencias de los datos medidos sin capturar variaciones pequeñas de los mismos, como si se tratase de una versión “suavizada” del comportamiento del consumo.

En la Figura 10, se observan gráficos de dispersión para diferentes horizontes de predicción del modelo. Las métricas empeoran a medida que crece el horizonte de predicción (futuro más lejano), como se observa de la evolución del nRMSE de Figura 11.

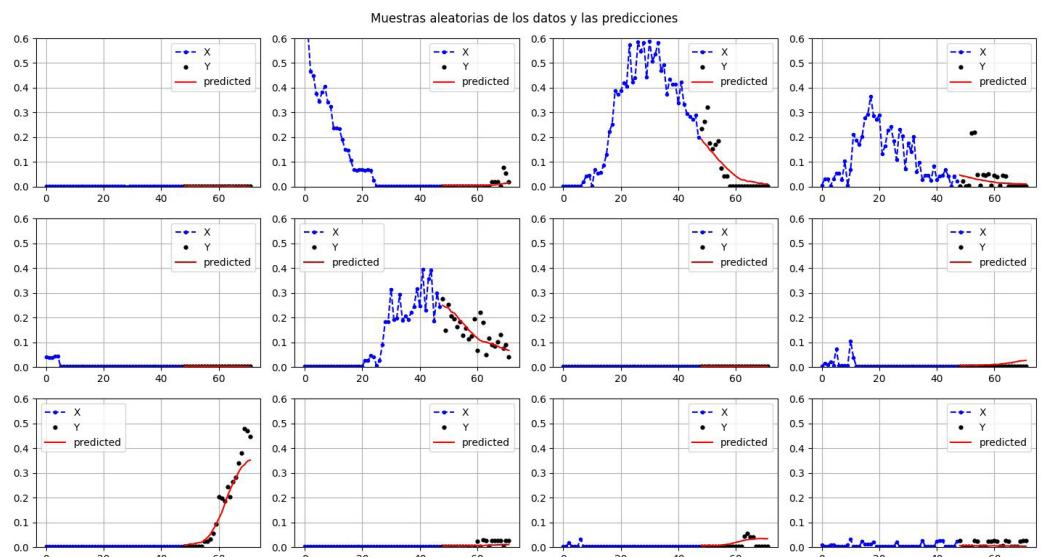


Figura 9:
Muestras aleatorias de datos medidos y predicciones para 6 h por el modelo lb:48, h:24.

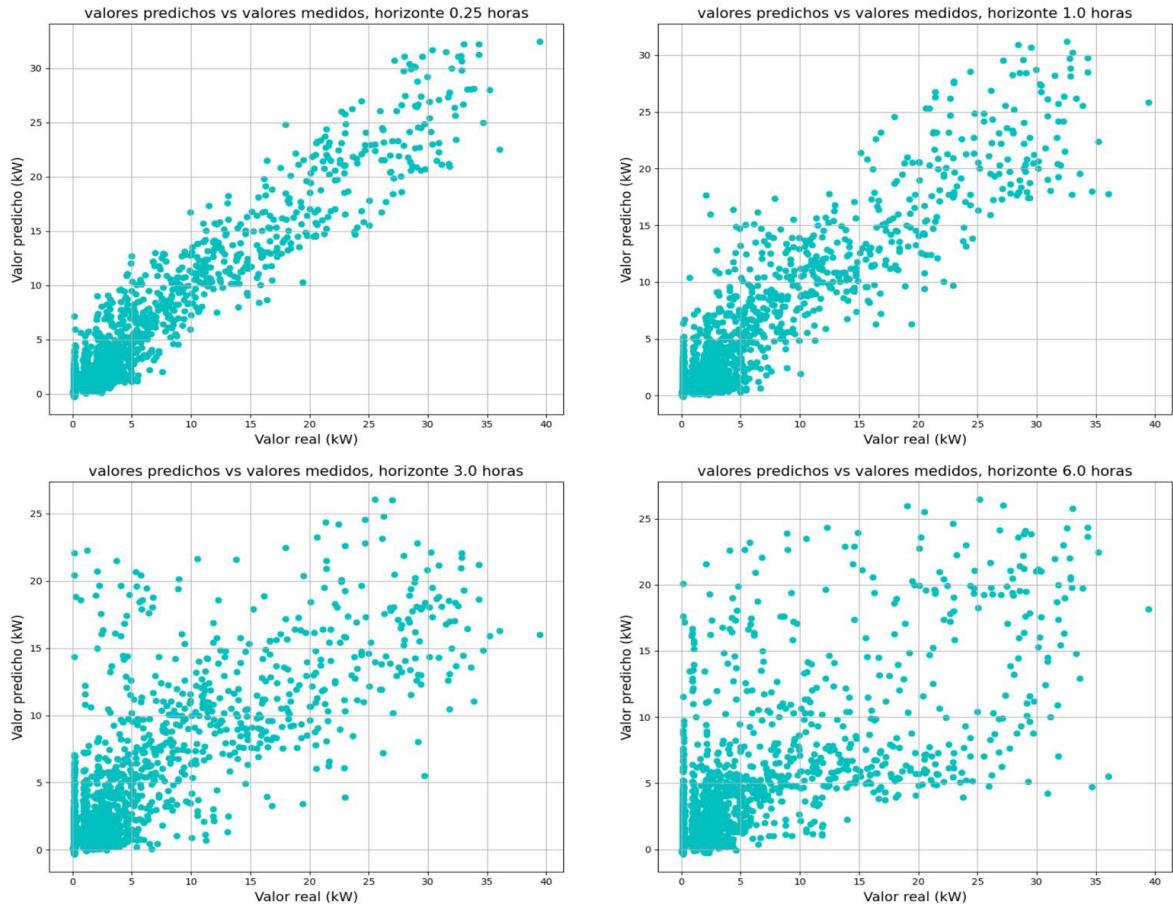


Figura 10:
Dispersión
de valores
medidos vs
predichos, para
predicciones
a 15 min, 1 h,
3 h y 6 h.

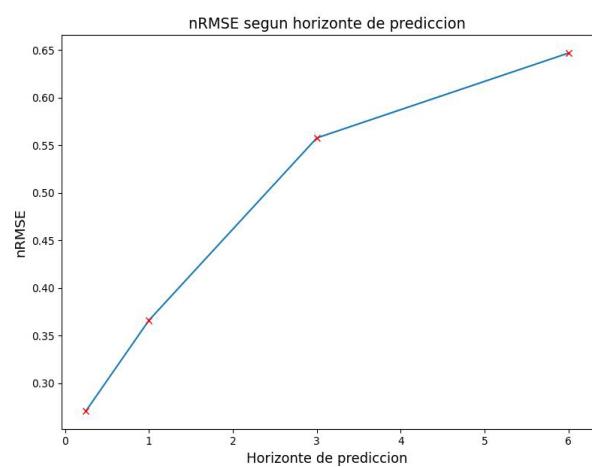


Figura II:
Cambio en el valor de
nRMSE en función de
diferentes horizontes
de predicción.

Discusión

Tratamiento de datos faltantes

Las gráficas de evolución de la función de pérdida durante el entrenamiento, tanto de temperatura como de radiación solar, observados en la Figura 5, muestran una convergencia adecuada del modelo y una diferencia leve entre los conjuntos de entrenamiento y validación, lo que podría señalar que el modelo no sobreajusta a los datos de entrenamiento (*overfitting*). Además, en el proceso de adaptación al sitio, existe una correspondencia cercana a la lineal entre variables del mismo tipo.

En particular, para la irradiancia solar, existen diversos filtros y controles de calidad, los cuales no han sido utilizados en este trabajo. En función de mejorar la calidad de las predicciones, se plantea a futuro la implementación de estas metodologías de control en los datos de irradiancia solar.

Predicción de datos de consumo eléctrico

En cuanto a las predicciones realizadas para el consumo eléctrico en el edificio, todos los modelos, incluido el seleccionado para reentrenamiento, presentan una desviación estándar $\sigma_r < 1$, lo que explica la subestimación de la mayoría de los picos de consumo de potencia eléctrica en las predicciones. En línea con este análisis, el diagrama de Taylor surge como una herramienta intuitiva y de fácil visualización para la evaluación del rendimiento y la selección de modelos.

Para trabajos futuros, sería de utilidad evaluar modelos con otras estructuras para hacer predicciones de consumo, considerando que los *lookbacks* y *horizons* más extensos, podrían requerir modelos de estructura mayor (mayor cantidad de datos de entrada y salida) para realizar predicciones de consumo a horizontes mayores sin perder precisión. Esto con la desventaja de un mayor costo computacional asociado al entrenamiento. Además, los modelos con mayores *lookbacks* (cantidad de datos pasados) podrían necesitar mayor cantidad de épocas de entrenamiento para un rendimiento óptimo, o bien, la estructura del modelo habría alcanzado su rendimiento máximo para ese número de datos de entrada, viéndose obligada a aprender patrones más generales de estos conjuntos de datos de entrada más grandes.

Se observó que el error de predicción aumenta junto con el horizonte, esto es algo esperable debido al funcionamiento del modelo, el cual utiliza el primer dato predicho para realizar la predicción del segundo, y así sucesivamente para todas las predicciones en el horizonte definido. Por lo tanto, el error cometido en cada una de las predicciones influye en las siguientes, creciendo con cada nueva predicción, esto se observa de manera clara en los gráficos de dispersión. Este funcionamiento también explica la mayor subestimación de los picos a medida que se aumenta el horizonte de predicción, debido a que, incluso en los primeros horizontes de predicción, el modelo tiende a subestimar.

Conclusiones

El uso de herramientas de *machine learning* surge como una alternativa de alto rendimiento para la correlación, adaptación al sitio e imputación de series de datos climáticos medidos en un sitio determinado. En este trabajo se realizó la imputación de un faltante en las series de temperatura ambiente, mediante datos de la estación meteorológica del SMN, y de radiación solar, mediante datos satelitales. Se obtuvieron medidas de errores satisfactorias para el desarrollo de este trabajo.

Mediante la generación de modelos basados en redes neuronales recurrentes del tipo LSTM, se realizaron estimaciones a horizontes futuros (*forecasting*) de potencia eléctrica consumida en el edificio de Rectorado de la UNSa. Para ello, se evaluaron 16 modelos, para cuatro diferentes *lookbacks* y cuatro horizontes de predicción. Se mantuvo fija la arquitectura del modelo en cuanto a las variables de entrada, capas ocultas y neuronas. Se ha incluido, en el conjunto de variables utilizadas para entrenar el modelo, una variable codificada para identificar días de la semana, recessos académicos y administrativos, y otra variable codificada para identificar horarios de ocupación de las oficinas. Entre los modelos entrenados, el óptimo considerando un compromiso entre costo computacional y alcance del horizonte de predicción, fue el que utilizó un *lookback* de 12 horas y un horizonte máximo de 6 horas.

El modelo entrenado fue capaz de identificar los períodos de utilización del edificio, realizando predicciones de consumo acordes al nivel correspondiente de utilización. Por esto, se concluye que es aconsejable utilizar una variable temporal que permita considerar el día de la semana y la hora del día para mejores estimaciones, sobre todo a horizontes de mayor extensión.

Como era de esperarse, los modelos en su conjunto presentaron un mejor desempeño al predecir horizontes de corto plazo. Esto se debe a que toda su estructura se utiliza para una predicción de menor extensión en cantidad de pasos temporales.

Como una propuesta a futuro, surge el análisis de desempeño del modelo teniendo en cuenta variables adicionales como humedad relativa o velocidad de viento. También podrían utilizarse variables internas, por ejemplo, datos de temperatura o humedad internas del edificio, las cuales pueden suponer un aumento del rendimiento y robustez del modelo. Posteriormente se podrían implementar estrategias de control predictivo para sistemas HVAC, evaluando su nivel de impacto.

Referencias

- Abu-Mostafa, Y. S., Magdon-Ismail, M., & Lin, H. 2012. Learning from Data. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2207825>
- Bourdeau, Mathieu, Xiao Qiang Zhai, Elyes Nefzaoui, Xiaofeng Guo, y Patrice Chatellier. 2019. «Modeling and Forecasting Building Energy Consumption: A Review of Data-Dri-ven Techniques». *Sustainable Cities and Society* 48:101533. doi:10.1016/j.scs.2019.101533.
- International Energy Agency. 2025. Global Energy Review 2025, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>, Licence: CC BY 4.0.
- Joseph, M. (2022). Modern Time Series Forecasting with Python: Explore Industry-Re-ready Time Series Forecasting Using Modern Machine Learning and Deep Learning. Packt Publishing.
- Kim J, Moon J, Hwang E, Kang P. 2019. Recurrent inception convolution neural network for multi short-term load forecasting. *Energy and Buildings*; 194: 328–41.
- Kingma, Diederik & Ba, Jimmy. (2014). Adam: A Method for Stochastic Optimization. International Conference on Learning Representations.
- Rumelhart, David E., Geoffrey E. Hinton, y Ronald J. Williams. 1986. «Learning Represen-tations by Back-Propagating Errors». *Nature* 323(6088):533-36. doi:10.1038/323533ao.
- Salazar, Germán Ariel, Rubén Darío Ledesma, Constanza López Ruiz, y Olga De Castro Vilela. 2025. «Análisis de desempeño de diferentes técnicas de aprendizaje automáti-co en una adaptación al sitio de irradiancia solar global para Salta (Argentina)». en Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 28.
- Servicio Meteorológico Nacional | Argentina.gob.ar. s. f. Recuperado 11 de septiembre de 2025. <https://www.argentina.gob.ar/smn>.
- SODA PRODUCTS. s. f. Recuperado 11 de septiembre de 2025. <https://www.soda-pro.com>.
- Uhrig, M., Vignolo, L., & Müller, O. (2025). Modelado y predicción de la demanda eléc-trica: comparación de enfoques estadísticos y de aprendizaje automático. *SADIO Electronic Journal of Informatics and Operations Research*, 24(1), eo67. <https://doi.org/10.24215/15146774eo67>
- Zainali, S., Yang, D., Landelius, T., & Campana, P. E. 2023. Site adaptation with machine learning for a Northern Europe gridded global solar irradiance product. *Energy And AI*, 15, 100331. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100331>

► **Evaluación del comportamiento térmico de vivienda unifamiliar construida con tierra en Vaqueros, La Caldera (Salta, Argentina).**

Evaluation of the thermal behaviour of a single-family house built with raw earth in vaqueros, la caldera.

Sol Araceli Ramírez¹, Camila Escudero^{1,2}, Camila Gea Salim^{1,2}

Artículos científicos

Citar: Ramirez, S. et al. (2025). Evaluación del comportamiento térmico de vivienda unifamiliar construida con tierra en Vaqueros, La Caldera. *Teks del Sud*, 6, pp. 51-66

Resumen

A través de este estudio se evalúa el comportamiento térmico de una vivienda unifamiliar construida en tierra, con la técnica de la quincha en el municipio de Vaqueros, Salta. El mismo se realizó mediante un monitoreo continuo de temperatura y humedad relativa interior y exterior durante un año completo a intervalos de quince minutos. Se complementa el monitoreo con un análisis basado en el estándar ASHRAE 55 de confort adaptativo. Los resultados indican un desempeño estacional marcado: durante la primavera y el verano, la vivienda permaneció dentro del rango de confort térmico más del 75 % del tiempo, mientras que en invierno, menos del 25 % de las horas cumplieron con estos criterios, lo que evidencia la necesidad de estrategias de calefacción complementarias. Además, se observó una significativa regulación de la humedad relativa interior por parte de los muros de quincha, manteniendo valores interiores consistentemente más bajos que los exteriores, especialmente durante el verano. El estudio concluye que el sistema constructivo es efectivo para las estaciones cálidas de la región y que requiere mejoras para optimizar el confort invernal. Estos resultados proporcionan una base valiosa para trabajos futuros orientados a simulación térmica computacional calibrada con datos medidos y propuestas de rehabilitación energética adaptadas al noroeste argentino.

Palabras clave: análisis higrotérmico, quincha, rehabilitación energética, confort adaptativo.

¹ Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150, A4400FVY Salta, Argentina. e-mail: solramirez2327@gmail.com

² INENCO – (UNSa – CONICET) – Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150, A4400FVY. Salta, Argentina.

Abstract

This study evaluates the thermal behaviour of a single-family dwelling built with quincha in Vaqueros, Salta, through continuous monitoring of indoor and outdoor temperature and relative humidity over a full year. The analysis was based on the ASHRAE 55 standard for adaptive comfort. The results indicate marked seasonal performance: during spring and summer, the dwelling remained within the thermal comfort range more than 75 % of the time, while in winter, less than 25 % of the hours met these criteria, highlighting the need for complementary heating strategies. In addition, significant regulation of indoor humidity was observed by the quincha walls, maintaining indoor values consistently lower than outdoor values, especially during the summer. The study concludes that quincha is an effective construction system for the warmer seasons of the region and it requires improvements to optimize winter comfort. These results provide a valuable basis for future simulations and energy rehabilitation proposals adapted to north-western Argentina.

Keywords: hygrothermal analysis, quincha, energy rehabilitation, adaptive comfort.

Introducción

El sector de la construcción y operación de edificios constituye un factor determinante en la crisis climática global. A nivel mundial, fue responsable del 34 % de las emisiones de CO₂ y del 32 % de la demanda de electricidad durante 2023, lo cual evidencia su impacto directo en el consumo de recursos y el calentamiento global (United Nations Environment Programme, 2025). En Argentina, el sector residencial es el causante del 13 % del total de emisiones de CO₂, lo que señala la importancia de implementar mejoras en las construcciones ya existentes y futuras (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

La necesidad de acción es particularmente crítica en regiones de alta vulnerabilidad climática, como lo es el Noroeste Argentino (NOA). El Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático (PNAyMC), desarrollado por el gobierno nacional a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, indica que esta zona se encuentra expuesta a un aumento de olas de calor, incendios, precipitaciones extremas y sequías. El mismo informe destaca una alta vulnerabilidad en el diseño de la infraestructura y las viviendas locales, originada en el desconocimiento y la falta de aplicación de normativas referidas al cambio climático (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023). Este escenario se ve agravado por un contexto de creciente pobreza energética, definida como la imposibilidad de un hogar a hacer frente a los requerimientos

energéticos necesarios para su funcionamiento (Durán & Condorí, 2019). Esta situación demanda con urgencia estrategias que mejoren la resiliencia de las viviendas y reduzcan su dependencia de sistemas de climatización.

Frente a este panorama, la rehabilitación energética y la adopción de técnicas constructivas de bajo impacto ambiental emergen como soluciones posibles. Aplicarlas en edificios representa una estrategia de eficiencia energética que contempla de manera integral factores ambientales, patrones de comportamiento de los residentes y los niveles de confort, pudiendo reducir el consumo de energía existente en un 60 % o más (Lantschner, 2020). La construcción con tierra, y en particular la técnica de la quincha, ofrece una alternativa con un alto potencial. Este sistema constructivo, basado en una estructura de madera que se rellena con barro y fibras vegetales, se caracteriza por sus propiedades aislantes desde el punto de vista térmico y su capacidad para regular naturalmente la humedad interior (Minke, 2008). Estas propiedades intrínsecas permiten amortiguar las fluctuaciones de la temperatura exterior y mantener condiciones de confort con un consumo energético reducido, posicionando a la quincha como una estrategia bioclimática de gran interés (Wieser et al., 2020)considering the different climates of the Peruvian territory and comparing it with the most common construction systems in the environment: adobe and brick masonry. As of the previous characterization of the components' thermal qualities, the carrying out of dynamic thermal simulations and comparing the performance of different digital prototypes, the virtues of cob to provide thermal comfort in buildings were identified. The good performance of the material is attributed to the marked balance between a medium thermal mass and a relatively low thermal conductivity. It is the only one that meets the requirements of the current Peruvian energy efficiency standard in the case of colder climates. Additionally, the ecological advantages associated to the use of natural, renewable and biodegradable materials in the composition of the proposed construction system are highlighted.”,”container-title”,”Revista de Arquitectura (Bogotá.

La validación científica de estas propiedades se realiza habitualmente mediante el monitoreo higrotérmico, una herramienta que también es necesaria para la rehabilitación energética de edificios (Franck et al., 2024; Gea Salim et al., 2022). En Argentina, se utilizaron monitoreos higrotérmicos para viviendas de tierra, en el 2010 se estudiaron las propiedades de la quincha (Cuitiño et al., 2010), donde se concluyó que es una opción eficiente y de alto potencial para la construcción en Argentina, particularmente en Mendoza. Estos hallazgos fueron explorados con mayor profundidad en estudios posteriores que analizaron variables específicas, como la evaluación del efecto de aumentar la masa de la envolvente (Giovino & Dellicompagni, 2023)the thermal behavior of a house constructed using quincha technology, located in the high mountain Andean region (Potrerillos y el análisis del comportamiento térmico integral de una vivienda (Giovino & Larsen, 2024).

Si bien estos trabajos valoran de forma positiva el uso de la quincha en climas semiáridos, existe una brecha de conocimiento sobre su comportamiento en condiciones subtropicales con estación seca, propias del NOA. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es describir y analizar el comportamiento higrotérmico estacional de una vivienda de quincha ubicada en la provincia de Salta, utilizando el estándar ASHRAE 55 de confort adaptativo. Mediante el monitoreo de sus condiciones interiores, sería posible evaluar de forma precisa el confort en condiciones climáticas reales y variables, proporcionando así datos útiles para diseñar estrategias de rehabilitación energética efectivas y contextualizadas en la región del NOA en general y en Salta en particular.

Metodología

Caracterización de la región

La Norma IRAM 11603 establece un marco de referencia que responde a las condiciones del sitio a través del diseño y la construcción que se adaptan al clima, la topografía y el bioma del lugar (Ministerio de Interior, obras públicas y vivienda, 2019). Argentina está dividida en seis regiones y en la provincia de Salta conviven todas las zonas. La localidad de Vaqueros, departamento La Caldera, se encuentra en la zona bioambiental IIIa, que se caracteriza por veranos calurosos e inviernos no muy fríos (Ente Nacional Regulador del Gas, 2021) (Figura 1).

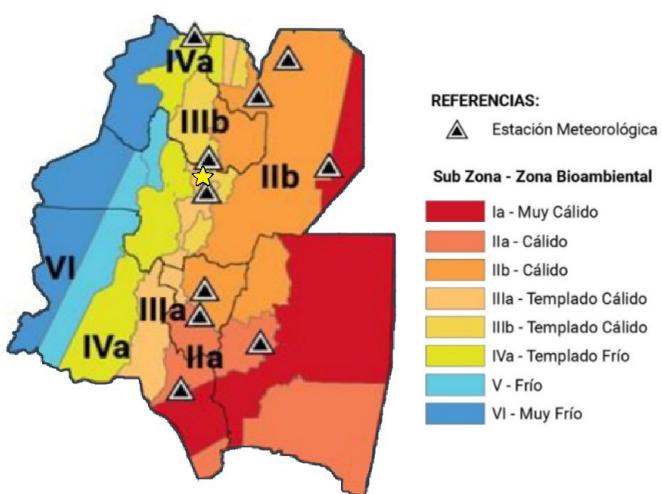


Figura 1:
Zonas bioambientales que conviven en la provincia de Salta y NOA. La estrella amarilla indica la ubicación del municipio de Vaqueros.
Fuente: Ente Nacional Regulador del Gas.

La región donde se ubica Vaqueros es el Valle de Lerma, valle intermontano, que se localiza entre las Sierras Subandinas y la Cordillera Oriental; se encuentra en el centro de la Provincia de Salta. El clima de esta zona es categorizado como subtropical con estación seca. La temperatura media ronda los 18 °C, presentando veranos cálidos y húmedos con precipitaciones concentradas e inviernos secos y templados. Las precipitaciones en el Valle de Lerma suelen ser altas en la zona norte (1000 mm) con disminución en la zona sur (600 mm). La estación meteorológica, ubicada en el Aeropuerto Martín Miguel de Güemes, 10 km al suroeste del centro de la ciudad de Salta registra 738,3 mm como promedio histórico (*Servicio Meteorológico Nacional, 2025*).

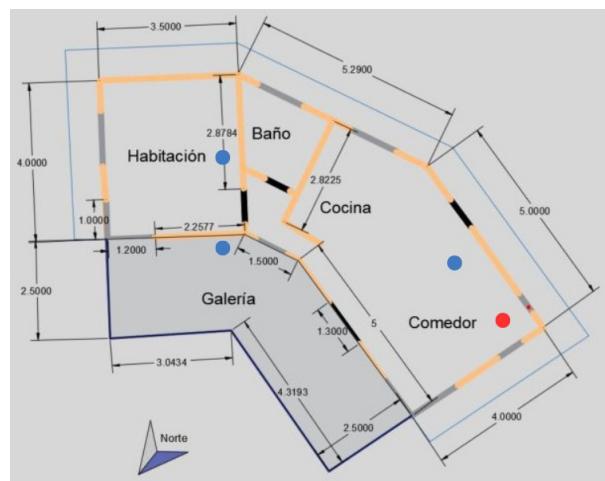
Existen diversas fuentes de datos de radiación solar a nivel mundial. Según el Atlas de Energía Solar de la República Argentina elaborado por Grossi y Gallegos (2007), Vaqueros puede llegar a recibir una Irradiación Global Diaria promedio de 3 kWh/m² durante los meses fríos (mayo a agosto). Durante los meses cálidos (octubre a febrero) esta cifra aumenta a 5 kWh/m².

Descripción de la vivienda y del monitoreo higrotérmico

La vivienda estudiada es unifamiliar y fue construida en el año 2023. Cuenta con un estar-cocina-comedor, baño y dormitorio con un total de 42 m² cubiertos. La orientación es hacia el Norte, es decir, la mayoría de sus aberturas se ubican en esta dirección.

Los muros fueron realizados con la técnica constructiva de la quincha, con un espesor de 0,20 m. Están compuestos por paneles autoportantes constituidos por un entramado de madera y un doble emparrillado. Se conforman por 3 capas: la primera de tierra, paja y arena, (una parte de tierra, dos de arena y una y media de paja) hasta cubrir el panel autoportante; la segunda capa presenta un 15 % de cal; la última capa, el fino, se compone de dos partes de arena zarandeada y una de cal hidratada (1 de cal y 1 de agua).

Figura 2:
a) Frente de la vivienda.
Orientación norte. b)
Croquis de la vivienda. En
círculos azules: ubicación
de los sensores. El círculo
rojo indica la ubicación
de la estufa. Fuente:
elaboración propia.



El techo apoya en los muros perimetrales de la vivienda y fue realizada con tirantes de eucaliptus, cielorraso de machimbre, aislación térmica y cubierta de chapa. La carpintería fue encargada a medida, es de madera con vidrio simple repartido. En la figura 2a se muestra el frente de la vivienda desde la orientación norte.

Para el monitoreo se instalaron dos sensores de temperatura y humedad en el interior de la vivienda, uno en el estar-comedor y otro en el dormitorio. Además, se colocó un sensor exterior, para conocer las condiciones climáticas. El mismo fue instalado al resguardo de la lluvia y la radiación solar. Los sensores se ubicaron a una altura promedio de una persona, lejos de posibles fuentes de calor, con el fin de obtener registros acordes a la sensación térmica de la usuaria. El sensor ubicado en el estar-comedor también fue resguardado de la radiación solar proveniente de las ventanas con dirección norte (Figura 2b). Se cuenta con una fuente de calor que funciona a garrafa que entrega 3600 Kcal/h cuando se encuentra al máximo.

El monitoreo inició el 20 de mayo de 2024 y finalizó el 22 de junio de 2025. La programación para el registro y almacenamiento de datos fue cada 15 minutos, obteniéndose un total de 38.208 (treinta y ocho mil doscientos ocho) mediciones para cada zona. En el interior se utilizaron adquisidores de datos HOBO (modelos U12-12) de temperatura (precisión: $\pm 0,35^\circ\text{C}$; resolución: $0,03^\circ\text{C}$ a 25°C) y humedad ($\pm 2,5\%$; $0,03\%$). Para el exterior se utilizó un adquisidor de datos HOBO MX2302A de temperatura (precisión $\pm 0,25^\circ\text{C}$; resolución $0,02^\circ\text{C}$) y humedad (precisión $\pm 2,5\%$ de 10 % a 90 % y $\pm 5\%$ por debajo de 10 % y por encima de 90 %; resolución $0,01\%$). Los sensores fueron calibrados en el rango de temperaturas a mapear, con calibración de antigüedad menor a 1 año y un error de calibración menor a $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

La radiación solar sobre superficie horizontal en el periodo se obtuvo de la estación meteorológica Davis Vantage Pro ubicada en el predio del INENCO (Universidad Nacional de Salta-CONICET), la cual se encuentra a 5 km de distancia de la vivienda.

Análisis de los datos recolectados

Para cada estación del año, se analizaron las temperaturas interiores de cada zona en comparación a la temperatura exterior. Las condiciones de confort térmico se evaluaron aplicando la Norma ASHRAE 55, empleando el modelo de confort adaptativo. Este modelo se puede aplicar a edificios que no poseen sistemas activos de climatización y está basado en la temperatura media mensual exterior T_m que se calcula como el promedio móvil simple de las treinta temperaturas promedio diarias exteriores anteriores. Resulta importante destacar que, si T_m no está dentro del dominio especificado de $10,0^\circ\text{C}$ a $33,5^\circ\text{C}$, el modelo no se puede aplicar. Además, define dos regiones de confort: 80 % y 90 % de aceptabilidad. Al optar por una aceptabilidad del 80 % el rango de temperatura operativa ($^\circ\text{C}$) está dado por la Ec. 1:

$$(1) \quad T_o = 0,31 * T_m + 17,8 \pm 3,5$$

$$(2) \quad T_m = \frac{T_{od-1} + T_{od-2} + \dots + T_{od-n}}{n}$$

T_m se calcula mediante la Ec. 2:

Donde:

T_{od-i} = promedio de temperatura diaria del i-ésimo día previo.

Se realizaron análisis de temperatura y humedad relativa (HR) por estación tanto del interior como del exterior. Se tomaron los registros de cada hora teniendo un total de 24 datos por día durante la estación iniciando los 21 del mes correspondiente y terminando el día 20. También se analizó una semana fría durante el invierno y una semana calurosa durante el verano.

Resultados

El análisis de los datos higrotérmicos recopilados se presenta de forma estacional, evaluando el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa (HR) en los espacios interiores (dormitorio y estar-comedor) en relación con las condiciones exteriores. La evaluación del confort térmico se realiza en base al modelo adaptativo del Estándar ASHRAE 55.

Comportamiento térmico en otoño

El periodo de monitoreo del otoño abarcó los meses de mayo-junio de 2024 y marzo-mayo de 2025. Como se observa en la Figura 3, se registró una interrupción en la recolección de datos en el exterior durante abril y parte de mayo de 2025. Durante el periodo analizado, la temperatura exterior alcanzó una máxima de 30,5 °C y una mínima de 0,8 °C. A pesar de esta variabilidad externa, las temperaturas interiores en el dormitorio y el estar-comedor mostraron un comportamiento similar entre sí, manteniéndose en su mayoría por encima de los 10 °C en 2024 y superando los 15 °C durante gran parte del otoño de 2025.

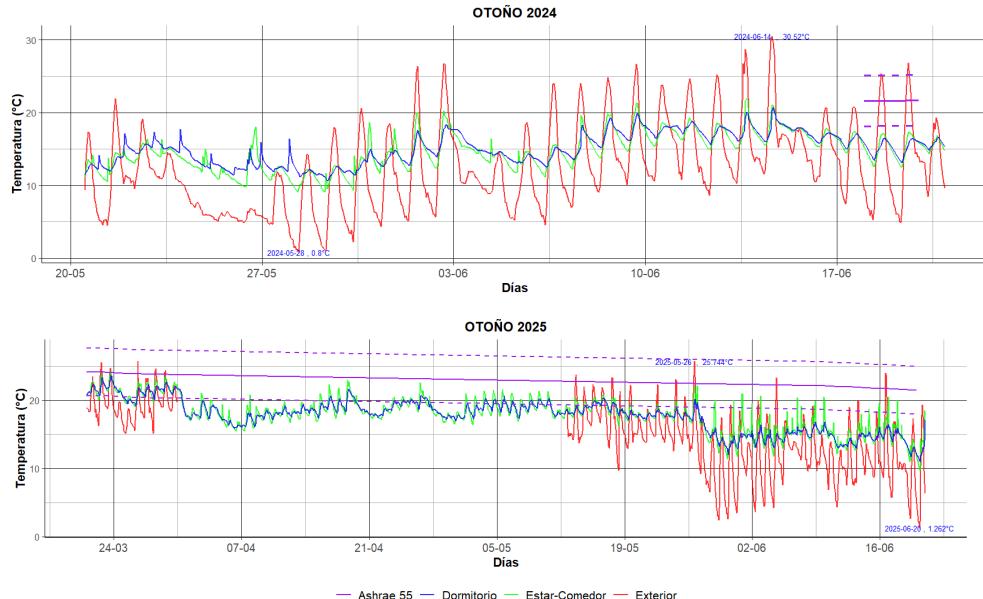


Figura 3:
 Temperatura interior y exterior medidas durante mayo y junio del 2024 y marzo, abril y mayo del 2025. Zona de confort adaptativo delimitada por líneas punteadas.

En cuanto a la humedad relativa interior se mantuvo predominantemente en un rango del 60 % al 80 % en ambos años (Figura 4).

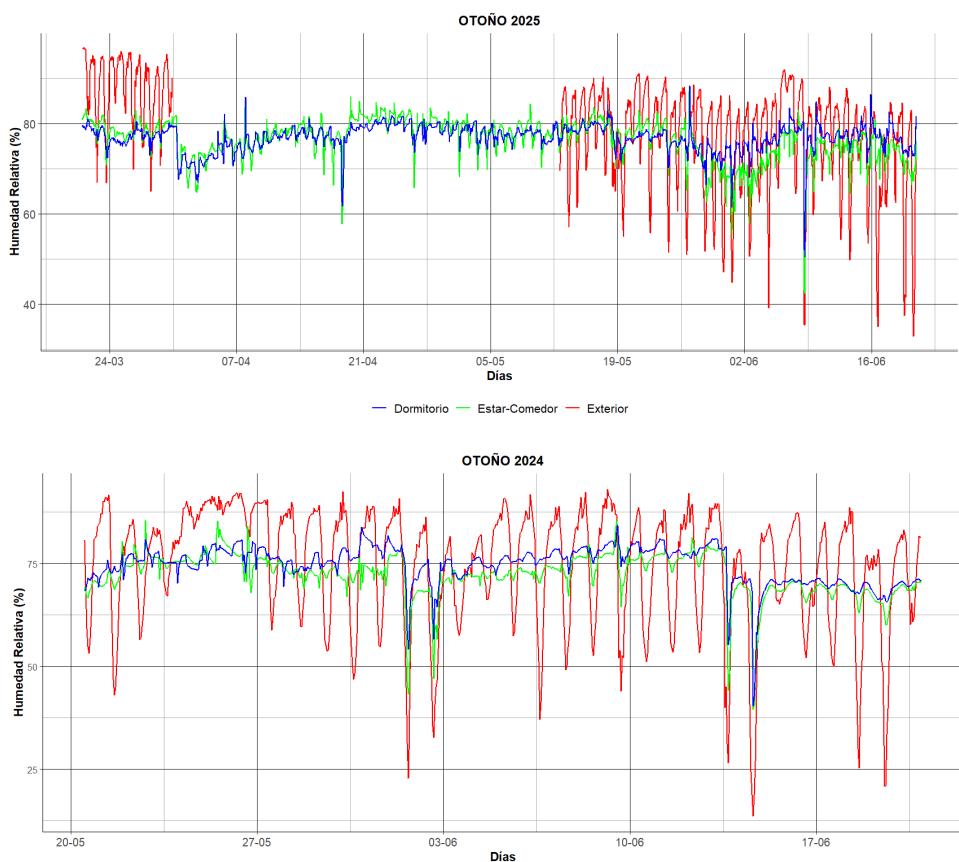


Figura 4:
 Humedad relativa interior y exterior medidas durante el otoño del mes de mayo y parte de junio de 2024 y para el mes de marzo, abril, mayo y junio 2025.

Comportamiento térmico en invierno

En el invierno, las temperaturas exteriores registraron una mínima de -2,1 °C (14 de julio) y una máxima de 33,9 °C (19 de septiembre), con temperaturas medias mensuales de 13,2 °C (junio), 9,9 °C (julio), 12,5 °C (agosto) y 18,1 °C (septiembre). El rango de confort adaptativo ASHRAE-55 para esta estación osciló entre 20,9 °C y 22,5 °C ($T_{o,\text{optima}} \pm 3,5^\circ\text{C}$, para un 80 % de aceptabilidad). En la figura 5, las temperaturas interiores de la vivienda se mantuvieron fuera de esta zona de confort durante la mayor parte del tiempo.

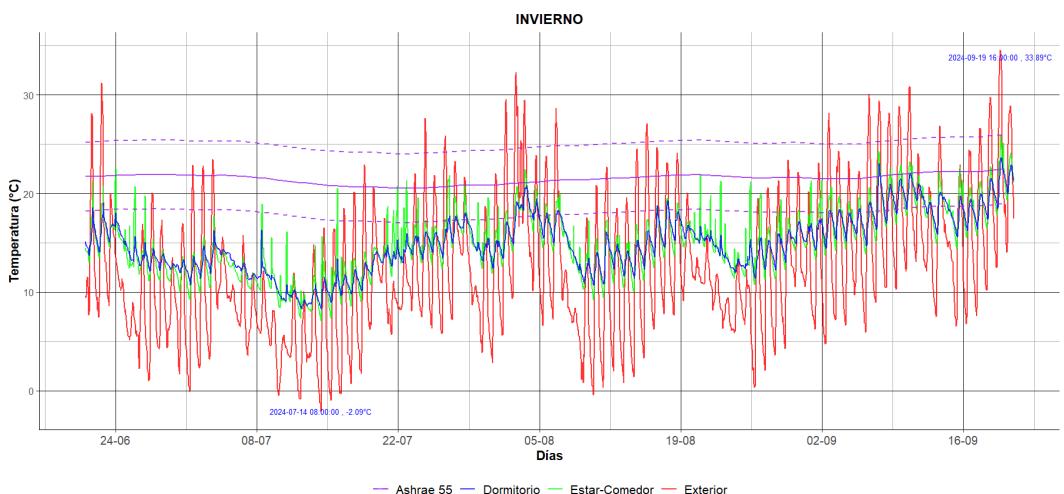
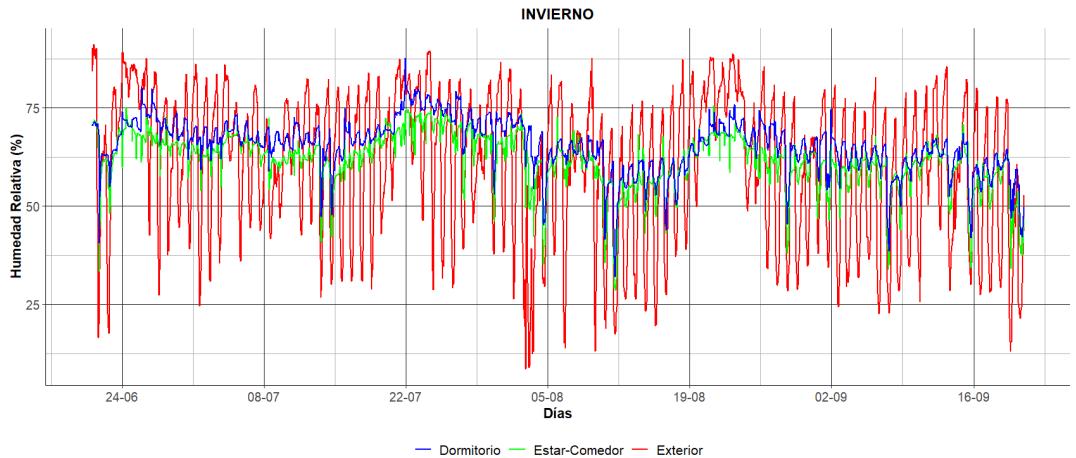


Figura 5:
Temperatura interior y exterior para el periodo del 21 de junio al 20 de septiembre. Zona de confort adaptativo delimitada por línea punteada.

Si bien la temperatura en ambas zonas superó los 10 °C, en el dormitorio permaneció por debajo de los 20 °C durante 1982 de las 2208 horas monitoreadas (aproximadamente el 90 % del tiempo). Un comportamiento similar se registró en el estar-comedor. Se obtuvieron 118 y 183 horas para el dormitorio y el estar respectivamente, donde la temperatura superó los 20 °C. La HR interior durante este periodo se ubicó principalmente entre el 50 % y el 80 %, con 24 días menores del 50 %. En el exterior se registraron 17 picos con valores inferiores al 25 % (Figura 6).

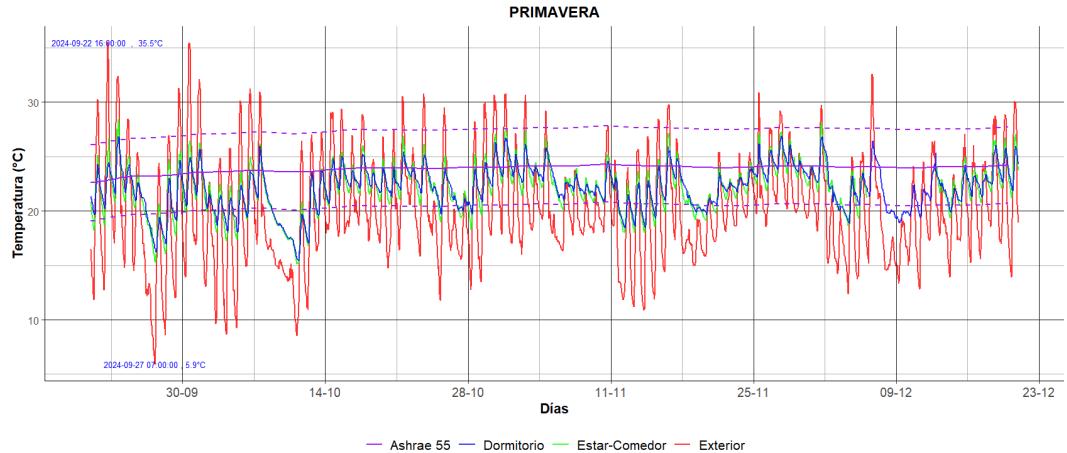
Figura 6:
 Humedad relativa interior y exterior medida durante el periodo del 21 de junio al 20 de septiembre.



Comportamiento térmico en primavera

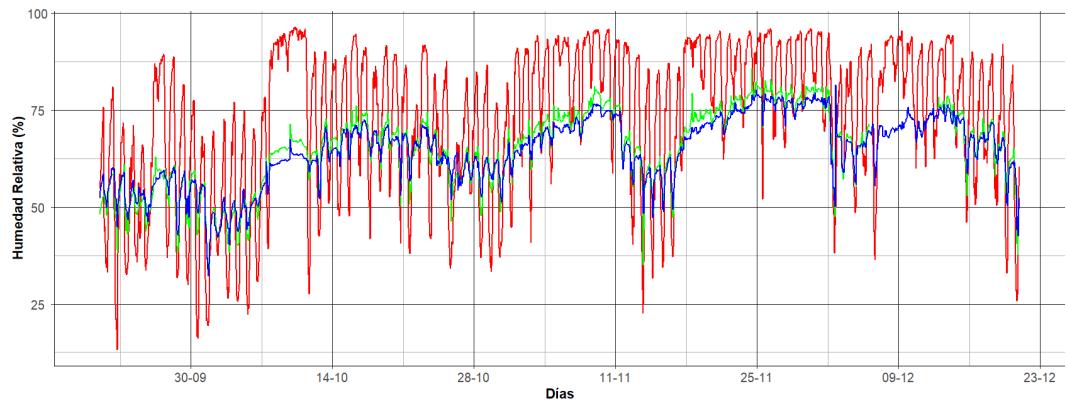
Durante la primavera, en el exterior se registraron 18 días con temperaturas superiores a 30 °C, alcanzando un máximo de 35,5 °C el 22 de septiembre, se registraron solo 6 días temperaturas menores a 10 °C. El rango de confort adaptativo ASHRAE-55 calculado fue de 22,6 °C a 24,3 °C ($T_{o_óptima}$) ±3,5 °C. La figura 7 muestra que las temperaturas interiores de ambas zonas se mantuvieron dentro de los límites de confort a lo largo de la estación.

Figura 7:
 Temperatura interior y exterior para el periodo del 21 de diciembre al 20 de marzo. Zona de confort adaptativo delimitada por línea punteada.



En el curso de 10 días en el mes de diciembre no se midieron datos por falta de batería del sensor ubicado en el estar-comedor. La HR interior mostró una tendencia creciente a lo largo del periodo definido, comenzando en un rango de 38 - 63 % en septiembre y estabilizándose mayormente entre 60 - 75 % hacia el final de la primavera (Figura 8).

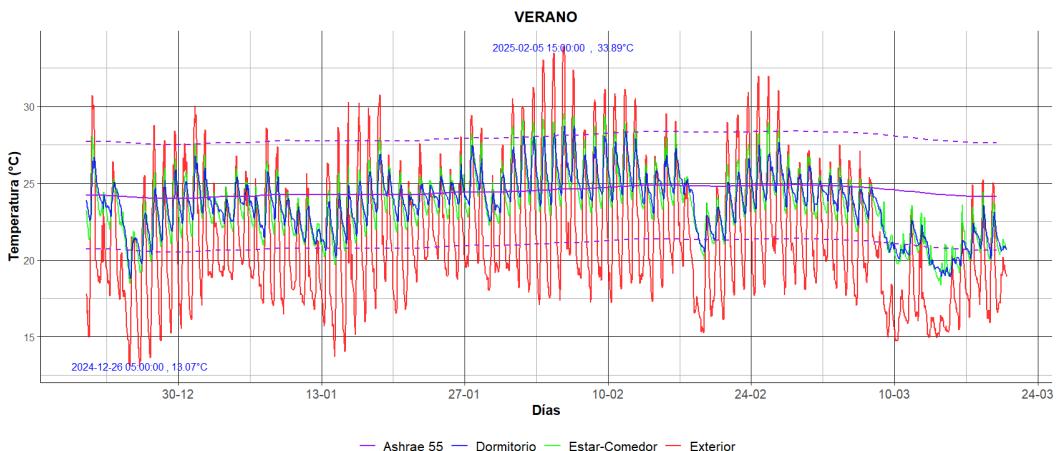
Figura 8:
HR del exterior y de las distintas zonas del interior para el periodo del 21 de septiembre al 20 de diciembre.



Comportamiento térmico en verano

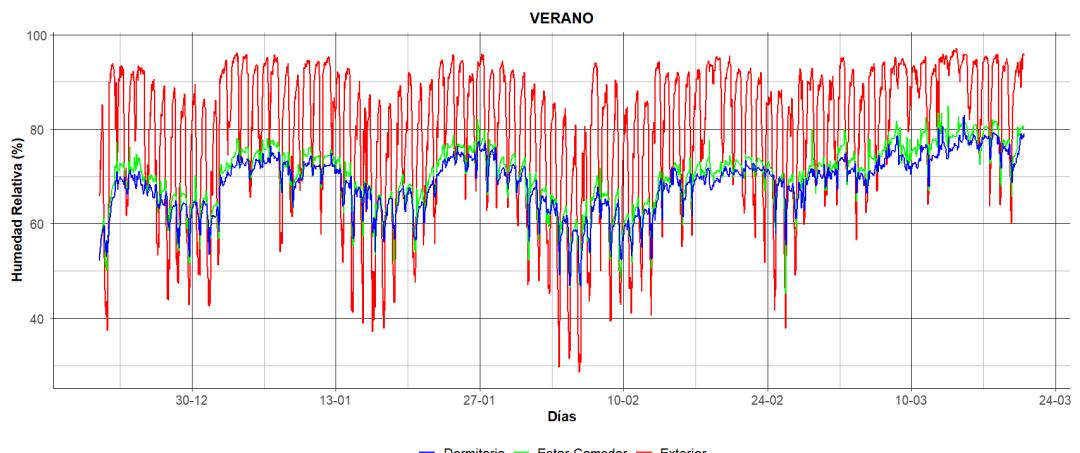
El verano fue la estación con el mayor porcentaje de horas en confort. La temperatura media diaria exterior osciló entre 15,6 °C y 25,0 °C, con 21 días en los que se superaron los 30 °C. El rango de confort adaptativo por Norma ASHRAE-55 se ubicó entre 24,0 °C y 24,8 °C ±3,5 °C (figura 9).

Figura 9:
Temperatura interior y exterior para el periodo del 21 de diciembre al 20 de marzo. Zona de confort adaptativo delimitada por línea punteada.



Además, en la misma figura se observa que las temperaturas interiores se mantuvieron de manera consistente dentro de la zona de confort. En al menos 16 días la temperatura del dormitorio y del estar fueron menores a 20 °C. Respecto a la humedad relativa (Figura 10), los valores interiores oscilaron predominantemente entre el 50 % y el 80 %, con solo 6 días registrando valores por debajo del 40 %, demostrando una atenuación respecto a las condiciones exteriores.

Figura 10:
 HR del exterior y de las distintas zonas del interior para el periodo del 21 de diciembre al 20 de marzo.



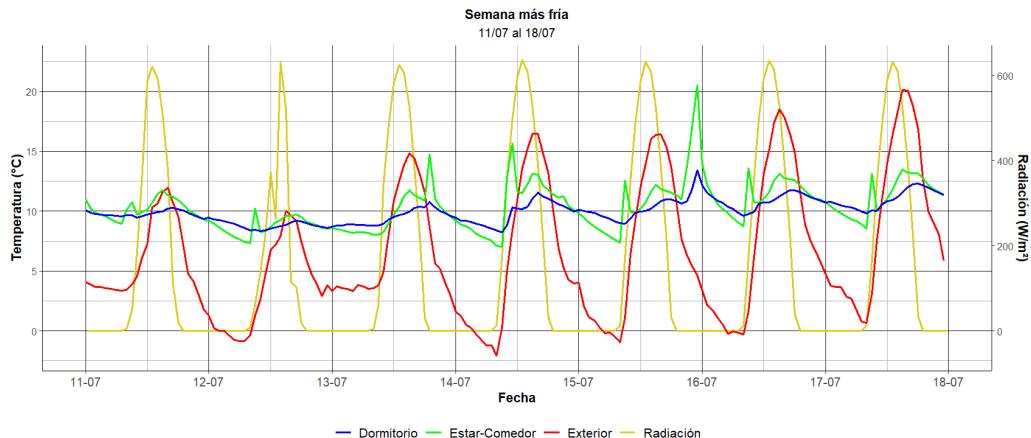
El análisis del porcentaje total de horas en confort por estación (tabla 1) confirma el marcado comportamiento estacional de la vivienda. Se observa un rendimiento térmico óptimo en primavera y, especialmente, en verano, estaciones en las que se superó el 70 % de horas en confort. Por el contrario, en invierno este porcentaje fue inferior al 25 %, aun incluyendo los momentos con uso de sistemas de calefacción por parte de la usuaria.

Tabla 1:
 Porcentaje de horas en confort térmico por estación en que cada zona del interior.

Estación	Confort Dormitorio (% de hs)	Confort en el estar-comedor (% de hs)
Invierno	15,1	19,6
Primavera	80,3	73,4
Verano	90,6	87,0
Otoño	39,7	41,1

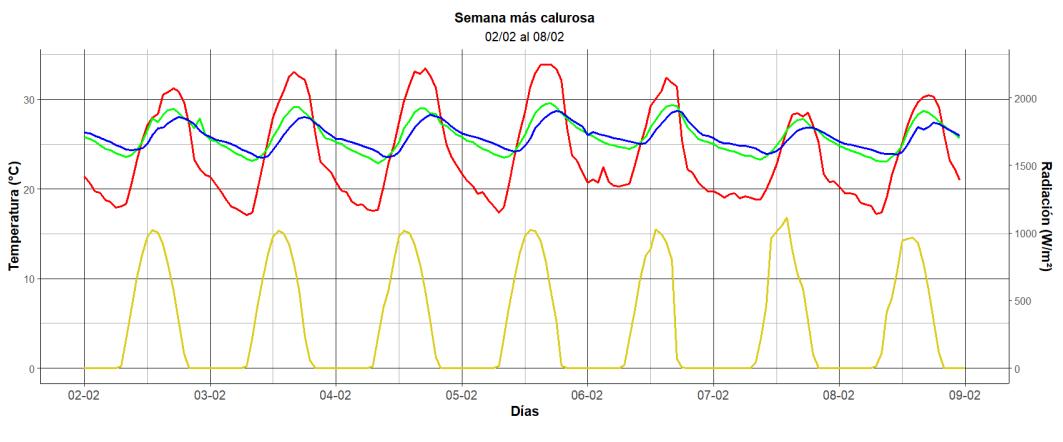
Para profundizar en estos resultados, se analizaron en detalle dos semanas representativas, una de invierno y otra de verano. Durante el periodo del 13 al 18 de julio, la semana de invierno (Figura 11), se observa una clara coincidencia entre los picos de radiación solar y los momentos de mayor temperatura exterior.

Figura 11:
 Datos horarios de radiación, temperatura interior y exterior durante el 11 al 18 de julio de 2024. Registro de temperatura más baja durante el monitoreo (-2.89°C) en el exterior el día 14 a las 8:00:00.



La temperatura del estar-comedor (curva verde) responde a estas ganancias solares, pero también presenta picos abruptos y pronunciados que indican el uso de calefacción. En contraste, la temperatura del dormitorio (curva azul) muestra un comportamiento más estable, alcanzando sus picos un poco después del máximo de radiación, lo que sugiere un efecto de inercia térmica. Durante la noche, el descenso de las temperaturas internas evidencia la ausencia de calefacción. En el momento más frío registrado, con una temperatura exterior de -2°C , el interior se mantuvo en 7°C en el estar-comedor y 8°C en el dormitorio, demostrando la capacidad de la envolvente para mantener un diferencial térmico mínimo de 9°C . Por su parte, el análisis de la semana del 2 al 9 de febrero observado en la figura 12, destaca la capacidad de amortiguamiento térmico de la vivienda. Al igual que en invierno, los picos de radiación coinciden con las temperaturas exteriores más altas. Durante este periodo, la temperatura exterior osciló 16.8°C (entre 17.11°C y 33.89°C), mientras que, en el interior, la oscilación fue de apenas 6.65°C (entre 22.89°C y 29.54°C).

Figura 12:
 Período del 2 al 9 de febrero de 2025. Datos de radiación, temperatura interior y exterior. Temperatura más alta registrada en verano (33.89°C) registrada el 5 de febrero a las 15:00:00.



Discusión

El análisis higrotérmico durante un año entero permitió tener una descripción detallada del desempeño en un clima subtropical con estación seca, permitiendo conocer su comportamiento a lo largo de un ciclo anual. Los resultados confirman que la vivienda presenta un comportamiento estacional marcadamente diferenciado.

Los resultados indican que más del 70 % de las horas se encuentran en la zona de confort adaptativo delimitada al aplicar Norma ASHRAE 55 durante la primavera y el verano. La descripción del otoño queda pendiente, por no contar con datos exteriores continuos. Finalmente, la principal debilidad identificada es el poco confort térmico durante el invierno, donde menos del 25 % de las horas se encontraron dentro del rango definido por la Norma mencionada. Este hallazgo es coherente con otros estudios realizados en Salta en diferentes tipologías edilicias, que también identifican al invierno como la estación crítica (C. Gea Salim et al., 2019; Gea Salim Camila et al., 2020). La discrepancia con los resultados favorables en invierno reportados para quincha en Mendoza (Cuitiño et al., 2010) —donde los muros eran de 0,075 m de espesor y sin revocar— subraya la influencia de las variaciones locales y constructivas, resaltando la necesidad de estudios regionales específicos.

En contraposición, el desempeño de la vivienda durante la primavera y, especialmente, el verano fue bueno, superando el 75 % de las horas en confort. Este comportamiento se atribuye directamente a la conductividad térmica de la quincha. El análisis de la semana de febrero muestra la capacidad del muro para amortiguar la onda de calor exterior, reduciendo una oscilación de 16.8 °C a solo 6.65 °C en el interior, evitando el sobrecalentamiento. Este comportamiento valida empíricamente las propiedades teóricas de la construcción con tierra (Minke, 2008) y demuestra el alto potencial de la quincha para mitigar los efectos de las olas de calor, un riesgo creciente en la región del NOA según el PNAyMC.

Otro hallazgo es el desempeño higroscópico de la envolvente. Se observó que la HR interior se mantuvo consistentemente más baja y estable que la exterior, destacándose en el verano, siendo la estación más húmeda. Esto sugiere que los muros de tierra actúan como un regulador pasivo de la humedad, absorbiendo vapor de agua del ambiente. Esta propiedad es fundamental para el confort en climas subtropicales, ya que temperaturas cálidas con alta humedad generan una mayor sensación de incomodidad. La quincha, por tanto, no solo regula la temperatura, sino que también contribuye a crear un microclima interior más saludable.

Finalmente, este trabajo, al ser un caso de estudio único, presenta limitaciones en cuanto a la generalización de sus resultados. El comportamiento térmico observado responde a las características específicas de esta vivienda. Sin embargo, la riqueza de los datos medidos

durante un año completo sienta una base empírica fundamental e inédita para la región. Los pasos futuros deben orientarse a la calibración de un modelo de simulación energética a partir de estos datos. Dicho modelo permitirá evaluar de manera virtual el impacto de posibles estrategias de mejora (ej. aumento del espesor de la envolvente, incorporación de doble vidriado, mejoras en la aislación del techo, etc.) para optimizar el desempeño en invierno sin comprometer los buenos resultados obtenidos en verano, promoviendo así un diseño adaptado y verdaderamente eficiente para el clima local.

Conclusiones

El objetivo de esta investigación fue obtener una primera evaluación del desempeño higrotérmico de una vivienda de quincha en Salta, basada en datos medidos en el lugar durante un año, y caracterizar el confort de los mismos a partir de la Norma ASHRAE 55 de confort adaptativo. El análisis higrotérmico permitió reconocer para esta vivienda que la primavera y el verano son los momentos del año de mayor tiempo en la zona de confort térmico. El invierno resultó ser la estación con mayor proporción de horas en el desconfort, con más del 75 % del tiempo fuera de la zona de confort. Además, se pudo reconocer la propiedad higroscópica que tienen las paredes de quincha al encontrar una gran amplitud entre la humedad relativa del interior y el exterior. Se deben ampliar los análisis para describir la humedad relativa. Al haber medido continuamente durante las estaciones de temperaturas extremas, el análisis es completo, aunque se podría complementar con la medición faltante de otoño.

Este estudio aporta al conocimiento del comportamiento térmico de la vivienda en las condiciones climáticas actuales. En futuros trabajos se pueden obtener sugerencias de mejoras en la vivienda con el fin de aumentar su porcentaje de horas de confort durante el invierno, reduciendo el uso de fuentes de calor. Esto será posible a través de la simulación y calibración del edificio mediante programas como EnergyPlus y OpenStudio, y con estos resultados conoceremos la efectividad de la calibración. Mejorar el diseño de las viviendas a partir de un análisis de datos medidos promueve soluciones habitacionales sostenibles, que contribuyen a las medidas de adaptación y mitigación del cambio climático de esta región.

Referencias

Cuitiño, M. G., Esteves, A., Maldonado, Graciela, & Rotondaro, Rodolfo. (2010). Análisis y reflexiones sobre el comportamiento higrotérmico de construcciones con quincha: Estudio del caso de un taller experimental en MENDOZA.

- Durán, R., & Condorí, M. (2019). Pobreza energética en la argentina urbana. Validación de un indicador basado en la línea del 10 % de los ingresos totales familiares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 23, 69-80.
- Ente Nacional Regulador del Gas. (2021). Ampliación del Régimen de Zona Fría (p. 16). https://www.enargas.gob.ar/secciones/zona-fria/mapa_bioambiental.pdf
- Franck, L., Puig, S. E., & Bellot, R. J. (2024). Diagnóstico y propuesta higrotérmico para el acondicionamiento de arquitecturas preexistentes. Caso de estudio: El edificio de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la UNL. *Arquitecno*, 24, 1-9. <https://doi.org/10.30972/arq.247998>
- Gea Salim, C. G., Hongn, M., Larsen, S. F., & González, S. (2022). EVALUACIÓN DEL MICROCLIMA INTERIOR DEL MUSEO CASA URIBURU. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26, 11-22.
- Giovino, M. L., & Dellicompagni, P. R. (2023). Desempeño higrotérmico de una vivienda de quincha en alta montaña durante eventos climáticos y modificación de su envolvente. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 51, 47-56.
- Giovino, M. L., & Larsen, S. F. (2024). Desempeño térmico de una vivienda de arquitectura de tierra en la montaña andina. *PENSUM*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.59047/2469.0724.v10.n12.41117>
- Lantschner, B. (2020). Una mirada a la rehabilitación energética profunda. Comisión Nacional de Energía Atómica. Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable. Hojitas de conocimiento, 1(Energía).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023, abril 24). Plan Nacional de Adap-tación y Mitigación al Cambio Climático. RESOL-2023-146-APN-MAD.
- Ministerio de Interior, obras públicas y vivienda. (2019). Manual de vivienda sustenta-ble (1.a ed.).
- Minke, G. (2008). Manual para la construcción en Tierra (4.a ed.). Fin de siglo. https://dr.capsf.ar/wp-content/uploads/sites/3/2021/10/Manual_de_construccion_en_tie-ra_-Gernot_Minke_-1.pdf
- Servicio Meteorológico Nacional. (2025, septiembre 10). Servicio Meteorológico Nacio-nal. <https://www.smn.gob.ar/>
- United Nations Environment Programme. (2025). Not just another brick in the wall: The solutions exist - Scaling them will build on progress and cut emissions fast. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. United Nations Environ-ment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/47214>
- Wieser, M., Onnis, S., & Meli, G. (2020). Desempeño térmico de cerramientos de tierra alivianada: Posibilidades de aplicación en el territorio peruano. *Revista de Arquitectura* (Bogotá), 22(1), Article 1. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2633>

► **Monitoreo higrotérmico y confort en CAPS de San Miguel de Tucumán**

Hygrothermal performance and user comfort in CAPS of San Miguel de Tucumán

Amalita Fernández¹, Beatriz S. Garzón²

Artículos científicos

Citar: Fernandez, A. (2025) Monitoreo higrotérmico y confort en CAPs de San Miguel de Tucumán. *Teks del Sud*, 6, pp. 67-77

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar y diagnosticar la problemática del confort térmico en una tipología constructiva de Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en San Miguel de Tucumán. Para ello, se investiga el comportamiento higrotérmico del edificio a través de monitoreos realizados durante dos períodos, uno cálido y otro frío, lo cual evidencia un desempeño higrotérmico deficiente de la envolvente. Los resultados muestran condiciones de inconfort térmico significativas para los ocupantes, con una alta insatisfacción especialmente durante el período cálido. Posteriormente, se valida la situación de confort utilizando los índices PMV y PPD, confirmando un bajo rendimiento que no cumple con los estándares deseables. Los hallazgos de este estudio aportan conocimiento relevante para el desarrollo de futuras estrategias de diseño que mejoren la eficiencia y habitabilidad de estas construcciones.

Palabras clave: centros de salud, comportamiento higrotérmico, confort, envolvente edilicia.

¹ Grupo Hábitat Saludable y Sustentable, FAU UNT- CONICET. e-mail: afernandez@herrera.unt.edu.ar

² Grupo Hábitat Saludable y Sustentable, FAU, UNT- CONICET. e-mail: bgarzon2022@gmail.com

Abstract

The main objective of this work is to characterize and diagnose the thermal comfort issues in a specific building typology of Primary Health Care Centers (CAPS) in San Miguel de Tucumán. For this purpose, the building's hygrothermal behavior is investigated through monitoring carried out during two periods, one warm and one cold, which reveals a deficient hygrothermal performance of the building envelope. The results show significant thermal discomfort conditions for the occupants, with high dissatisfaction, especially during the warm period. Subsequently, the comfort situation is validated using the PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) indices, confirming a low performance that does not comply with desirable standards. The findings of this study provide relevant knowledge for the development of future design strategies that improve the efficiency and livability of these constructions.

Keywords: health centers, hygrothermal performance, thermal comfort, building envelope.

Introducción

El desafío global de mitigar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha posicionado al consumo energético como un área de investigación crítica (Recalde et al., 2018). En este contexto, el sector de la edificación emerge como un actor principal, siendo responsable de más del 40 % del consumo energético mundial y contribuyendo entre un 25 % y un 30 % de las emisiones anuales de dióxido de carbono (CO_2) (Muñoz Rojas et al., 2023; Costantini Romero y Francisca, 2022). Esta situación se refleja en Argentina, donde el 37 % del consumo energético nacional es atribuible al sector edilicio, con la climatización como el factor más relevante (Kuchen y Kozak, 2020). Dentro de este consumo, el subsector Salud, clasificado en el sector Comercial y Público, es de particular interés debido a su función social y su constante demanda de energía (Urteche et al., 2022).

La ineficiencia energética en las edificaciones, especialmente en climas templados y cálidos, es una problemática documentada que evidencia un alto potencial de ahorro (Viegas et al., 2020). Específicamente en la provincia de Tucumán, diversos trabajos han estudiado el comportamiento térmico de los Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS), concluyendo que la envolvente de estas construcciones es ineficiente y no cumple con los estándares de confort mínimo recomendados (Fernández y Garzón, 2020). Esto se debe, en gran medida, a la escasa aislación térmica y a que las remodelaciones históricas de estos edificios se han enfocado en aspectos funcionales o en la instalación de equipos de climatización activos, sin considerar estrategias pasivas de diseño.

Frente a esta realidad, el presente trabajo se propone caracterizar y diagnosticar la problemática del confort térmico en una tipología constructiva recurrente de los CAPS en San Miguel de Tucumán. Esto se lleva a cabo a través de monitoreos *in situ* durante dos períodos, uno cálido y otro frío, con el objetivo de obtener datos fehacientes. Los resultados de esta investigación aportarán información valiosa para el desarrollo de futuras estrategias de diseño que mejoren la eficiencia energética y la habitabilidad de estas construcciones, lo que a su vez contribuirá a la reducción del consumo energético y a un mayor bienestar para los usuarios.

Metodología

La metodología empleada para este estudio se basa en un enfoque cuantitativo, combinando cálculos normados, mediciones *in situ* y análisis de confort térmico. El objetivo es diagnosticar el comportamiento higrotérmico del caso de estudio mediante una evaluación de su envolvente y las condiciones ambientales internas.

El comportamiento higrotérmico de la envolvente se evaluó siguiendo las directrices de las normas IRAM. En primer lugar, se calculó el coeficiente de transmitancia térmica (K) conforme al procedimiento establecido en la norma IRAM 11601 (2002). Para la interpretación de los resultados, se tomaron como referencia los niveles de confort higrotérmico por zona bioclimática definidos en la norma IRAM 11605 (2009) (Nivel A: ecológico, Nivel B: recomendado, Nivel C: mínimo) y el Nivel A/B, incorporado en la norma IRAM 11900 consolidada (2019). Adicionalmente, se analizaron los riesgos de condensación superficial e intersticial utilizando la metodología de cálculo detallada en la norma IRAM 11625 (2000).

Para el monitoreo *in situ*, se utilizaron cinco sensores HOBO UX100-003, capaces de registrar la temperatura y la humedad relativa del aire. Estos sensores tienen un rango de operación de -20 °C a 70 °C y un error de ±0,21 °C. Previo al estudio, los sensores fueron sometidos a una prueba de calibración en un sistema de aire acondicionado con un termostato ajustado a 26 °C, confirmando su correcta operatividad. La toma de datos se realizó cada 15 minutos durante un periodo de entre diez y quince días para cada una de las cuatro estaciones. Los sensores se colocaron en muros interiores a la altura de la ocupación humana, evitando la exposición directa a la radiación solar. Los datos climáticos exteriores de temperatura, humedad y radiación solar se obtuvieron de la base de datos de la estación meteorológica El Colmenar (EEAOC), ubicada aproximadamente a 8 km del sitio de estudio.

El análisis de confort térmico se llevó a cabo con el software SIMEDIF, un programa de diseño y simulación desarrollado en el Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) (Flores Larsen y Lesino, 2001), utilizando el estándar ANSI/ASHRAE 55. Para el cálculo, se asumió que la temperatura operativa era similar a la temperatura regis-

trada por los sensores. Dicho estándar permite estimar la sensación de confort mediante el PMV (Voto Medio Predicho) y el PPD (Porcentaje de Personas Insatisfechas). La metodología analítica determina estas variables a partir de datos sobre el índice de arropamiento, la tasa metabólica, la velocidad del aire, la temperatura operativa y la humedad. La zona de confort se define como el rango de condiciones en el que al menos el 80 % de las personas, en actividad sedentaria o ligera, consideran el ambiente térmicamente aceptable. Las condiciones de cálculo empleadas fueron: un índice de arropamiento de 0,5 clo para el período cálido, una tasa metabólica de 1,3 met y una velocidad mínima del aire de 0,1 m/s.

Resultados

Descripción del objeto de estudio

El presente trabajo de investigación se centra en el Centro de Atención Primaria de la Salud (CAPS) Villa Luján, una edificación representativa de un prototipo constructivo de un periodo histórico específico en la ciudad de San Miguel de Tucumán. Este edificio comparte características formales, funcionales y constructivas que se repiten en otras estructuras similares de la región, lo que lo convierte en un caso de estudio idóneo. Su emplazamiento es en esquina, posee una superficie cubierta de 262,9 m². Sus fachadas se distribuyen en la línea municipal, mientras que dos caras colindan con edificios vecinos. La ventilación de los espacios interiores se realiza de forma directa, con excepción del salón principal.

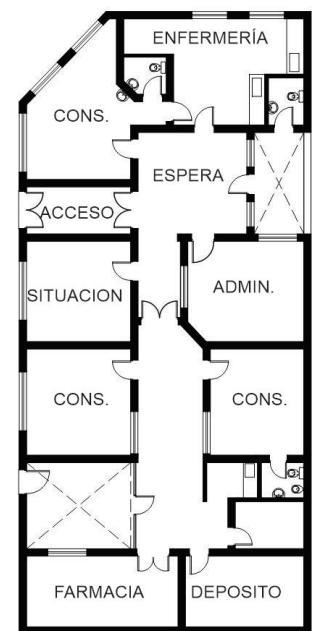


Figura 1.
Emplaza-
miento y
planimetría
del caso de
estudio.

En términos de distribución funcional, el CAPS cuenta con tres consultorios para distintas especialidades médicas, una enfermería, depósitos, una sala de admisión y una sala de reuniones. Los sanitarios están diferenciados para el uso del público y del personal. La circulación se organiza a través de un único acceso y un pasillo central que se divide en dos áreas, la segunda con un acceso más restringido. Ambos espacios de circulación funcionan como salas de espera.

La materialidad del edificio se compone de muros exteriores de ladrillo cerámico macizo de 0.30 m de espesor, revocados en ambas caras. La cubierta consiste en una losa maciza con cielorraso aplicado, sobre la cual se ha instalado un sobretecho de chapa en algunos sectores para resolver problemas de filtración de agua. Los muros interiores también se resuelven con mampostería de ladrillo macizo, el piso es de granito reconstituido, colocado con mezcla de asiento sobre contrapiso.

Comportamiento higrotérmico de la envolvente

Para evaluar el desempeño higrotérmico de la envolvente, se analiza el cumplimiento de lo establecido en normas IRAM. Para el caso del muro (tabla 1), se obtiene un coeficiente K de 1,96 W/m²K, el cual no clasifica dentro de los niveles de confort higrotérmicos establecidos por IRAM 11605 para invierno ni para verano. A su vez, se observa la existencia de riesgos de condensación intersticial. La situación de la solución constructiva del techo resulta similar (tabla 2). Su coeficiente de transmitancia térmica no cumple con ninguno de los niveles establecidos por IRAM para invierno y verano. Se evidencia también, riesgos de condensación intersticial.

Tabla 1.
Características higrotérmicas de muros exteriores.

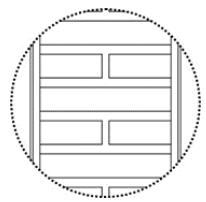
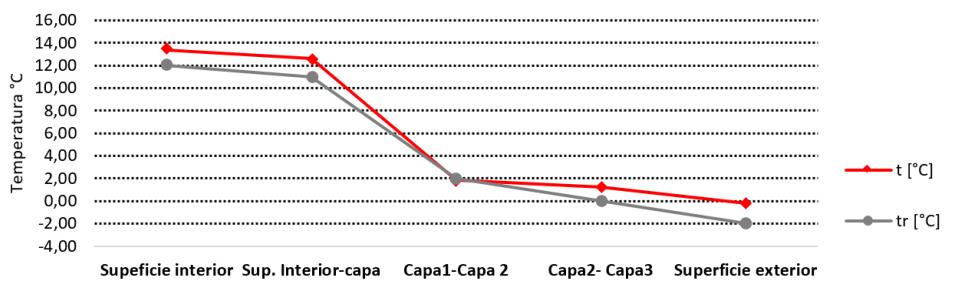
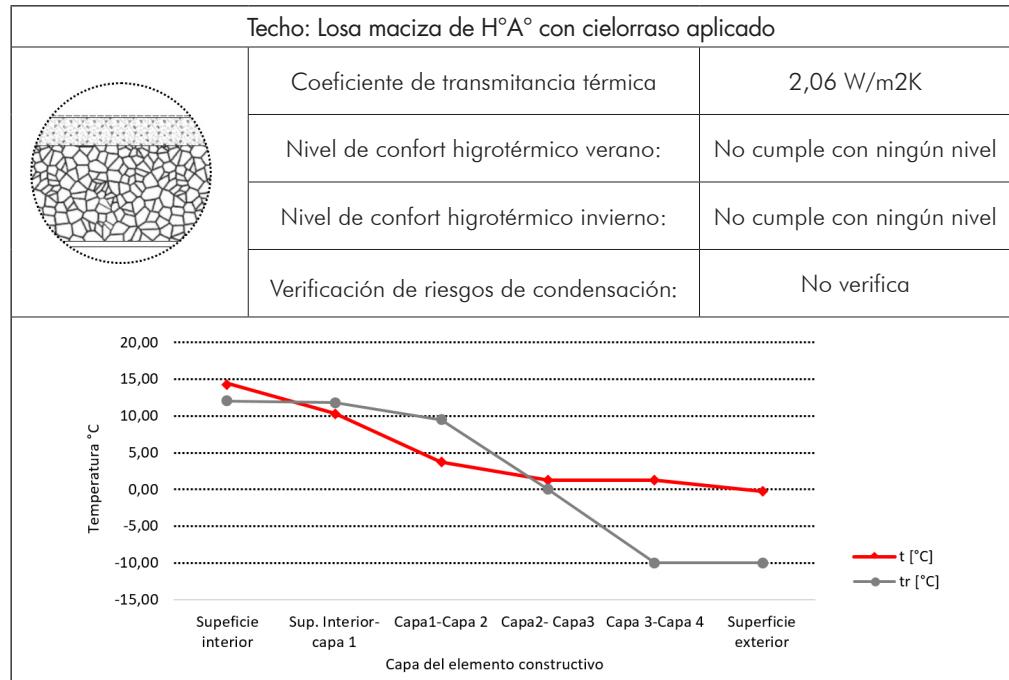
Muro exterior: Ladrillo cerámico macizo revocado en ambas caras		
	Coeficiente de transmitancia térmica	1,96 W/m ² K
	Nivel de confort higrotérmico verano:	No cumple con ningún nivel
	Nivel de confort higrotérmico invierno:	No cumple con ningún nivel
	Verificación de riesgos de condensación:	No verifica
		
1 Capa del elemento constructivo		

Tabla 2.

Características higrotérmicas del techo.



Monitoreo higrotérmico

Para llevar a cabo el monitoreo, se colocan cinco sensores en distintos locales. La posición de los sensores se define en función de la orientación y adyacencia de los locales, atendiendo a posibles variaciones en el comportamiento térmico (Figura 1). Por otro lado, también resulta una condicionante para la selección de los locales a monitorear el resguardo de los sensores térmicos, por ello se seleccionan aquellos donde siempre permanezca el personal junto con los pacientes. Estos son: consultorio de odontología (1), sala de situación (2), ginecología (3), administración (4) y enfermería (5). La elección de los locales, además considera distintas orientaciones y adyacencias.

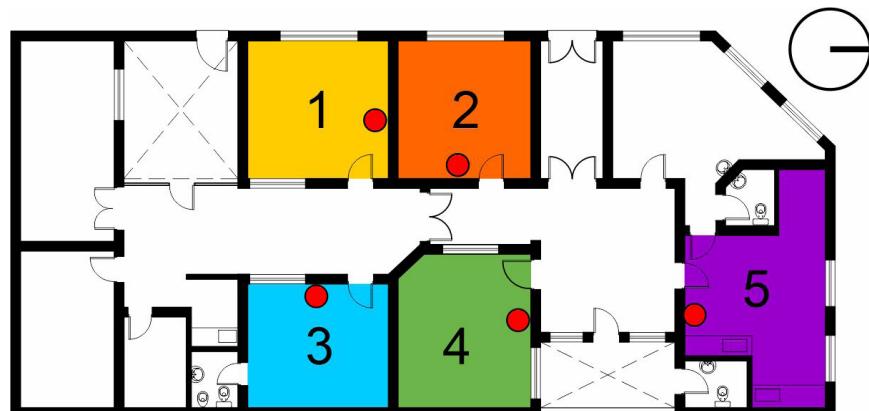
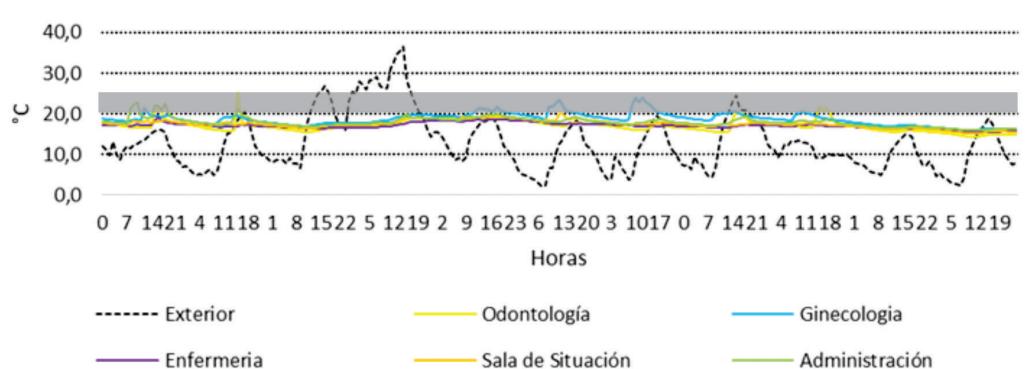


Figura 1.
Ubicación
de sensores
térmicos
en caso de
estudio.

El monitoreo higrotérmico del CAPS se realiza en los períodos críticos del año, uno frío y uno cálido, para caracterizar el comportamiento térmico del edificio. El estudio en el período frío se lleva a cabo del 7 al 17 de julio de 2022, y el monitoreo para el período cálido abarca del 17 al 30 de noviembre de 2022. En ambos casos, se registran los valores de temperatura interior en cada espacio, los cuales se correlacionan con la temperatura exterior de la estación meteorológica El Colmenar.

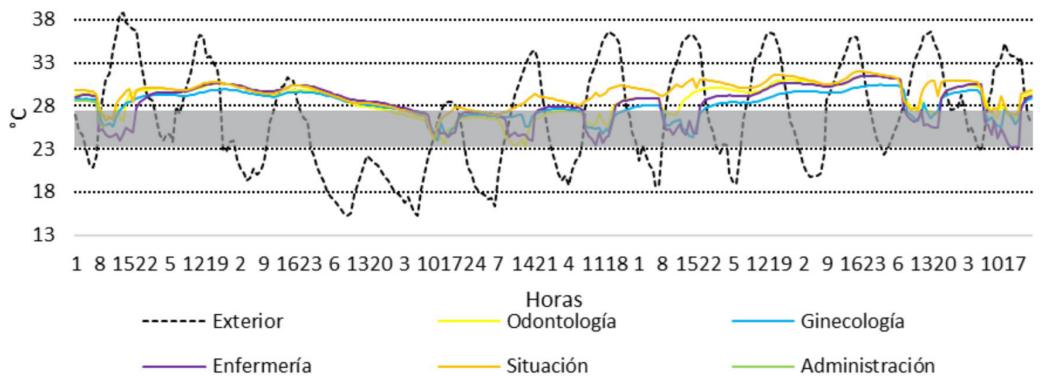
El gráfico consignado en la figura 2, exhibe los valores obtenidos para el período de invierno. En él, el análisis de los datos evidencia el efecto de amortiguamiento térmico que proporciona la masa de la envolvente edilicia. La inercia térmica de los muros de ladrillo cerámico de 0,30 m y la losa maciza permite que la edificación retrase y suavice las fluctuaciones de la temperatura exterior. Sin embargo, el monitoreo también advierte que, durante las horas de funcionamiento del CAPS, se activan sistemas de calefacción para mantener el confort interior, demostrando que la edificación combina el rol pasivo de la envolvente con el apoyo activo para lograr las condiciones de confort deseadas.

Figura 2.
Valores de temperatura para el monitoreo higrotérmico en el período de invierno.



De manera similar, en el período cálido, la inercia térmica de la envolvente masiva retrasa la transferencia de calor del exterior, contribuyendo a que el interior se mantenga más fresco en comparación con el exterior. No obstante, las mediciones revelan picos de temperatura que solo pueden explicarse por la puesta en marcha de sistemas de refrigeración activos durante las horas de operación. Esto demuestra que, si bien la masa térmica actúa como un amortiguador, el confort interior también depende del apoyo de la refrigeración artificial para mitigar los efectos del calor extremo.

Figura 3.
Valores de temperatura para el monitoreo higrotérmico en el período cálido.



Confort térmico

El análisis de confort térmico para el período frío y el período cálido se basa en los mismos parámetros, consignados en el estándar ANSI-ASHRAE 55. Se consideran horas confortables, aquellas con un PMV entre -0,5 y 0,5 y un PPD menor al 15 %.

Durante el invierno, se analiza un total de 264, este análisis indica que las condiciones exteriores son generalmente desfavorables, con solo un 6 % de horas en zona de confort. No obstante, este porcentaje aumenta considerablemente, hasta un 10,5 %, cuando se restringe el estudio al horario de funcionamiento del CAPS, de 7 a 19 horas. Esto sugiere que, durante este lapso, las condiciones externas resultan más tolerables. La distribución del PMV para el exterior en esta estación muestra una predominancia de condiciones frescas y frías, 66 % en total; se detectan unas pocas horas calientes, 1 %, no hay horas cálidas; un 16 % de horas ligeramente cálidas, 6 % de horas neutrales, 18 % ligeramente frescas, 27 % frescas y 39 % frías. En los espacios interiores, se observan contrastes notables: mientras que Ginecología presenta un 27.97 % de confort durante el horario de operación, el área de Enfermería no registra ninguna. En la tabla 3, se exhiben los porcentajes de horas de confort para los distintos espacios monitoreados.

En el análisis del período frío, que contempló un total de 264 horas, solo 17 horas (un 6 % del total) registraron condiciones de confort exterior. No obstante, al considerar únicamente el horario de funcionamiento del CAPS (7:00 a 19:00 horas), este porcentaje de confort aumenta ligeramente al 10.5%, sugiriendo que, a pesar de las condiciones invernales, las horas de operación del Centro de Salud son térmicamente más favorables en el exterior. La distribución del Índice PMV para el exterior en este periodo mostró una marcada tendencia hacia el frío, con un 39% de horas clasificadas como frías, seguidas por un 27% frescas, 18% ligeramente frescas, 6% neutrales, 16% ligeramente cálidas y solo un 1% calientes. Al comparar estos resultados con los interiores, se observa que la sala de Ginecología destaca significativamente, alcanzando un 27.97% de horas de confort durante el horario de operación, mientras que la sala de Enfermería no registró ninguna hora de confort.

Tabla 3.
Porcentaje de horas de confort para el período frío.

	Exterior	Admin.	Odontología	Ginecología	Enfermería	Situación
% horas de confort totales	6 %	4.92 %	3.78 %	16.28 %	0 %	0.75 %
% horas de confort 7 a 19	10.48 %	9.09 %	6.99 %	27.97 %	0 %	1.39 %

En el período cálido, se analiza un total de 289 horas. El 26,48 % de estas horas corresponden a confort exterior. Sin embargo, al restringir el análisis al horario de funcionamiento, el porcentaje de confort disminuye notablemente a un 14,58 %. Esto indica que, a diferencia del período de invierno, las horas de operación del Centro de Salud son térmicamente desfavorables en el exterior. La distribución del PMV para consiste en un 19 % de horas calientes, 19 % cálidas, 23 % ligeramente cálidas, 26 % neutrales y 11 % ligeramente frescas. No se detectan horas frías o frescas. Al analizar los espacios interiores, se observa que los porcentajes de confort disminuyen en comparación con el exterior, destacando que Enfermería alcanza un 14,58 % de confort durante el horario de operación, mientras que Situación muestra un porcentaje muy bajo, de solo un 0,69 %.

Tabla 4.
Porcentaje de horas de confort para el período estival.

	Exterior	Odontología	Ginecología	Enfermería	Situación
% horas de confort totales	26.48 %	3.48 %	1.74 %	7.31 %	0.35 %
% horas de confort 7 a 19	14.58 %	6.94 %	3.47 %	14.58 %	0.69 %

Conclusiones

En el presente estudio se diagnosticó el comportamiento higrotérmico, durante los períodos frío y cálido, de una tipología edilicia recurrente en los Centros de Atención Primaria de la Salud (CAPS) más primitivos de San Miguel de Tucumán. Mediante un análisis comparativo de datos climáticos y mediciones de las condiciones interiores, se logró identificar las deficiencias de desempeño de esta arquitectura en relación con el clima local, siendo el periodo cálido el que presenta mayores desafíos. Los principales hallazgos confirman deficiencias en el comportamiento térmico en ambos períodos. A partir de las curvas de temperatura interior, se hace evidente la dependencia del uso de sistemas activos de climatización durante las horas de funcionamiento. No obstante, a pesar de su operación, las mediciones revelan que no se logran garantizar, de manera consistente, las condiciones de confort requeridas por los usuarios.

Esta falta de consistencia en el confort apunta a una deficiencia de diseño de la envolvente edilicia. Si bien se observa que la arquitectura analizada no logra satisfa-

cer las demandas térmicas por sí misma, resultaría inconcluso afirmar que las ineficiencias del diseño no pueden ser compensadas por sistemas activos, ya que en este estudio no se analizó la potencia instalada ni el rendimiento específico de los equipos utilizados en el CAPS. Sin embargo, la evidencia de su uso continuo sin alcanzar el confort pleno sugiere que existe un desajuste entre las prestaciones de la arquitectura y la capacidad de la climatización existente para compensarlas eficientemente, lo cual implica la necesidad de implementar medidas que mejoren el comportamiento térmico y energético del edificio.

EL principal aporte de este trabajo radica en la identificación y documentación de la ineficiencia recurrente de esta tipología constructiva. Al confirmar que esta arquitectura repite falencias de diseño en términos de confort higrotérmico en un edificio representativo. Para futuras intervenciones y rehabilitaciones de esta tipología, las pautas de mejora deben establecer una clara jerarquía, dada la ineficiencia documentada en el caso de estudio. La prioridad debe ser: 1º mejorar la aislación térmica en la envolvente (cubiertas, muros y pisos) y, posteriormente, 2º realizar un correcto dimensionamiento de los equipos activos de calefacción/refrigeración, para garantizar tanto el confort como la eficiencia energética.

Referencias

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2020). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. (ANSI/SHRAE 55).
- Costantini Romero, A. B., y Francisca, F. M. (2022). Construcción con bloques de suelo cemento como alternativa sostenible para envolvente edilicia. Hábitat Sustentable, 12, 114-125. <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.08>
- Fernández, A. y Garzón, B. (2020). Rehabilitación de muros exteriores en centros de salud en San Miguel de Tucumán para su eficiencia térmico-energética. AVERMA, 24, 31-40. <https://avermaexa.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/37/16>
- Flores Larsen, S., y Lesino, G. (2001). Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios. Energías Renovables y Medio Ambiente, 9, 15-24. INTI (2005). Ahorro y certificación energética: la envolvente de los edificios. Saber cómo, (27), 4.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2000). Aislamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Verificación del riesgo de condensación por vapor de agua (IRAM 11625).
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002). Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. (IRAM 11601).

- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2009). Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmision térmica en cerramientos opacos. (IRAM 11605).
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2019). Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética. (IRAM 11900).
- Kuchen, E. y Kozak, D. (2020). Transición energética argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de la vivienda social. Caso de estudio: Vivienda de Barrio Papa Francisco. Revista hábitat sustentable, 10(1), 44-55 <http://dx.doi.org/10.2320/07190700.2020.10.01.04>
- Muñoz Rojas, R., Figueroa-San Martín, R., y Saelzer Fuica, G. (2023). Análisis comparativo en la rehabilitación de envolvente térmica de cerramientos educacionales con criterio ambiental. AUS [Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad], (33), 04-11. <https://doi.org/10.4206/aus.2023.n33-02>
- Recalde, M., Zabaloy, F. y Guzowski, C. (2018). El Rol de la Eficiencia Energética en el Sector Residencial para la Transición Energética en la Región Latinoamericana. [Archivo PDF]. Trayectorias, 20(47), pp. 77-102. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/97202>
- Urteneche, E., Fondoso-Ossola, S. T., Martini, I., Barbero, D. A. y Discoli, C. A. (2022). Metodología para el mejoramiento 272 de la eficiencia energética de la envolvente edilicia del sector salud. Estoia. Revista de la Facultad de Arquitectura y 273 Urbanismo de la Universidad de Cuenca, 11(21), 209-228. <https://doi.org/10.18537/est.v011.n021.a12>
- Viegas, G. M., Barbero, D. A., Chévez, P. J., Martini, I., y Discoli, C. A. (2020). Reciclado masivo de la envolvente urbano-edilicia basado en procesamiento digital de imágenes, La Plata, Argentina. Revista de Urbanismo, 43, 151. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2020.57522>

06

- ▶ Experiencias de cátedra

► **Mapeo socioambiental de la ciudad de Santiago del Estero:
Hacia la construcción de un escenario urbano alternativo.**

Socio-environmental mapping of the city of santiago del estero.
Towards the construction of an alternative urban scenario.

Matías Ortega¹, María Laura Cortez², Camila Rubio²

Artículos científicos

Citar: Ortega, M. et al. (2025)
Mapeo socioambiental de la ciudad de Santiago del Estero:
Hacia la construcción de un escenario urbano alternativo.
Teks del Sud, 6, pp. 79-91

Resumen

La cartografía social se ha constituido como una herramienta valiosa para la construcción de procesos participativos, que recoge las experiencias vividas en un territorio y con el potencial de reflexionar críticamente sobre un hábitat considerado. El objetivo de este trabajo es visibilizar los principales resultados de un mapeo colectivo, vinculado a las problemáticas y situaciones socioambientales relevantes identificadas en la ciudad de Santiago del Estero. Para la generación de datos se trabajó mediante un mapeo colectivo, por lo que la metodología fue cualitativa y participativa. Los resultados más significativos están vinculados a las tendencias del crecimiento urbano, a la movilidad y accesibilidad, a las problemáticas de gestión de residuos, a las prácticas de recreación y ocio de la sociedad, entre otras. Se concluye que la herramienta del mapeo colectivo es apropiada para reflexionar sobre la ciudad, identificando en ella diferentes situaciones problemáticas vinculadas a un transporte público insuficiente y baja conectividad urbana, falta de equipamiento y espacios verdes de calidad, déficit en infraestructura básica, altos niveles de pobreza y analfabetismo, y la presencia de basurales y contaminación ambiental. Finalmente, se considera georreferenciar la información en instancias futuras.

Palabras clave: mapeo colectivo, diseño urbano sustentable, ecología urbana

¹ Profesor Adjunto de la cátedra de Diseño Urbano Sustentable 1 y 2 de la carrera de Arquitectura en la Facultad de Ciencias para la Innovación y el Desarrollo de la Universidad Católica de Santiago del Estero (FCID UCSE).
e-mail: matias.ortega@ucse.edu.ar

² Estudiantes avanzadas de la carrera de Arquitectura en la FCID UCSE.
e-mail: marialauracortezoi@gmail.com - cdorubio@gmail.com

Abstract

Social cartography has become a valuable tool for building participatory processes. It captures lived experiences within a territory and possesses the potential for critical reflection on a given habitat. The objective of this paper is to present the main results of a collective mapping project linked to the relevant socio-environmental issues and situations identified in the city of Santiago del Estero. Data was generated through collective mapping, and thus the methodology was qualitative and participatory. The most significant results are related to trends in urban growth, mobility and accessibility, waste management issues, and societal recreational and leisure practices, among others. It is concluded that the collective mapping tool is appropriate for reflecting on the city, identifying within it various problematic situations linked to insufficient public transportation and low urban connectivity, a lack of quality facilities and green spaces, a deficit in basic infrastructure, high levels of poverty and illiteracy, and the presence of open dumps and environmental pollution. Finally, georeferencing the information in future instances is considered.

Keywords: collective mapping, sustainable urban design, urban ecology

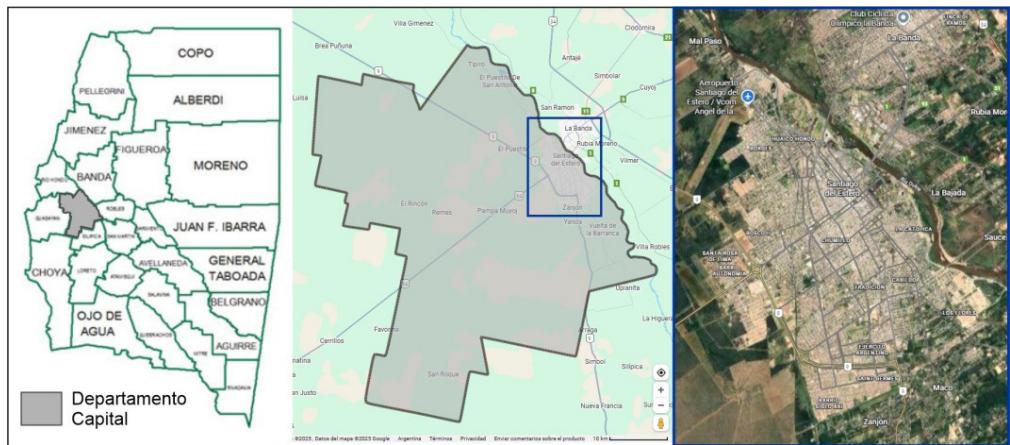
Introducción

El mundo está cada vez más urbanizado. Desde 2007, más de la mitad de la población mundial ha estado viviendo en ciudades, y se espera que dicha cantidad aumente hasta el 60 % para 2030. Las ciudades y las áreas metropolitanas son centros neurálgicos del crecimiento económico, ya que contribuyen aproximadamente al 60 % del PIB mundial. Sin embargo, también representan grandes impactos ambientales: alrededor del 75 % de las emisiones de carbono mundiales, entre el 60 % y el 80 % del consumo de energía y más del 60 % del uso de recursos, siendo que sólo ocupan el 3 % de la tierra. La rápida urbanización está dando como resultado un número creciente de habitantes en barrios pobres, infraestructuras y servicios inadecuados y sobrecargados (como la recogida de residuos y los sistemas de agua y saneamiento, carreteras y transporte), lo cual está empeorando la contaminación del aire y el crecimiento urbano incontrolado (ONU, 2023).

Por su parte, la provincia de Santiago del Estero no escapa a esta tendencia. Según datos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (CNPHyV), del año 2010, la provincia tiene un 69 % de población urbana, significativamente menor a la media del país, con un 91 %. De este conjunto de población, el aglomerado Santiago del Estero-La Banda representa a más del 60 %, resultando 11 veces más poblado que el segundo, Ter-

mas del Río Hondo, y representa el 41,3 % de la población de toda la provincia (Registro Nacional de Personas, 2020). De esta manera, Santiago del Estero es el territorio nacional con mayor porcentaje de ruralidad en la actualidad, y en donde la población urbana está fuertemente concentrada y en franco crecimiento (Figura 1).

Figura 1.
La ciudad de Santiago del Estero en el conjunto Santia-
go-La Banda



Por su parte, la Universidad Católica de Santiago del Estero (UCSE), ha implementado en los últimos años la carrera de arquitectura en su Facultad de Ciencias para la Innovación y el Desarrollo (FCID). Esta carrera promueve una formación sensible para con el contexto que la cobija, por lo que la cátedra de Diseño Urbano Sustentable 2 se ha propuesto hacer aportes a los imaginarios para la construcción de ciudad y de hábitat urbano desde un posicionamiento crítico de la ciudad actual, promoviendo los valores de la sustentabilidad y desde un enfoque ecosistémico. Motivada por la noción de la *ecología de saberes*, y desde la experiencia pedagógica en materia de educación ambiental, es que ha implementado la herramienta del mapeo colectivo para la producción participativa de una mirada que recoja problemáticas y situaciones socioambientales relevantes para alumbrar futuros proyectos de diseño urbano.

La cartografía social como herramienta pedagógico-política

Medeiros de Almeida y Oliveira de Souza (2017), definen la cartografía social como una herramienta dialógica y de investigación en torno a un espacio social, en el que los sujetos del mismo documentan en forma cualitativa la información que tienen, sus experiencias particulares, y manifiestas mediante representaciones iconográficas de la realidad que se analiza.

A su vez, el instrumento principal para la generación de datos en este trabajo es el mapeo colectivo; esta herramienta “*es comúnmente utilizada en los procesos de cartografía social, a través de la cual, los sujetos elaboran una imagen integral de un determinado territorio generando no solo una representación geoespacial, sino también una descripción discursiva*”.

siva de símbolos, relaciones sociales, ocupación del territorio, conflictos, luchas y perspectivas” (Coronel et al, 2025). Las autoras agregan que “en el proceso de mapeo los sujetos de una comunidad elaboran una imagen integral de un determinado territorio generando no solo una representación geoespacial, sino también una descripción discursiva de símbolos, relaciones sociales, ocupación del territorio, conflictos, luchas y perspectivas” (Coronel et al., 2025), por lo que el documento resultante es de carácter descriptivo y permite a la comunidad participante expresar su mirada mediante discursos, imágenes fotográficas, íconos que representan situaciones diversas, etc.

Estado actual de Santiago del Estero. Antecedentes

El Área Metropolitana de Santiago del Estero (AMSE) experimenta un proceso de expansión urbana acelerada, caracterizado por un crecimiento periférico extensivo, baja densidad y escasa planificación integrada. Este patrón ha generado fragmentación del tejido urbano, desigualdad en el acceso a servicios básicos, y presión creciente sobre los recursos naturales y los ecosistemas regionales. La falta de políticas de planificación sustentable ha derivado en una ocupación del territorio que no considera adecuadamente las condiciones ambientales del lugar, como el clima semiárido, las altas temperaturas y la escasez hídrica. Ante la necesidad de orientar el crecimiento urbano hacia modelos más sostenibles, se evidencia la falta de lineamientos específicos y contextualizados que guíen el diseño urbano sustentable en esta región.

A pesar de algunos avances en materia de normativa urbana, como el Plan Urbano Ambiental o reglamentaciones edilicias municipales, no existe aún una estrategia integral que incorpore de manera sistemática los principios del diseño urbano sustentable. La ausencia de lineamientos claros y adaptados al contexto local limita la capacidad de las autoridades y profesionales para orientar intervenciones urbanas que promuevan eficiencia energética, resiliencia climática y equidad social.

Un antecedente local de gran relevancia que se viene dando en esta dirección es la discusión desde la Smart City Expo Santiago del Estero (SCESDE), organizada anualmente desde 2022. Así, desde el eje Territorios Sustentables, se conformó en 2024 la mesa “Estrategias compartidas para impulsar el desarrollo sostenible”. En ella se compartieron distintas estrategias de desarrollo urbano basadas en la naturaleza que aseguren la resiliencia urbana ante el cambio climático, y se explorarán enfoques innovadores para integrar la sostenibilidad en todas las dimensiones del desarrollo, desde la gestión de recursos naturales hasta la promoción de la movilidad sostenible y la gestión eficiente de los recursos. Asimismo, se analizó cómo distintos actores están abordando los desafíos del desarrollo urbano sostenible y la adaptación al cambio climático. De esta manera, se observa un ambiente propicio para hacer aportes a la discusión sobre la construcción de una ciudad diseñada con criterios de sostenibilidad.

El objetivo de este artículo es visibilizar los resultados que emergen del mapeo socioambiental realizado en agosto de 2025 en la materia Diseño Urbano Sustentable 2 (DUS 2) de la FCID UCSE. Además, se busca producir conocimiento relevante para la emergencia de proyectos de diseño urbano alternativos, atravesados por perspectivas ecosistémicas, para finalmente, contribuir al desarrollo de un modelo urbano más resiliente para Santiago del Estero, más equitativo y ambientalmente responsable, alineado con los desafíos actuales del cambio climático y el crecimiento urbano sostenible, y que pueda ser capitalizado por las agendas locales.

Metodología

Respecto al diseño metodológico, la investigación adopta un enfoque exploratorio, dado que una caracterización socioambiental de la ciudad de Santiago del Estero es, en gran medida, inédita o poco conocida, y son escasas las experiencias similares; pese a esto, los estudiantes sí participaron de una experiencia de mapeo colectivo, aunque más bien de carácter físico e infraestructural, y haciendo foco en la costanera de la ciudad. En este trabajo, la finalidad es acercarse al fenómeno urbano específico, reconocer las dimensiones socioambientales relevantes desde el diseño urbano sustentable, e identificar situaciones específicas u objetos de estudio de menor escala para abordar desde ejercicios de proyecto a realizar a partir de esta experiencia.

Así, la metodología que se utiliza es cualitativa y participativa, a partir de la implementación del proceso de mapeo colectivo realizado en el marco de la materia DUS 2. Los participantes fueron todos los estudiantes inscriptos en la materia, con la coordinación del docente a cargo. Se planificó que el proceso de trabajo constara de tres jornadas distribuidas en tres semanas consecutivas, siendo las dos primeras de producción y la tercera de socialización y puesta en común.

Se estableció un eje divisorio de la ciudad, la Av. Libertad, y el grupo se organizó en dos equipos en base a dinámicas de trabajo previas. Cabe destacar aquí que el mismo grupo había mapeado un sector de la ciudad anteriormente, por lo que la experiencia no fue del todo novedosa. Con el fin de disparar el proceso, se imprimió una lámina con el mapa de la ciudad que utilizaran en ese mapeo anterior. Es así que en el proceso se involucraron diferentes técnicas de investigación:

- Talleres de mapeo colectivo: se puso el eje en registrar situaciones socioambientales relevantes para identificar casos potenciales a trabajar desde el diseño urbano sustentable; se tuvo en cuenta las siguientes categorías: a) zonas residenciales y barrios populares; b) ferias; c) focos de problemas de gestión de residuos; d) zonas verdes; e) ejes viales importantes; f) vacíos urbanos; etc.

- Registro de datos: el soporte gráfico es en sí mismo un instrumento específico de registro (Figura 2); para facilitar el proceso, el docente coordinador compartió iconografía elaborada por Iconoclastas (Ares y Risler, 2015). En el tercer día de trabajo, durante la exposición y discusión colectivas, se grabaron audios para luego poder volver detenidamente sobre lo comentado y escribir con mayor precisión todos los datos que surgieron.



Figura 2.
Dinámica de trabajo sobre el sector Norte de la ciudad

Resultados

Los resultados se obtuvieron a partir de la unificación y exposición de ambos trabajos en la tercera jornada, identificando las situaciones socioambientales relevadas, problemáticas o no. Luego pudieron sistematizarse a partir del registro gráfico obtenido (Figura 3), y de la desgrabación de la discusión y el intercambio durante toda esa misma jornada.

A continuación, se desarrolla la información que surgiera a partir de la experiencia. Una primera sistematización de los datos sugiere las siguientes categorías, que ordenaremos identificación de las siguientes once dimensiones: 1) ejes viajes y problemáticas respecto a la movilidad urbana y la accesibilidad; 2) hábitat residencial y fragmentación del tejido urbano; 3) diversificación funcional y expansión urbana; 4) problemáticas vinculadas a la gestión de los residuos y la presencia de basurales; 5) espacios verdes; 6) sistema de salud; y 7) infraestructura de agua y cloaca.

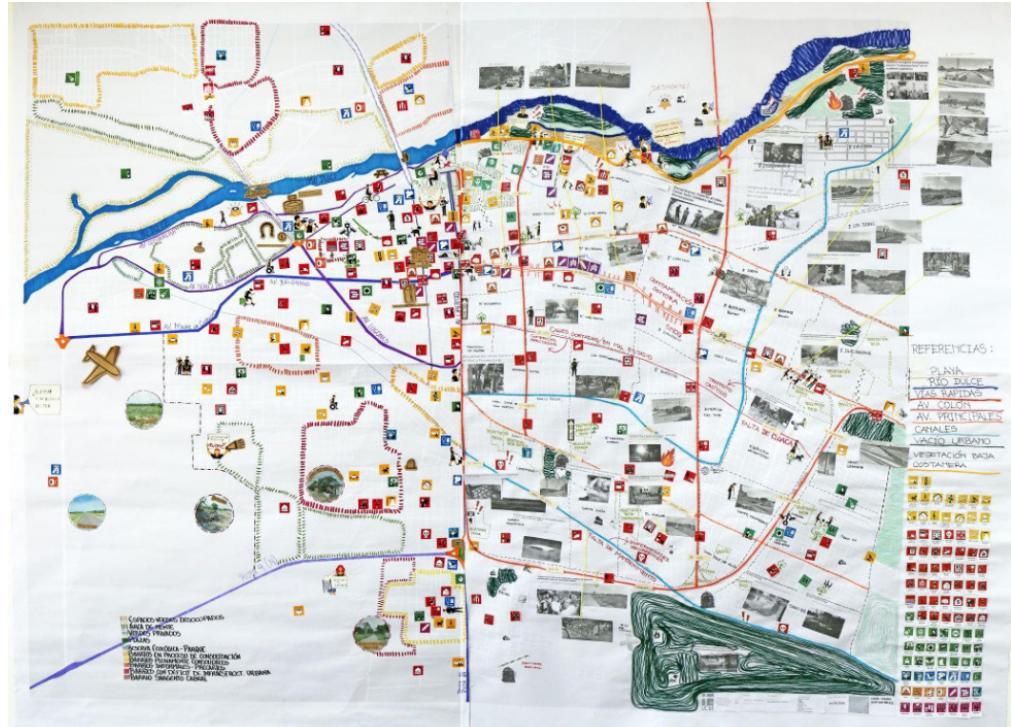


Figura 3.
Situaciones
socioambientales
relevantes identificadas
mediante mapeo
colectivo

1. Ejes viales y problemáticas respecto a la movilidad urbana y la accesibilidad

El análisis de la red vial de Santiago del Estero revela una serie de problemáticas tanto en la infraestructura como en la gestión del tránsito. Las arterias principales, señaladas en rojo, entre ellas las Av. Lugones, Belgrano, Independencia y Colón, concentran la mayor parte de los flujos de movilidad. En particular, la Av Colón evidencia un deterioro crítico por la ausencia de cloaca máxima y la ejecución constante de obras, lo que genera afectaciones directas a la vida cotidiana de sus residentes y comerciantes.

El transporte público presenta deficiencias: quienes viven en la periferia muchas veces deben tomar dos o incluso tres colectivos para llegar a la universidad o al trabajo, mientras que en otras ciudades, un solo viaje basta. A su vez, en Santiago persiste la mentalidad de que todo debe resolverse cerca: se busca estacionar en la puerta del destino, caminar lo menos posible, y eso se traduce en congestión en el centro y un control policial constante para ordenar el estacionamiento. En Santiago todavía se tiene la percepción de que un recorrido mayor a diez minutos es “muy lejos”, y permanece la costumbre de que todo lo esencial se resuelva en el centro, generalmente caminando, y cuesta pensar en desplazamientos más largos y planificados.

Hacia el oeste de la ciudad, los nuevos desarrollos residenciales enfrentan graves dificultades de accesibilidad, dependiendo únicamente de la Ruta Nacional 9, la cual es utilizada por vehículos de carga. Esta realidad pone en riesgo a los habitantes limitando su movilidad, agravada por un transporte público insuficiente. La inclusión de esta vía en el entorno urbano tiene efectos adversos sobre la infraestructura, como el deterioro de calles y viviendas por las vibraciones constantes.

Por otra parte, la Av. Belgrano, antigua ruta provincial, se ha convertido en un corredor urbano de uso mixto y elevada densidad, donde confluyen funciones comerciales, educativas, sanitarias y residenciales. La infraestructura resulta inefficiente: veredas angostas, transporte público saturado y priorización al tráfico vehicular, limitando la movilidad a pie hacia servicios esenciales. Esta situación se reproduce en el centro histórico por la limitación de la morfología restringida.

En términos de movilidad, se observa un contraste evidente: mientras los barrios cerrados priorizan la circulación peatonal y el orden vial, el espacio público fuera de ellos se caracteriza por el caos vehicular y la ausencia de planificación, evidenciando desigualdades en el acceso a una movilidad segura y regulada. Este tema enfrenta serias limitaciones en materia de control policial y educación vial, con prácticas riesgosas y persistentes (como la circulación sin licencia, desorden vehicular, escaso respeto al peatón). A pesar de los avances, como el uso obligatorio del casco en motociclistas, el tránsito continúa siendo caótico, especialmente fuera de los operativos concentrados en fines de semana. La alta densidad de motocicletas agrava la situación, generando preocupación entre visitantes externos.

La construcción de la circunvalación, por el congestionamiento de la Av. Belgrano, evidencia el desequilibrio urbano provocado por la centralización del tránsito. Esta situación se ve vinculada directamente con una dimensión cultural profundamente arraigada: la concentración de servicios, comercios y movilidad dentro del eje de “las cuatro avenidas” – Av. Roca (Sur), la Av. Alsina, la Av. Moreno (Sur) y la Av. Rivadavia – que refuerza el aumento excesivo del centro y la subutilización de la periferia. Santiago del Estero aún depende del núcleo central, a diferencia de ciudades vecinas, como Córdoba, cuyo modelo urbano trabaja con la descentralización.

2. Hábitat residencial y fragmentación del tejido urbano

Se observa respecto a la problemática de los barrios populares, una política urbana ambigua: mientras se implementan programas de vivienda social, como los “módulos habitacionales”, se recurre simultáneamente a estrategias de ocultamiento visual mediante murales, muros, especialmente en zonas cercanas al Río Dulce. Este patrón, originado con las intervenciones en barrios como La Católica y Reconquista, se replica en sectores como el del barrio Industria, evidenciando una lógica de embellecimiento turístico marginando a los asentamientos periféricos.

La migración de sectores de mayor poder adquisitivo hacia barrios privados en la periferia ha generado un crecimiento urbano difuso y desordenado, especialmente hacia el sur de la ciudad. Esta dinámica territorial ha valorado zonas antes marginales, pero ha profundizado la fragmentación del tejido urbano.

El sector en el que se ubica el barrio Autonomía (hacia el Oeste de la ciudad), concebido como ciudad satélite con servicios integrales, evidencia un deterioro urbano marcado, rodeado por asentamientos informales como Santa Rosa de Lima. La proximidad a antiguos rellenos sanitarios ha condicionado, a lo largo de los años, el desarrollo del área, encareciendo las construcciones y generando inestabilidad del suelo, como hundimientos y grietas. Aunque se proyectan nuevos loteos sobre Ruta Provincial 64 – en una dinámica similar a la que se dio en El Zanjón–, persisten riesgos urbanos vinculados a la basura y a la baja calidad del suelo, que limitan la consolidación territorial hacia el norte y explican la expansión preferente hacia el sur.

3. Diversificación funcional y expansión urbana

En los últimos años, la ciudad se expandió comercialmente hacia el sur, en sectores que antes eran considerados lejanos, como El Zanjón o el barrio Cabildo. Esta ampliación del ejido urbano se realiza sin planificación integral: calles de tierra, doble mano y fincas dispersas no soportan el tránsito vehicular. Una excepción positiva es la Av. Lugones, antigua vía del ferrocarril transformada en un boulevard ancho y seguro que conecta distintos puntos de la ciudad, aunque no es utilizada por el transporte público. Los barrios nuevos del sur presentan avances en espacios públicos y planificación comercial, aunque los primeros desarrollos fueron principalmente residenciales.

También en la zona Sur, la Cerámica Santiago se encuentra en medio de barrios consolidados, operando de manera casi constante y generando emisiones de humo que afectan la salud de los vecinos de los barrios América del Sur, Ejército Argentino, Tradición y Mariano Moreno. Originalmente ubicada fuera de los núcleos urbanos, la expansión de la ciudad la dejó dentro de áreas residenciales sin medidas de mitigación ni infraestructura que permita una convivencia segura, exponiendo a la población a riesgos ambientales y sanitarios sin soluciones efectivas.

En contraste, la zona Norte ha crecido poco y combina barrios antiguos con asentamientos precarios. El aeropuerto limita la expansión y sus márgenes concentran basura y contaminación. La Costanera del Río Dulce ha sido la principal intervención positiva: revitalizó la zona, incorporó clubes y espacios deportivos, y preservó el histórico Patio del Indio Froilán. Sin embargo, los muros urbanos siguen ocultando la precariedad de barrios cercanos. Hoy, el principal motor de crecimiento en el norte es el Estadio Único, que atrae inversiones privadas y hoteles en Capital y La Banda, impulsando un desarrollo que aún depende del centro para servicios y comercio.

4. Problemáticas vinculadas a la gestión de los residuos y la presencia de basurales

Al ingresar a la ciudad por la Ruta Provincial 64, se localizan los basurales informales más grandes de Santiago, lo cual genera un fuerte contraste con la imagen que se intenta proyectar hacia el visitante. Si bien en las cercanías existe un predio municipal destinado a disposición final, la mayoría de estos basurales son informales y se expanden sin control. En algunos casos, ciertos sectores de estos terrenos se aprovechan de manera improvisada como canchas de fútbol, aunque sin estar consolidados ni contar con las condiciones mínimas para un uso seguro y permanente. Situaciones similares se replican en la ciudad vecina de La Banda, donde también se observan grandes acumulaciones de residuos en las zonas periféricas, consolidando un patrón de marginación ambiental que afecta principalmente a las comunidades más vulnerables.

Los basurales informales suelen concentrarse alrededor de los canales pluviales, contaminándolos y favoreciendo la proliferación de enfermedades como el dengue, que afecta a los barrios vecinos y sobrecarga las Unidades de Primeros Auxilios (UPA)s. Dos canales destacan en el relevamiento: el de Av. Aguirre, en zona residencial, con menor acumulación de basura pero que genera inundaciones por desniveles en la calzada; y el canal San Martín, en barrios periféricos y nuevos conjuntos sociales, con mayores residuos y abandono de animales, reflejando degradación urbana. Además, ambos canales representan riesgos viales durante lluvias intensas, pues los desbordes y la basura dificultan la visibilidad, provocando accidentes frecuentes.

5. Espacios verdes

La zona sur de la ciudad presenta una marcada escasez de espacios verdes; a diferencia del centro, con pulmones urbanos como el Parque Aguirre y la costanera del Río Dulce, los barrios periféricos carecen de áreas comunes que fomenten el esparcimiento y la apropiación comunitaria. Esta carencia convive con problemáticas sociales como consumo de alcohol y drogas, violencia y falta de equipamiento urbano, especialmente en barrios marginales hacia el oeste, generando entornos vulnerables tanto desde lo ambiental como desde lo social.

6. Sistema de salud

En el barrio Siglo XX, al sur de la ciudad, el Hospital Mama Antula fue construido para descongestionar los hospitales del centro. Sin embargo, en urgencias, los pacientes suelen ser derivados al Hospital Regional Dr. Ramón Carrillo (Av. Belgrano), donde el caos y la saturación son frecuentes. Si no cumplen ciertos requisitos o carecen de obra social, se les deriva nuevamente o deben buscar atención privada, sin acceso a ambulancias. Esto genera largas filas y, en casos extremos, personas del interior pasan la noche en la calle, evidenciando la insuficiencia de la infraestructura sanitaria y la falta de acceso real a la atención pública.

7. Infraestructura de agua y cloaca

La infraestructura sanitaria muestra un desarrollo desigual. En la Av. Colón, por ejemplo, todavía se arrastra el problema histórico del canal entubado que funcionó como desagüe cloacal clandestino, generando olores nauseabundos y saturaciones en épocas de lluvia. Actualmente se construye la Cloaca Máxima en esta avenida, pero la obra es lenta y mantiene calles rotas, con impactos en la movilidad y la actividad comercial. En general, la parte más vieja de la ciudad carece de cloacas, mientras que los barrios nuevos incorporan esta infraestructura desde su planificación.

Discusión

La ciudad de Santiago del Estero vive un contexto de expansión urbana sin planificación. Asimismo, el desmonte continuo durante estos procesos crea vacíos urbanos que conducen a la generación de focos de contaminación, poniendo en riesgo la calidad social y ambiental. Se observa una concentración de funciones en la zona central, que además es la que recibe el principal financiamiento para su valorización y desarrollo. Se hace necesaria una descentralización urbana, creando núcleos en la periferia que eviten dicha concentración. Ciudades como Córdoba muestran que esto es posible: los habitantes de Alta Córdoba o Villa Allende no necesitan trasladarse al centro para resolver cuestiones cotidianas, lo que contribuye a descongestionar el núcleo urbano.

La costanera sobre el río Dulce, concebida como eje recreativo, carece de equipamiento apropiado, principalmente en la zona próxima a barrios populares. A su vez, los sectores medios y altos se consolidaron en el centro y sur de la ciudad, donde se percibe un mayor poder adquisitivo en el nivel de las viviendas y los servicios. Este análisis se vincula directamente con los planteos de Garay et al. (2025), advirtiendo las tensiones entre las políticas de inclusión habitacional y las prácticas urbanas que refuerzan la exclusión simbólica y territorial; el centralismo urbano y la concentración de inversiones en zonas turísticas responde al modelo vigente, dominante y hegemónico, que -paradójicamente- es reproducido por los propios arquitectos/urbanistas de la ciudad. *“En este contexto, los sectores populares han realizado históricamente transformaciones en su propio hábitat con el objetivo de disminuir la pobreza y la desigualdad a las que este modelo los han arrojado”*. (Garay et al., 2025).

La ciudad evidencia deficiencias en accesibilidad peatonal: no hay veredas seguras, los elementos de accesibilidad son discontinuos y el diseño urbano no contempla la perspectiva de género, impactando en la autonomía y la equidad del uso del espacio público. En este contexto, peatonalizar la zona central, es una de las alternativas pensadas. Además, hay un rasgo cultural que agrava la congestión: el uso intensivo del vehículo, al lado de un sistema de transporte público deficiente y susceptible a condiciones climáticas adversas.

Conclusiones

En líneas generales, en la ciudad de Santiago del Estero se identificaron y mapearon las siguientes situaciones socioambientales, consideradas principales y en general problemáticas, y que fueron de utilidad al momento de identificar áreas de interés para imaginar proyectos urbanos desde la perspectiva de la sustentabilidad, tarea central de la materia Diseño Urbano Sustentable 2. Entre estas situaciones relevadas están: 1) un transporte público insuficiente y baja conectividad urbana; 2) falta de equipamiento y espacios verdes de calidad; 3) déficit en infraestructura básica (agua, cloacas, calles en mal estado); 4) altos niveles de pobreza y analfabetismo; 5) basurales informales y contaminación ambiental.

Pese a todo esto, sí se observa, tanto en el grupo de trabajo como en las experiencias de la ciudad en los últimos años, un ambiente propicio para hacer aportes a la discusión sobre la construcción de una ciudad diseñada con criterios de sostenibilidad. Se advierte también la necesidad de georreferenciar los datos que emergieron durante el proceso de mapeo, lo que se espera lograr en instancias futuras.

Referencias

- Ares y Risler (2015). Taller de mapeo colectivo. Santa María La Ribera. Realizado por Iconoclasistas. En: <https://iconoclasistas.net/dossier-de-mapeo/>
- Coronel, Garay, Ledesma & Maguna (2025). Relevar y reconocer nuestro territorio: el mapeo colectivo como estrategia de resistencia. En: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/21439/33751>
- Garay, Rubio y Segura Vázquez (2025). Construyendo nuevos caminos para la arquitectura social en Santiago del Estero. En VII Encuentro Nacional de Arquitectura Comunitaria (ENAC).
- Medeiros de Almeida y Oliveira de Souza (2017). A nova cartografia social como instrumento de resistência: reflexões sobre a história de vida dos camponeses e camponesas na Luta pela Terra – MST/Goiás. Revista Campo-Território 12(27), 287-308. En: <https://seer.ufu.br/index.php/campoterritorio/article/view/39029/24347>
- ONU (2023). Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. En: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- Registro Nacional de Personas (2020). Reporte de estadísticas demográficas y sociales. Santiago del Estero. En: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/09/reporte_santiago_del_estero_final_o.pdf

Agradecimientos

Agradecemos la participación de todos los inscriptos a la cohorte 2025 de la materia Diseño Urbano Sustentable 2, ordenados alfabéticamente según su apellido: María de la Paz Alfonzo Lucena, Lastenia Aliaga Llinas, César Ávalos, Virginia Beron Vittar, Lucas Brao, Sofía Cancian, Sofía Caporaletti (quien colaboró además grabando los audios de la exposición y discusión colectivas), Julieta Chávez Benavidez, Tiziana Congiu, Laura Cortez, Ianeli Español, Pablo Gutierrez Cura, Benjamin Lugones, Marcelo Miguel Arriazu, Adriana Moreno, Juan Cruz Ozan, Cecilia Palavecino, Eduardo Rojas, Camila Rubio Orellana, Lautaro Segura Vázquez, Josefina Spitale y Martina Ubino Ferreira.

Agradecemos también la colaboración de Álvaro Franco, responsable del área de comunicación del Centro de Investigación e Innovación Educativa, Productiva y Tecnológica (CIIDEPt), Dr. Néstor Kirchner, dependiente del Ministerio de Educación de la provincia de Tucumán, por su colaboración en haber digitalizado el mapeo colectivo.

Finalmente, agradecemos especialmente a Pablo Ares y Julia Risler de Iconoclastas, por su larga trayectoria en apoyo de la comunicación popular y al fomento del pensamiento crítico latinoamericano.