VALORACIÓN AMBIENTAL DE ESTRATEGIAS DE REHABILITACIÓN MICROCLIMÁTICA DEL ENTORNO INMEDIATO A UN EDIFICIO EDUCATIVO EN LA CIUDAD DE RESISTENCIA, CHACO

Boutet, María L.1

arq.mlboutet@gmail.com

1 Doctora en Arquitectura, docente investigadora Categoría 3 (SPU) de la FAU-UNNE y del CONICET, directora de PI 23X002 acreditado s/ Res. - 2023 - 1146 - CS # UNNE. Instituto de Investigación para el Desarrollo Territorial y del Hábitat Humano (IIDTHH-CONICET-UNNE).

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF MICROCLIMATIC REHABILITATION STRATEGIES FOR THE IMMEDIATE SURROUNDINGS OF AN EDUCATIONAL BUILDING IN THE CITY OF RESISTENCIA, CHACO

KEYWORDS

Thermal comfort; dynamic simulation; bioclimatic urban planning.

ABSTRACT

Two extreme scenarios in an urban area of Resistencia are evaluated using the Envi-met microclimatic analysis software, in order to assess their potential. The epicenter is an early childhood education building and its immediate surroundings, where thermal discomfort problems were detected, and a rehabilitation proposal is put forward using bioclimatic strategies. The evaluation of the results compared with the baseline scenario showed a reduction in air temperature between 0.5 and 0.9 °C and in mean radiant temperature between 13.9 and 19.5 °C, thus verifying the positive impact of the implemented strategies.

PALABRAS CLAVE

Confort térmico; simulación dinámica; urbanismo bioclimático.

RESUMEN

Se evalúan dos escenarios extremos en un área urbana de Resistencia, utilizando el software de análisis microclimático Envi-met, a fin de valorar sus potencialidades. Se toma como epicentro un edificio educativo de nivel inicial y su entorno inmediato, donde se detectaron problemas de disconfort térmico ante lo cual se plantea una propuesta de rehabilitación mediante estrategias bioclimáticas. La valoración de los resultados contrastados con el escenario de base evidenció la reducción de la temperatura del aire entre 0.5 y 0.9 °C y la temperatura media radiante entre 13.9 y 19.5 °C, verificándose así la incidencia positiva de las estrategias implementadas.

https://doi.org/10.30972/adn.139016

OBJETIVOS

- Evaluar los resultados de una propuesta de rehabilitación microclimática del entorno inmediato a un edificio educativo en la ciudad de Resistencia, utilizando el software Envi-met, para determinar la eficacia ambiental de las estrategias implementadas, en comparación a una situación de referencia.
- Analizar las potencialidades y beneficios del software de análisis microclimático como herramienta de diseño bioclimático del hábitat, para la propuesta de acciones de mitigación y adaptación al cambio climático global.

PLANTEO DEL PROBLEMA

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático advierte que el desarrollo resiliente al clima ya representa un desafío con los niveles actuales de calentamiento. Dicho desarrollo será más limitado si el calentamiento global supera los 1,5 °C y en algunas regiones será imposible si aumenta más de 2 °C (IPCC, 2022). Los ámbitos urbanos constituyen territorios clave frente al cambio climático. Debido a la complejidad de su morfología, tienen un impacto significativo en el clima local y la comodidad térmica. Factores como la ubicación del terreno, la separación entre edificaciones, los materiales empleados, la orientación y altura de los edificios influyen en la cantidad de luz solar disponible, así como en la velocidad y dirección del viento a nivel peatonal. Además, dado que más de la mitad de la población mundial reside en las ciudades, los problemas ambientales derivados de las actividades urbanas cobran mayor atención debido a sus efectos en la salud y el bienestar de las personas (ARRIAGA OSUNA ET AL., 2019, P. 88).

Este comportamiento climático a microescala incide directamente en un suceso climático de mayor escala, conocido como isla de calor urbana (CORDERO ORDÓÑEZ, 2014, P. 16). Consiste en el sobrecalentamiento de las zonas centrales urbanas frente a su entorno rural y generalmente es más intenso en periodos nocturnos, por la falta de disipación del calor acumulado durante el día combinado con la contaminación atmosférica y fuentes de calor antropogénico.

Para implementar acciones de rehabilitación a escala urbana que contribuyan a la mitigación y adaptación al cambio climático, debe tenerse en cuenta esta compleja interacción de factores que pueden generar microclimas particulares por áreas ambientales diferenciadas. Su conocimiento posibilita la toma de decisiones más eficientes, orientadas al logro de un hábitat humano saludable. En este sentido, el avance del campo científico ha permitido incorporar el uso de métodos numéricos y físicos para modelizar y pronosticar la modificación del clima según el comportamiento de distintas variables y características urbanas a escala micro, con la posibilidad de realizar análisis comparativos basados en diferentes escenarios (ALCHAPAR, CORREA Y CANTÓN, 2018; SOSA, CORREA Y CANTÓN, 2020). Entre ellos, el software Envi-met, desarrollado por Michael Bruse en el Instituto de Geografía de la Universidad de Mainz, Alemania, es un modelo computacional tridimensional diseñado para simular las interacciones entre el aire y la superficie del entorno urbano. Constituye una herramienta con potencial para la planificación sustentable del hábitat, ampliamente validada a nivel internacional y nacional (CASTILLO, CORREA Y CANTÓN, 2022).

Ahora bien, la magnitud del impacto de las diversas estrategias que se utilicen para reducir las temperaturas no es igual, siendo su eficacia dependiente de las particularidades climáticas y de la forma de cada ciudad de estudio (SOSA, CORREA Y CANTÓN, 2020). Investigaciones desarrolladas por Chen et al. (2011 CITO EN ALCHAPAR, CORREA Y CANTÓN, 2018) verificaron que tanto la forma urbana como la fragmentación y la irregularidad de los patrones de uso del suelo están positivamente relacionadas con el consumo de energía. En relación con ello, la expansión urbana en el Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR), construida sobre el sistema fluvio-lacustre del Río Negro, se caracteriza por una ocupación discontinua, difusa e insostenible, discordante con las condiciones topográficas naturales debido al relleno indiscriminado de las lagunas que tenían como función actuar como receptores de los excesos de agua. Esto significa un alto grado de fragilidad y vulnerabilidad frente a la acentuada variabilidad climática evidenciada en los últimos años, con fenómenos meteorológicos extremos, reiteradas olas de calor, así como períodos de intensa sequía. Además, las características de su clima muy cálido y húmedo en conjunto con el crecimiento edilicio generan áreas de alta temperatura que pueden provocar estrés térmico tanto en la infraestructura como en los habitantes.

Considerando esta problemática, el presente trabajo[1] constituye un insumo para el proyecto de investigación "Modelo de evaluación y rehabilitación microclimática de edificios educativos y su entorno residencial, para el desarrollo sustentable de la ciudad de Resistencia". Se considera clave tomar como epicentro a los edificios educativos, dadas sus características específicas como servicio social vinculado a la densidad y crecimiento poblacional, su localización dispersa y extensión en superficie, la variación aleatoria en su ocupación estacional y diaria en fase con el período de radiación solar, que los convierten en un

1. Desarrollado en el marco del curso de posgrado avanzado "Bioclimatología aplicada al Diseño Urbano Sustentable. Herramientas de valoración energética y ambiental", del Centro Científico Tecnológico (CCT), CONICET-Mendoza, 2022.

potencial núcleo de desarrollo de estrategias bioclimáticas y, por consiguiente, de eficiencia y ahorro energético (BOUTET, 2017; SAN JUAN, 2014). Asimismo, pueden constituirse en factor de integración socioambiental por su rol pedagógico relevante en la comunidad.

Se tomó como epicentro el Jardín Materno Infantil N° 33 (Programa Nacional 700 Escuelas), donde se realizaron auditorías termo-energéticas en distintos períodos de interés. La aplicación del software Envi-met, posibilitó un estudio más preciso de las variables microclimáticas en torno al caso de estudio, como así también de las características térmicas y ópticas de la envolvente urbana, de los canales viales y de la vegetación. A partir del diagnóstico particularizado, se propuso un nuevo escenario aplicando estrategias bioclimáticas de rehabilitación urbana-edilicia, cuyos resultados se presentan a continuación.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE INTERVENCIÓN

La ciudad de Resistencia, capital de la provincia del Chaco en la Región Nordeste Argentina, pertenece a la zona bioambiental Ib Muy cálida-húmeda, según las normas del Instituto Nacional de Normalización y Certificación (IRAM 11603:2012). Posee una alta disponibilidad de radiación solar, siendo el promedio de irradiación global horizontal anual de 5,094 KWh/m2. A los fines de este trabajo se definió un área de intervención de 100 m x 100 m que abarca el terreno donde se encuentra emplazado el edificio monitoreado (JMI N° 33) y su entorno inmediato. Se localiza en la calle Hipólito Yrigoyen N° 950 (esquina Francisco Solano), en un área urbana de equipamiento institucional (educacional y sanitario en correspondencia con los sectores de mayor densidad poblacional). Linda con la Escuela de Educación Técnica Simón de Iriondo y frente a él se encuentra el Hospital Pediátrico. El área se halla próxima al parque urbano de la laguna Argüello, uno de los reservorios que sufrió sucesivos rellenos (de 30 hectáreas en 1935 a 9,5 hectáreas en la actualidad). En la Figura 1 se aprecia el crecimiento del área desde 2002 (sin intervención edilicia), para 2010 ya estaba construido el JMI N° 33, pero no el hospital, hasta la actualidad, completamente urbanizada.

El área evaluada tiene dos canales viales, uno de 18,5 m de ancho con orientación NE-SO (calle Francisco Solano) con una altura edilicia que oscila entre uno y dos niveles, y otro de 39 m de ancho con orientación NO-SE (calle Hipólito Yrigoyen), dado por la gran explanada de acceso al hospital. Predominan, en torno al jardín de infantes, palmeras pindó (especie de 1ª magnitud, hasta 25 m de altura), distanciadas entre 2 y 3 m, y en las veredas de enfrente, palos borrachos rosados (especie caducifolia de 2ª magnitud, 10 a 20 m de altura, aunque puede llegar a 25 m), distanciados entre 4 y 15 m. Estos ejemplares se encuentran en su estado inicial de desarrollo (Figura 2).

Los materiales predominantes son: ladrillo a la vista con áreas revocadas y pintadas en color blanco o gris y techos inclinados de chapa con distintas terminaciones. El hospital cuenta con frente integral de vidrio con tratamiento reflectivo y translúcido por paños, aleros y pantallas verticales de placas graníticas con estructura metálica y techo de hormigón armado. Las veredas del jardín se resuelven con losetas graníticas rústicas, mientras que las del hospital, con baldosas graníticas pulidas color gris. El pavimento vehicular es de hormigón y tiene una intensidad de tránsito alta en algunos horarios.

DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA URBANA-EDILICIA

Debido a la disposición del tejido de la ciudad a media orientación (45° respecto al Norte verdadero), las envolventes de los edificios se hallan expuestas a la radiación solar en todas las estaciones del año, por lo que lograr una óptima gestión de la energía sin producir sobrecalentamiento en los espacios interiores constituye un desafío. Tal es así que, tras haber monitoreado el jardín de infantes en distintos períodos de interés en 2010, se ha detectado sobrecalentamiento y deslumbramiento

Figura 1. Localización del Área de intervención. a) Imagen de 2002; b) Imagen de 2010; c) Imagen de 2022 (área seleccionada). **Fuente:** mapa e Imágenes satelitales de Google Earth.

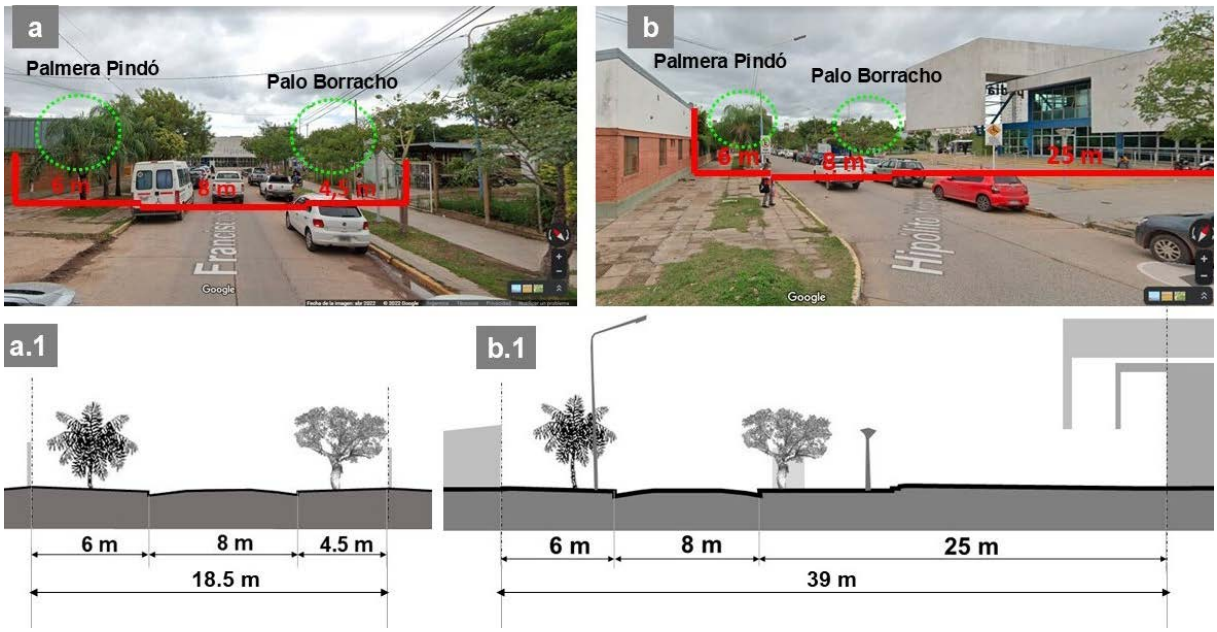


Figura 2. a) Canal vial Francisco Solano; a1) Corte indicando dimensiones del canal vial; b) Canal vial Hipólito Yrigoyen; b1) Corte indicando dimensiones del canal vial. **Fuente:** elaboración propia mediante Google Street View.

Figura 3. Intervenciones realizadas al edificio original y su entorno. **Fuente:** elaboración propia mediante Google Maps y Street View.

en los espacios interiores incluso en días frescos de otoño (BOUTET ET AL., 2011). Se destaca además que, a partir de simulaciones calibradas para el período más crítico de noviembre de 2012, se obtuvieron valores de temperatura cercanos a 35 °C en las aulas, superando ampliamente el límite máximo de confort regional de 29 °C (BOUTET Y HERNÁNDEZ, 2024). Al momento del monitoreo, el edificio contaba con 8 aulas, escasa vegetación perimetral y aún no se había construido el Hospital Pediátrico. Sin embargo, en la actualidad, puede apreciarse que el edificio se ha ampliado con tres aulas y un SUM semicubierto (Figura 3), dado el crecimiento de la matrícula. El hospital es un complejo de gran envergadura, cuyo acceso peatonal se desarrolla con una amplia explanada sobre calle H. Yrigoyen, lo que contribuyó a sellar gran parte de la superficie verde frente al jardín de infantes. Estos cambios en la morfología urbana a través del tiempo, con ampliaciones o construcción de nuevos edificios, materiales con alta capacidad térmica que almacenan calor, sustitución del suelo natural por super-

ficies impermeables, modificación de la cobertura forestal, entre otros, tienen incidencia en las condiciones térmicas del entorno inmediato al edificio en estudio.

Otro aspecto contraproducente es el incremento del calor antropogénico generado por el tránsito vehicular que se intensificó desde la puesta en funcionamiento del hospital y otras fuentes de calor generadas sobre el canal vial por actividades complementarias (como el kiosko-container que incluye dos compresores de aire acondicionado). Por otra parte, las especies forestales como palmeras ornamentales y palo borracho existentes, si bien son autóctonas, no son apropiadas como arbolado de alineación en veredas, tampoco su distancia de plantación, que no brinda protección adecuada a la amplia superficie sellada de veredas y calles dejando claros totalmente expuestos a la radiación solar. Dichos aspectos, propicios para el incremento del efecto de isla de calor en ese sector en particular, pueden repercutir en sobrecalentamiento interior. Prueba de ello, es la incorporación de equipos de aire acondicionado en el jardín de infantes, como así también telas media-sombra en el tejido perimetral o en espacios intermedios, rejas de metal desplegado en las ventanas más expuestas y cortinas interiores black-out que impiden el aprovechamiento de la luz natural.

En función de lo expuesto, se plantea la hipótesis que mediante la aplicación de estrategias de rehabilitación bioclimáticas pasivas de la envolvente edilicia y urbana se puede intervenir de manera positiva, aprovechando los beneficios del entorno natural en que se encuentra el área de intervención.

ESTRATEGIAS DE REHABILITACIÓN

Con base en los problemas detectados, las potencialidades del área de intervención y la bibliografía especializada se consideraron pertinentes las siguientes estrategias en forma combinada:

A. Enverdecimiento y planificación del arbolado urbano. Estas estrategias tienen múltiples beneficios: permiten filtrar la radiación solar, regular la iluminación natural y controlar la radiación ultravioleta, modificar la dirección de los vientos y reducir su velocidad, disminuir la temperatura del aire por evapotranspiración, filtrar los sólidos en suspensión, reducir la contaminación acústica, además de conservar la biodiversidad y mejorar la calidad ambiental con sus efectos psicológicos positivos (MARTÍNEZ, RUIZ Y ATENCIO, 2017). Entre las nuevas tecnologías, los techos verdes posibilitan además el manejo de aguas pluviales y mayor durabilidad de materiales de techo, así como la mitigación del efecto de isla de calor urbana, debido a que la incorporación de material biológico favorece el enfriamiento evaporativo de las superficies y así propicia una disminución de la temperatura superficial del techo y del aire circundante (ALCHAPAR, CORREA Y CANTÓN, 2018).

B. Disminución de la absorción solar de la envolvente urbana mediante "albedo combinado". Los materiales fríos tienen alta reflectancia solar (**â**) y alta emisividad térmica (**ε**). La primera propiedad determina la capacidad de un material de reflejar la radiación solar incidente para mantener su superficie más fría con respecto a los materiales de construcción convencionales durante el día. La emisividad térmica (**ε**) permite que los materiales irradien el calor almacenado en la estructura, sobre todo durante la noche. Este comportamiento térmico hace que reduzcan la transferencia térmica al entorno construido (ALCHAPAR, CORREA Y CANTÓN, 2018). En relación con ello, Alchapar y Correa (2016) evaluaron una zona de gran potencialidad para rehabilitación del Área Metropolitana de Mendoza, mediante la simulación con Envi-met de 12 escenarios que modifican su configuración morfológica y material –densidad edilicia, porcentajes de vegetación y materiales–. Los escenarios con albedo combinado (alto albedo en superficies horizontales y bajo albedo en superficies verticales) resultaron las alternativas más efectivas bajo todas las configuraciones analizadas en orden de mejorar la habitabilidad de los espacios exteriores manteniendo un 60% de vegetación. Registraron disminuciones de hasta 3 °C en Tamax y de hasta 12 °C en Tsuelomax.

La experiencia nacional demuestra la eficacia de estas estrategias de refrescamiento pasivo combinadas como medida de mitigación de la isla de calor, pues se potencian los beneficios individuales. Esto tiene correlación en el ámbito internacional, por ejemplo, Santamouris et al. (2017) evaluaron el potencial de enfriamiento de diferentes tecnologías de mitigación de 220 áreas urbanas. Mediante techos y pavimentos reflectivos y el incremento de la vegetación, registraron una caída de temperatura promedio en todas las ciudades de 2,0 ºC. El sector de intervención en particular y la ciudad de Resistencia en general tienen un gran potencial para la aplicación de dichas estrategias, dado que responde a una configuración de "modelo abierto", con canales viales anchos, construcciones relativamente bajas, en módulos dispersos, con grandes áreas libres, además de que su emplazamiento y clima es ideal para el desarrollo del arbolado urbano.

HERRAMIENTA DE VALORACIÓN Y METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Envi-met simula la dinámica microclimática dentro de un ciclo diario, a través de algoritmos complejos, incluyendo todos los procesos de cambio, interacciones entre el sol, el agua, el suelo y las estructuras construidas, lo que permite prever fenómenos como la distribución de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, así como la radiación solar. El área núcleo a simular es un volumen en tres dimensiones (X, Y, Z) representado gráficamente mediante "n" módulos dentro de una grilla. La dimensión Z está determinada por la altura máxima (hmax) de los elementos urbanos dentro del modelo ($Z \geq 2*hmax$). Cada módulo (ΔX, ΔY, ΔZ) puede ser parte de un edi-

ficio, de la vegetación o de un espacio abierto. A nivel de calle, la primera grilla se divide verticalmente en cinco partes iguales con el fin de registrar detalladamente el microclima cercano a la superficie (ALCHAPAR Y CORREA, 2016).

Para la valoración cuantitativa de las estrategias propuestas, se utilizó la versión 5.0.3 Lite del software, planteando los siguientes escenarios hipotéticos: a) Caso base: estado actual del área de intervención sin considerar la vegetación por tratarse de árboles de pequeño porte que no brindan protección significativa y a fin de verificar el potencial de las estrategias de rehabilitación partiendo de un caso extremo; b) Propuesta de rehabilitación con estrategias combinadas (albedo y vegetación).

El procedimiento de configuración del modelo físico, simulación y visualización de resultados se realizó siguiendo la secuencia de componentes de Envi-met: Spaces, Envi-Guide, Envi-core y Leonardo. Se definió la resolución del área de intervención de 100 m x 100 m, en 3 x 3 x 3 m (número de grillas totales = x: 34; y: 34; z: 20). Se estableció una cuadrícula vertical equidistante, dividiendo la primera grilla en 5 subceldas. La Figura 4 muestra la configuración geométrica del Caso Base, que incluye los volúmenes edilicios, áreas semicubiertas como galerías, SUM, aleros y pantallas verticales. Diagramados en la interfaz gráfica, la geometría, suelos, vegetación y materialidad de cada escenario, se fijaron 10 receptores en lugares estratégicos, según su grado de exposición a las variables climáticas. Los análisis se realizaron en un día de cielo claro de noviembre (mes más cálido del período escolar) de 2012, a fin de contar con referencias de datos medidos que permitieran contrastar los datos arrojados por el software y complementar los análisis realizados oportunamente. Se ingresaron los datos históricos de temperatura (°C) y humedad relativa (%) del día seleccionado (18/11/12), obtenidos de la estación meteorológica rural situada en el Aeropuerto de Resistencia y se especificaron los demás parámetros de simulación de acuerdo con el sitio de implantación, estableciendo una frecuencia de salida de 60 minutos. Ambos escenarios se simularon bajo las mismas condiciones climáticas, ponderando los resultados y mejoras obtenidas mediante: contrastación de las variables de interés (temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad de viento, temperatura media radiante) captadas por los receptores a una altura de 2,10 m y visualización en Leonardo en el horario de máxima temperatura (15:00 h) con conclusiones al respecto. Para la propuesta de rehabilitación, se utilizaron los materiales disponibles en Envi-met, considerando sus propiedades ópticas (reflectancia solar y emitancia térmica) y las especies arbóreas más aproximadas a las seleccionadas, según su magnitud y densidad de área foliar. Adicionalmente, se contrastaron las propiedades de los materiales y se calculó el Índice de Reflectancia Solar (SRI) mediante un aplicativo Excel, para verificar rápidamente la reducción de la temperatura superficial de las envolventes.

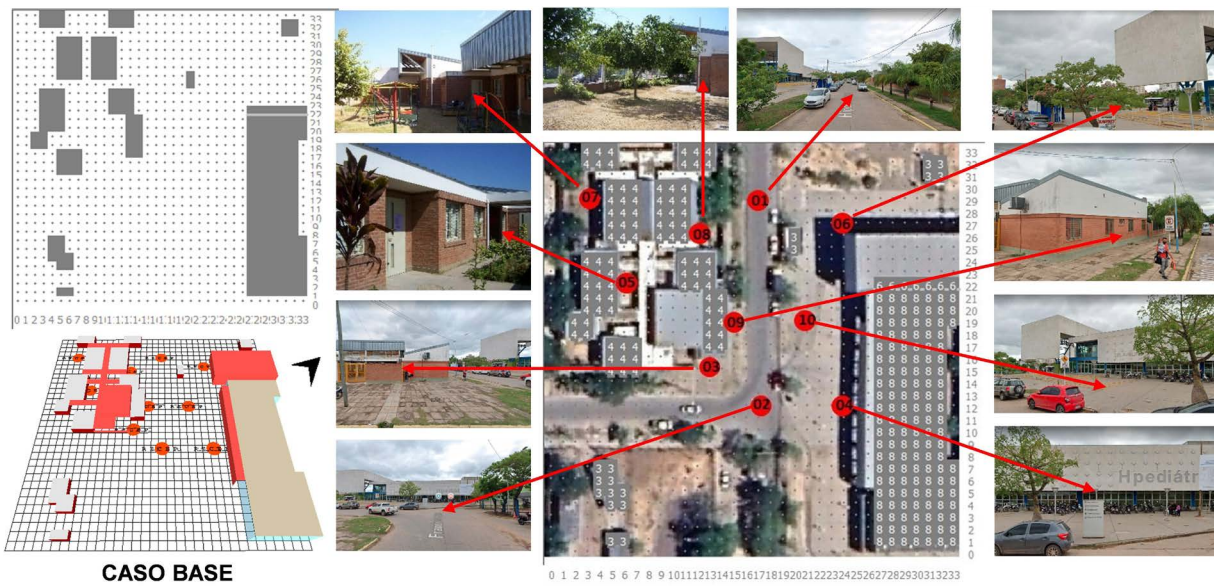


Figura 4. Caso Base. Ubicación de receptores en el espacio de trabajo. **Fuente:** elaboración propia mediante modelización en Envi-met e imágenes de Google Maps y Street View.

RESULTADOS OBTENIDOS

A. Enverdecimiento y planificación del arbolado de alineación. Para el diseño de las áreas verdes del caso de estudio, se partió de la idea del diseño paisajístico original del hospital, intercalando amplios cuadrantes verdes con áreas de solado poroso para generar zonas de estar con bancos, dejando libres los senderos peatonales y accesos. Dicho diseño se prolongó sobre las grandes explanadas de acceso al hospital, disminuyendo así la superficie sellada. En las veredas del jardín de infantes se definieron los canteros reglamentarios sobre las veredas y se enverdecieron los patios internos (Figura 5). Sumado a ello, se cambió el material de los aleros y pantallas del hospital por uno más liviano y se incorporaron nuevas tecnologías como fachadas doble piel (muros verdes con cámara de aire), muros y techos verdes sin cámara de aire. Se dio tratamiento verde a las aulas más expuestas del jardín y su límite perimetral, así como a los módulos complementarios del hospital.

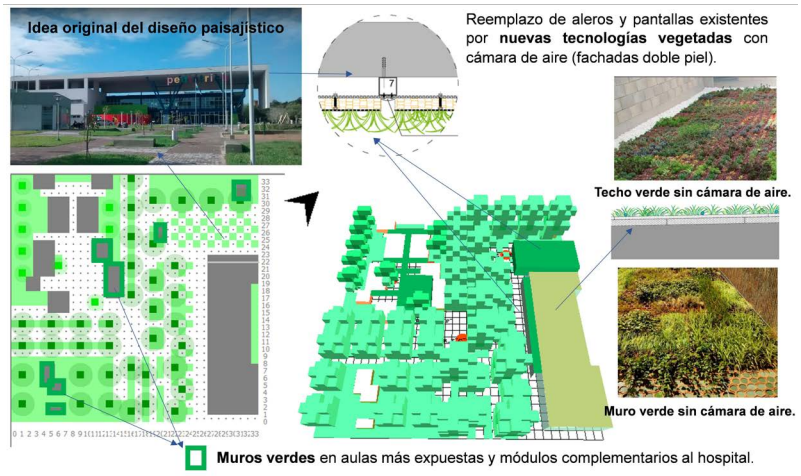


Figura 5. Propuesta de rehabilitación. Estrategias de enverdecimiento. **Fuente:** elaboración propia mediante modelización en Envi-met y fotos ilustrativas.

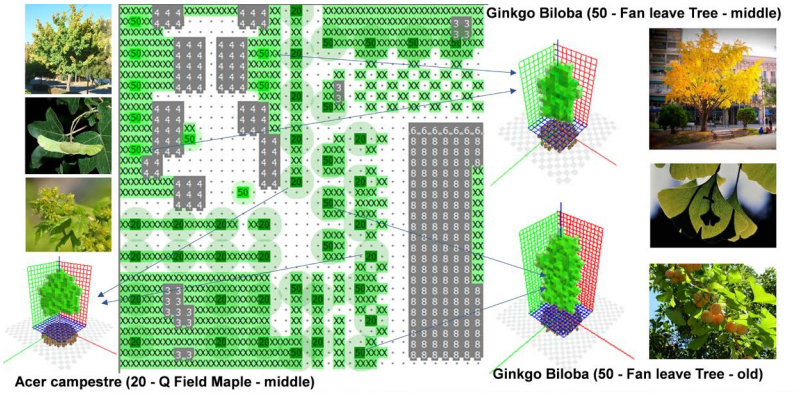


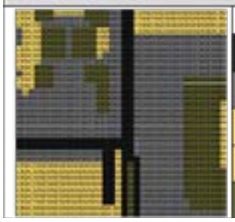
Figura 6. Ubicación del arbolado. **Fuente:** elaboración propia mediante esquemas de "Albero", Envi-met y fotos ilustrativas.

Para el arbolado de alineación, se seleccionaron de la biblioteca del software dos especies caducifolias de 1ª y 2ª magnitud: Ginkgo biloba, muy longeva, ideal para entornos urbanos, y Acer campestre, de pequeño porte y carácter ornamental, disponiéndolas con una distancia de plantación equivalente a 2/3 de la altura de cada especie (Figura 6). Se consideró el criterio de plantación de árboles alineados y paralelos al trazado vial, a intervalos regulares, manteniendo homogeneidad de especies por cuadra y heterogeneidad por zonas. Los ejemplares de Ginkgo biloba de 1ª magnitud (15 a 25 m de altura, distanciados cada 12 m) se ubicaron en alineación frente al hospital, dada la amplitud del canal vial Yrigoyen y en la plaza de acceso Noroeste. Los de 2ª magnitud (10 a 15 m de altura, distanciados cada 9 m), en los patios del jardín. Los ejemplares de Acer campestre (2ª magnitud, 10 a 15 m de altura, distanciados cada 9 m aproximadamente) se ubicaron en las veredas en torno al jardín y en el terreno de enfrente al Sureste. También se alternó en tresbolillo frente al hospital para dar escala humana a la circulación peatonal por la explanada y para proteger la fachada vidriada del sol del Oeste, siendo esta disposición permeable a los vientos predominantes del Este.

B. Disminución de la absorción solar de la envolvente urbana mediante "albedo combinado". Se incrementó el albedo de las superficies horizontales (pavimentos, veredas y techos) mediante materiales fríos (alta reflectividad, alta emitancia infrarroja y baja absortancia) y se reguló el albedo de las superficies verticales en valores medios o bajos para evitar interreflexiones molestas. En la Tabla 1 se comparan las propiedades ópticas de los distintos tipos de suelos y solados del caso base con los de la propuesta de rehabilitación. A partir del cálculo del SRI, se observa que, al aumentar el albedo del pavimento y las veredas, se incrementa el SRI, disminuyendo considerablemente las temperaturas superficiales entre 21 y 31 °C. Las mejoras de los componentes de muros y techos evidenciaron también la reducción en 21 °C de la temperatura superficial de los techos del jardín, al aumentar el albedo a 0.9 (chapa de aluminio), a pesar de tener un valor de emisividad muy bajo.

Evaluación del potencial de las estrategias combinadas (albedo y vegetación). Frente a la situación original, se logró

TABLA 1 Suelos y solados. Propiedades ópticas

CASO BASE						PROPUESTA DE REHABILITACIÓN					
											
Color	Nombre	Albedo	Emis.	SRI	T°CSUP.	Color	Nombre	Albedo	Emis.	SRI	T°CSUP.
	Asfalto	0.2	0.9	19	75.3		Pavimento de hormigón claro	0.8	0.9	100	44.6
	Pavimento de granito	0.4	0.9	45	65.4		Granito pulido	0.8	0.9	100	44.6
	Suelo arenoso	0.2	0.98	23	73.9		Deck de madera	0.8	0.9	100	44.6
	Suelo arenoso	0.2	0.98	23	73.9		Suelo franco + pasto (dens. media 25 cm)	0.2	0.98	23	73.9
	Suelo por defecto (franco arenoso)	0.2	0.98	23	73.9		Suelo por defecto (franco arenoso)	0.2	0.98	23	73.9

Fuente: elaboración propia mediante en Envi-met.

TABLA 2 Contrastación de variables simuladas

UBICACIÓN DE RECEPTORES		PARÁMETROS PROPUESTA				CONTRASTACIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS							
	REC.	SVF Edif.	SVF Edif.+ Veg.	Alb. del suelo	Emis. del suelo	Vel. Vto. Prom. CASO BASE (m/s)	Vel. Vto. Prom. PROP. (m/s)	TEMP. MÁX. CASO BASE (°C)	TEMP. MÁX. PROP. (°C)	DIF. MÁX. DEL DÍA T (°C)	TMR MÁX. CASO BASE (°C)	TMR MÁX. PROP. (°C)	DIF. MÁX. DEL DÍA TMR (°C)
	R01	0.99	0.65	0.80	0.90	1.41	1.44	35.80	35.30	0.7	64.71	59.33	15.83
	R02	0.97	0.69	0.80	0.90	1.50	1.41	36.00	35.40	0.8	65.03	65.72	19.23
	R03	0.96	0.74	0.80	0.90	1.43	1.37	36.03	35.29	0.9	64.68	59.98	15.95
	R04	0.86	0.67	0.80	0.90	1.22	1.26	35.59	35.18	0.5	65.12	60.5	18.49
	R05	0.90	0.60	0.20	0.98	1.01	0.93	35.83	35.20	0.8	63.05	64.5	16.13
	R06	0.98	0.79	0.20	0.98	1.23	1.29	35.83	35.43	0.6	64.92	58.84	18.96
	R07	0.96	0.83	0.20	0.98	1.23	1.29	35.62	34.97	0.8	64.28	63.02	16.77
	R08	0.90	0.65	0.20	0.98	0.56	0.51	35.66	35.21	0.6	63.31	63.86	18.64
	R09	0.89	0.68	0.80	0.90	1.21	1.06	35.74	35.24	0.7	63.58	64.16	19.55
	R10	0.95	0.61	0.80	0.90	1.30	1.24	35.52	35.09	0.5	64.8	59.58	13.94

Fuente: elaboración propia mediante en Envi-met.

reducir la temperatura del aire entre 0.5 y 0.9 °C y la temperatura media radiante entre 13.9 y 19.5 °C, verificando así la incidencia positiva de las estrategias combinadas implementadas.

En la Tabla 2 se observa que las máximas diferencias de temperatura obtenidas entre el caso base y la propuesta corresponden a los receptores R02, R03, R05 y R07. A partir de los valores registrados por el receptor R03 situado en la vereda de acceso al jardín de infantes, se alcanzó la diferencia máxima de 0.9 °C y, a su vez, se obtuvo una reducción de la temperatura media radiante de 15.9 °C. Allí prevalece el alto albedo (0.8) y la alta emisividad (0.9) del material de vereda. Por otra parte, similar diferencia, de 0.8 °C, se obtuvo en los receptores R05 y R07 situados en los patios internos del Jardín, alcanzando una reducción de la TMR de 16.13 °C y 16.77 °C, respectivamente, dado el tratamiento verde de su superficie y la sombra generada por el arbolado. En el receptor R02 ubicado en la intersección de las calles, además de lograr una reducción de 0.8 °C al aumentar el albedo de 0.2 a 0.8, obtuvo una reducción de la TMR de 19.2 °C. La máxima reducción de la TMR (19.5 °C) se obtuvo en el receptor R09, donde se manifiestan más claramente las estrategias combinadas de albedo combinado (alto en superficies horizontales; bajo en fachada verde) y vegetación. Las menores diferencias se registraron en los receptores R04 (paralelo a la fachada vidriada del hospital) y R010 (en la explanada de acceso al hospital). Se observa, además, la reducción del Factor de Visión de Cielo (Sky View Factor [SVF]) que pasó de valores del orden de 0.9 a valores en el orden de 0.6. El SVF es una variable de peso en la determinación de los intercambios de energía por radiación del espacio, tanto durante el día (calentamiento) como durante la noche (enfriamiento radiativo y convectivo).

En la Figura 7 se contrasta la temperatura del aire medida en la Estación Meteorológica del Aeropuerto, con las curvas arrojadas por dos receptores de interés, el R03 situado en el acceso al jardín y el R05 situado en un patio interno, para ambos escenarios. Las máximas diferencias se notan entre las 11 y las 18 h, período en que disminuyen las temperaturas de la propuesta. En horas de la noche no se aprecia diferencia entre ambos escenarios, aunque sí se constata el efecto de isla de calor urbana, pues las temperaturas de los receptores perma-

necen más elevadas que las registradas en el aeropuerto. Los edificios y el pavimento disipan el calor acumulado durante el día, elevando así la temperatura del aire durante la noche, en el orden de 2.5 °C a 3° C.

En las visualizaciones de Leonardo a las 15 (Figura 8), hora de temperatura máxima y HR mínima, se observa que, en la propuesta el área con temperaturas menores a 35.5°C, es mayor, incluyendo la esquina de acceso al jardín y la explanada del hospital, mientras que en el caso base dicha área se reduce a un sector mínimo, quedando la mayor superficie afectada por temperaturas mayores a 35.5 °C.

La velocidad de viento, en general, disminuye en la propuesta con respecto al caso base, especialmente en horas de la noche. Al haber incorporado vegetación en las áreas libres, además del arbolado, se incrementa la rugosidad del suelo y la fricción superficial, ofreciendo mayor resistencia al paso del viento, a lo que se suma el desvío según la altura de los árboles. Las visualizaciones (Figura 9) corroboran lo expresado, resultando para la propuesta menor velocidad de viento en el área intervenida (0.85 a 1.05 m/s; verde) que en el caso base, donde la misma área registra entre 1.25 a 1.45 m/s (amarillo).

Se logró la reducción de la TMR en ambos receptores (R03 y R05) durante el día, mientras que por la noche se encuentran un poco más elevadas que el caso base, lo cual demuestra la propiedad de los materiales propuestos de disipar el calor en horas de menor temperatura del aire. Se comprueba la disminución de la TMR en las zonas donde se incorporó el arbolado, con valores entre 50 y 60 °C, mientras que en el caso base la mayor parte de la superficie tiene entre 60 y 65 °C, incluso superando estos valores en la explanada y pavimento próximo al hospital (Figura 10).

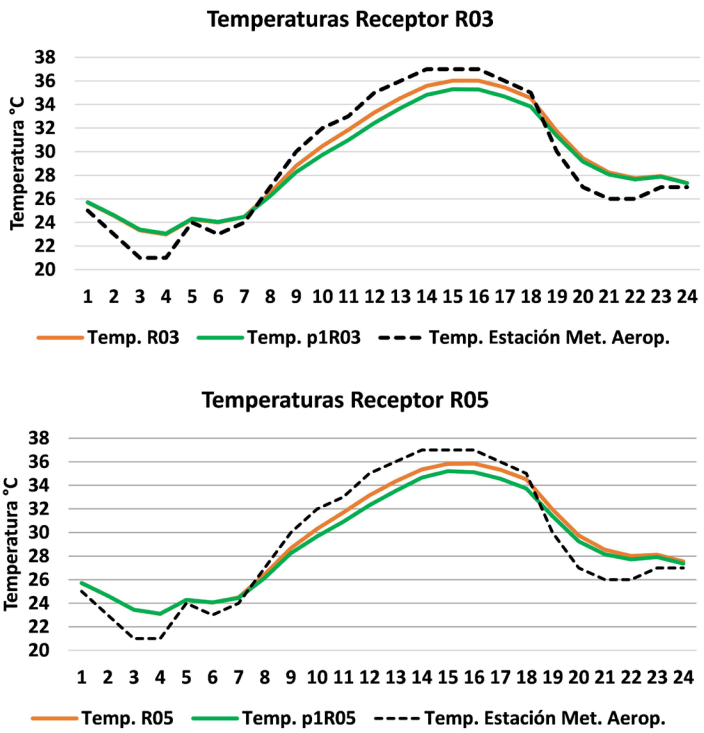


Figura 7. Contrastación de temperatura potencial del aire (°C) de receptores R03 y R05. Caso base (curva naranja); Propuesta (curva verde). **Fuente:** elaboración propia.

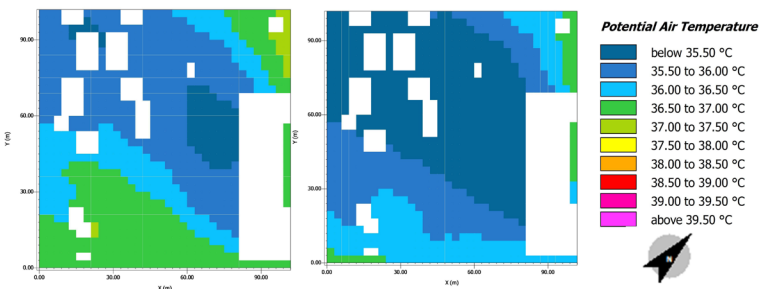


Figura 8. Contrastación de temperatura potencial del aire a las 15 h. Caso base (izq.); Propuesta (der.). **Fuente:** elaboración propia mediante visualización en Leonardo-Envi-met.

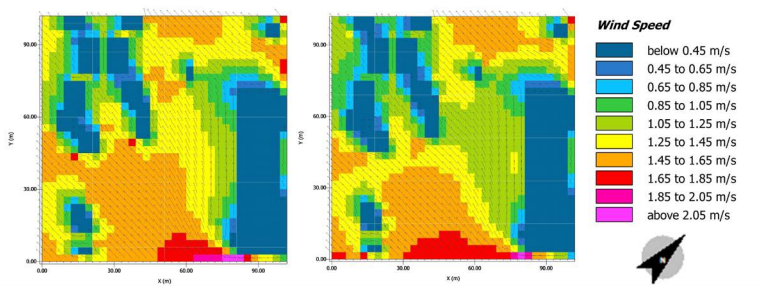


Figura 9. Contrastación Velocidad de Viento a las 15 h. Caso base (izq.); Propuesta (der.). **Fuente:** elaboración propia mediante visualización en Leonardo-Envi-met.

Dichas observaciones tienen correlación con la radiación solar incidente en sus distintas componentes, apreciándose nuevamente el efecto del arbolado en la reducción de la radiación directa y difusa. La radiación directa se reduce de 885 W/m2 en el caso base a menos de 185 W/m2 bajo el arbolado propuesto. Es evidente, además, la reducción de la radiación solar reflejada en las áreas tratadas con verde y debajo de los árboles (Figura 11), de 272 W/m2 (caso base) a 240 W/m2 (propuesta), mientras que en las áreas libres se aprecia el efecto del alto albedo de los materiales de superficies horizontales (pavimentos y veredas), con un promedio de 256 W/m2. En el área próxima a la fachada del hospital, se registran los mayores valores de radiación reflejada, con una leve reducción en la propuesta, lo cual demuestra la importancia de disminuir el área vidriada en orientaciones desfavorables (NO-SO) para el clima de Resistencia o brindar el tratamiento adecuado con sistemas de doble piel.

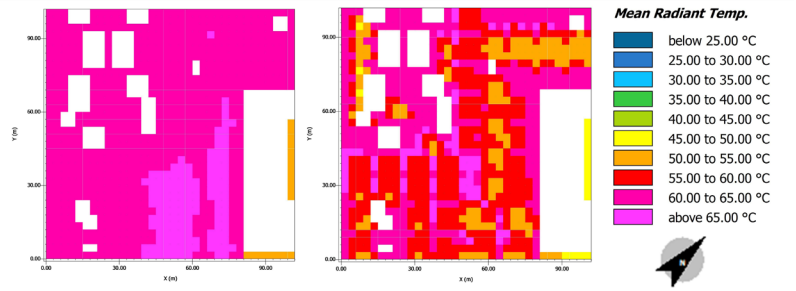
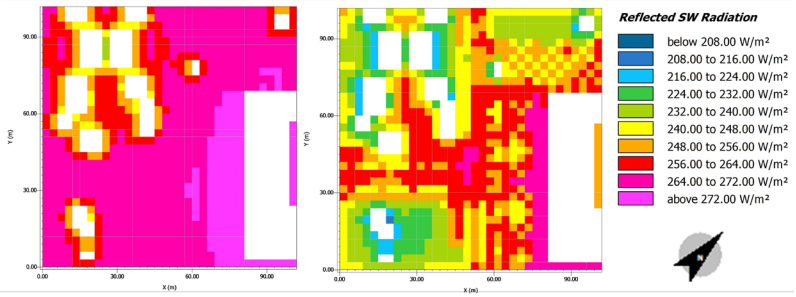


Figura 10. Contrastación de temperatura media radiante a las 15 h. Caso base (izq.); Propuesta (der.). **Fuente:** elaboración propia mediante visualización en Leonardo-Envi-met.



Figuras 11. Contrastación de Radiación Solar Reflejada a las 15 h. Caso base (izq.); Propuesta (der.). **Fuente:** elaboración propia mediante visualización en Leonardo-Envi-met.

CONCLUSIONES

La sistematización de los resultados de ambos escenarios evaluados, arrojados por los 10 receptores dispuestos en lugares estratégicos según su grado de exposición, permitió detectar situaciones diferenciadas que demuestran la complejidad del microclima urbano en cuanto al comportamiento de las variables climáticas, tanto individualmente como en conjunto. Se destaca del análisis que, frente a la situación original, se logró reducir la temperatura del aire entre 0.5 y 0.9 °C, y la temperatura media radiante entre 13.9 y 19.5 °C, verificando así la incidencia positiva de las estrategias combinadas de rehabilitación implementadas. Se verificaron las potencialidades del software, su versatilidad en el tratamiento de múltiples variables y procesos atmosféricos, con sus diversas posibilidades de análisis comparativo basado en diferentes escenarios y visualización gráfica de resultados, que lo hacen apropiado para estudios microclimáticos complementarios a la evaluación edilicia. Por lo expuesto, se puede afirmar que Envi-met constituye una herramienta útil para la toma de decisiones en la planificación y rehabilitación del espacio urbano, posibilitando una mejor gestión de la energía solar para mejorar los niveles de confort térmico exterior.

CITAS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alchapar, N. y Correa, E. (2016). Potencial de las herramientas de simulación para la planificación sustentable del desarrollo urbano. Actas ENCACS. SEDICI.

Alchapar, N., Correa, E. y Cantón, M. (2018). ¿Techos reflectivos o verdes? Influencia sobre el microclima en ciudades de zonas áridas. Mendoza, Argentina. Cuadernos de Vivienda y Urbanismo, 11(22). Pontificia Universidad Javeriana.

Arriaga Osuna, M. et al. (2019). Programa de Simulación Envi-Met en el Estudio de vegetación urbana. Perspectivas Científico Tecnológicas sobre Desarrollo e Innovación. Universidad Autónoma de Baja California.

Boutet, M., Hernández, A., Jacobo, G., Martina, P. y Corace, J. (2011). Auditorías Higrotérmicas y Lumínicas de dos Edificios Escolares de Nivel Inicial de la Ciudad de Resistencia, en Condiciones Reales de Ocupación. Averma, 15, 29-36.

Boutet, M. L. (2017). Acondicionamiento higrotérmico-lumínico de edificios escolares en zonas urbanas de la región N.E.A. Auditorías energéticas y propuestas de mejoras mediante diseño solar pasivo [Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas]. UNSa.

Boutet, M. L. y Hernández, A. L. (2024). Optimización bioclimática de parámetros de la envolvente de un Jardín

de Infantes de tipología abierta, en clima muy cálido-húmedo. Arquitecno, (23).

Castillo, A., Correa, E. y Cantón, M. (2022). Propuestas de desarrollo urbano energético y ambientalmente sustentable de áreas de piedemonte en zonas áridas. Mendoza, Argentina. Revista de Urbanismo, (47), 115-135.

Chen, Y. et al. (2011). Estimating the Relationship Between Urban Forms and Energy Consumption: a case study in the Pearl River Delta, 2005.2008. Landscape and Urban Planning, 102(1), 33-42.

Cordero Ordóñez, A. X. (2014). Microclima y confort térmico urbano: análisis sobre la influencia de la morfología del cañón urbano caso de estudio en los barrios el Raval y Gracia, Barcelona. Projecte Final de Màster Oficial. UPC.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2201). IRAM 11603. Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina. IRAM.

IPCC (2022). Cambio climático: una amenaza para el bienestar de la humanidad y la salud del planeta. La adopción de medidas inmediatas puede asegurar nuestro futuro. IPCC.

Martínez, C., Ruiz, M. A. y Atencio, L. (2017). Proyecto integral de forestación urbana. Gobierno de Mendoza.

Santamouris, M. et al. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment: analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. Solar Energy, 154(15), 14-33.

San Juan, G. (2014). Aprendizaje en las escuelas del siglo XXI. Nota 5. Auditoría ambiental y condiciones de confort en establecimientos escolares. Banco Interamericano de Desarrollo.

Sosa, M., Correa, E. y Cantón, M. (2020). Eficacia de estrategias de disminución del calentamiento urbano. Estudio para una ciudad de clima árido. Informes de la Construcción, 72(559), e352.