

Modelado urbano microclimático para la simulación termo-energética de viviendas en edificios en altura en Mendoza, Argentina. Integración del software ENVI-met y EnergyPlus.

Urban microclimatic modeling for apartment's thermo-energy simulation in high-rise buildings in Mendoza-Argentina. ENVI-met and EnergyPlus software integration.

Julieta Balter (*), Noelia Alchapar (*), Erica Correa (**), Carolina Ganem (***)

RESUMEN

La ciudad de Mendoza, Argentina, cuenta con una intensa forestación urbana que definen dos estratos en altura: bajo y sobre la copa de los árboles. En este contexto, el comportamiento térmico de viviendas en altura estará afectado según el ambiente circundante. Con el objetivo de aprovechar la potencialidad predictiva de un modelo de simulación urbano y crear datos microclimáticos fiables para la simulación termo-energética de edificios en altura, este artículo propone la integración de dos programas de simulación. La metodología consta del diseño y validación de los modelos mediante datos registrados *in situ*; y de la simulación del comportamiento térmico edilicio de viviendas en altura en Mendoza, mediante la introducción de datos microclimáticos urbanos específicos. Los resultados obtenidos revelan las capacidades de trabajar con ENVI-met como herramienta para la generación de los datos climáticos necesarios para simular en EnergyPlus, constituyendo un conocimiento fundamental para el modelado energético urbano edilicio.

Palabras clave: EnergyPlus; ENVI-met; Validación de modelos climáticos; Simulación integrada

ABSTRACT

The studied city, Mendoza, Argentina, has an intense urban afforestation, defining two strata in height: above and below the tree canopy. In this context, the thermal behavior of high buildings apartments will modify according to the surrounding environment. This article proposes the integration of two simulation programs, with the objective of taking advantage of the predictive potential of the urban simulation model (ENVI-met) and creating reliable microclimatic data for the thermo-energy simulation (EnergyPlus) of high-rise buildings in Mendoza. The methodology consists of the design and validation of urban and building models through microclimatic data registered in situ. We simulated the internal thermal behavior of apartments at different heights by means of the introduction of the specific urban microclimatic data. The results obtained reveal the capabilities of working with ENVI-met as a tool for the generation of the climatic data necessary to simulate in EnergyPlus, constituting a fundamental knowledge for the building's urban energy modeling.

Keywords: EnergyPlus; ENVI-met; Validation of climate models; Integrated simulation

(*) Dra. Arquitecta. Investigadora Asistente en Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) CONICET. CCT-Mendoza (Argentina).

(**) Dra. Ingeniera. Investigadora Independiente en Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) CONICET. CCT-Mendoza (Argentina).

(***) Dra. Arquitecta. Investigadora Independiente en Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) CONICET. CCT-Mendoza (Argentina). Docente en Facultad de Artes y Diseño. UNCuyo, Mendoza (Argentina)

Persona de contacto/Corresponding author: jbalter@mendoza-conicet.gob.ar (J. Balter)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7785-8465> (J. Balter); <https://orcid.org/0000-0003-2682-3163> (N. Alchapar); <https://orcid.org/0000-0003-1690-076X> (E. Correa); <https://orcid.org/0000-0002-1431-1219> (C. Ganem).

Cómo citar este artículo/Citation: Balter, Julieta; Alchapar, Noelia; Correa, Erica; Ganem, Carolina (2021). Modelado urbano microclimático para la simulación termo-energética de viviendas en edificios en altura en Mendoza, Argentina. Integración del software ENVI-met y EnergyPlus. *Informes de la Construcción*, 73(561): e382. <https://doi.org/10.3989/ic.76749>

Copyright: © 2021 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 26/11/2019

Aceptado/Accepted: 05/05/2020

Publicado on-line/Published on-line: 17/03/2021

1. INTRODUCCIÓN

Las áreas urbanas son responsables del 75% del consumo mundial de recursos (1), y dentro de ellas el sector edilicio cumple un rol fundamental en el balance energético global. El sector residencial es el más ineficiente en cuanto al consumo de gas natural y electricidad. A finales del 2014, la utilización de gas y electricidad en el sector residencial representó el 91% del consumo total de este sector (2). En este sentido, el micro-clima alrededor de un edificio constituye un factor determinante en el comportamiento termo-energético edilicio.

La ciudad de Mendoza, Argentina, se concibe como una ciudad-oasis (3) debido a su intensa forestación urbana inscrita en una zona árida templada continental. La ciudad define desde el punto de vista ambiental dos estratos en altura dados por dicha forestación: con y sin arbolado. En este contexto los espacios interiores ubicados hasta el tercer nivel -bajo la copa de los árboles- cuentan con una situación micro-climática moderada y se ven beneficiados térmica y energéticamente tanto en invierno como en verano. Sin embargo, en los espacios de los niveles superiores -sobre la copa de los árboles- la situación es más extrema y los consumos para climatización son mayores en ambas estaciones debido a la exposición completa de sus envolventes (4).

En este contexto, el comportamiento térmico interior y los consumos energéticos de cada unidad de vivienda ubicada en los edificios en altura se encuentran afectados de acuerdo al proceso de intercambio de energías entre la envolvente edilicia y el ambiente circundante. Para estudiar el desempeño edilicio según tal diferenciación en altura, el monitoreo de la situación ambiental in situ -tanto interior como exterior- presenta un gran valor dada la particular estructura de ciudad-oasis. No obstante, para realizar mediciones exhaustivas en este entorno urbano es preciso contar con un instrumental específico para cada estrato, lo cual muchas veces dificulta el monitoreo debido a la gran cantidad de variables meteorológicas demandadas. Al respecto, los modelos teóricos de simulación microclimática urbana son una herramienta adecuada y necesaria para poder no sólo diagnosticar el comportamiento termo-ambiental de una zona exterior, sino también para predecir el comportamiento edilicio inserto en una determinada configuración urbana existente o escenario propuesto.

En las últimas décadas, los modelos energéticos a escala edilicia y a escala urbana se han convertido en herramientas extendidas de análisis para diseñadores y responsables de políticas energéticas, respectivamente. Sin embargo, recientemente, estos dos conjuntos de herramientas han comenzado a fusionarse en métodos híbridos que tienen como objetivo analizar el rendimiento energético ambiental de barrios, es decir de conjuntos de edificios. Esta herramienta de integración se denomina en la literatura internacional como “Modelo energéticos urbano edilicios” (UBEM según sus siglas en inglés). El enfoque básico del UBEM es aplicar modelos físicos de flujos de calor y masa en y alrededor de los edificios para predecir el uso de energía operativa, así como las condiciones ambientales interiores y exteriores para grupos de edificios (5).

A nivel internacional, las investigaciones realizadas en este marco pueden clasificarse de acuerdo al foco de estudio o bien, según a la metodología adoptada. El trabajo de Yang et al. (6) plantea y desarrolla un método para la evaluación

del rendimiento energético de los edificios en entornos urbanos. El estudio estableció un sistema de simulación integrado basado en tres programas: ENVI-met, EnergyPlus y la plataforma de acoplamiento Building Controls Virtual Test Bed (BCTVB). El software BCTVB se utiliza para desarrollar un módulo de acoplamiento para transferir los resultados de simulación de ENVI-met al modelo EnergyPlus.

Otros trabajos, se enfocan en el efecto de la sombra de los árboles en el desempeño térmico edilicio: Morakinyo et al. (7) trabaja mediante la comparación de dos edificios educativos similares de tres niveles de altura, con y sin sombra de los árboles. A través de monitoreo in situ de las condiciones microclimáticas exteriores y de las temperaturas interiores, se validó en una primera instancia el modelo urbano en ENVI-met. Luego, los datos micro-climáticos exteriores específicos se utilizaron para crear el objeto de “un día de diseño” y aplicarlo como condición de contorno para cada edificio en la simulación con Energy Plus. Los resultados del trabajo muestran el impacto de las sombras en el confort térmico local en un microclima cálido-húmedo.

En investigaciones de Kuo-Tsang y Yi-Jhen (8) se analiza el impacto de diferentes tipologías de cañones urbanos en la demanda energética para refrigeración edilicia. El estudio emplea los dos simuladores citados anteriormente a partir de datos de bases meteorológicas de un año típico para simular las condiciones microclimáticas de los cañones urbanos para las condiciones climáticas más cálidas del año. Los resultados indican que la relación de aspecto de alto y ancho de un cañón urbano produce el efecto más significativo en el consumo de energía de los edificios, seguido por la orientación de la calle y la densidad de la vegetación en la carretera. Asimismo, Pastore et al. (9) estudian los efectos de la vegetación en el confort térmico interior en un área urbana residencial, a partir de las siguientes etapas: a) simulación con ENVI-met de un área del barrio a fines de contar con las condiciones de contorno ante la ausencia de datos climáticos reales; b) con las variables climáticas obtenidas se simula el barrio a menor escala con diferentes escenarios de vegetación urbana; c) por último las variables climáticas de salida se utilizan para simular con EnergyPlus las temperaturas y las condiciones de confort interiores mediante la integración de la vegetación exterior y algunas estrategias de rehabilitación edilicia.

Por otro lado, Schwede y Sheng (10) analizan las demandas energéticas anuales para enfriamiento en edificios en su contexto urbano en 26 ciudades de China. El estudio aplica un algoritmo para traducir los datos climáticos (EPW) en bases de datos anuales para localizaciones y micro-climas específicos mediante la simulación con ENVI-met. Esta información se utiliza para simular las condiciones térmicas y las demandas de enfriamiento en edificios mediante el programa TRNSYS.

A escala regional, en el Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE-CONICET) se ha trabajado intensamente en el uso de simuladores como una herramienta predictiva de los comportamientos microclimáticos bajo diferentes configuraciones urbanas morfológicas y de materiales (11, 12, 13); así como también a escala edilicia (14, 15, 16). Estos antecedentes abren las posibilidades de trabajar en ambas escalas a partir de la integración de los softwares.

Por tal motivo, el objetivo de la presente investigación es trabajar sobre la potencialidad predictiva del software microclimático ENVI-met para proveer los datos climáticos utilizados por

el software EnergyPlus, y así determinar el comportamiento termo-energético de unidades de vivienda ubicadas en diferentes niveles de altura (bajo y sobre la copa de los árboles). Para ello, se valida el modelo edilicio con Energy Plus a partir del ajuste con los datos microclimáticos registrados in situ en una unidad de vivienda -ubicada en el 5to nivel-, y se simula el comportamiento térmico de unidades de viviendas en diferentes niveles de altura -ubicadas en el 1er y 10mo nivel-, mediante la introducción de los datos microclimáticos calculados por ENVI-met. Este trabajo busca avanzar en la integración de ambos softwares para mejorar la precisión de los modelos de simulación y la validez de sus predicciones bajo la influencia de distintos entornos urbanos, lo que finalmente servirá para generar directrices en nuevos desarrollos urbanísticos y edilicios que promuevan el uso racional de la energía.

2. METODOLOGÍA

La investigación se divide en las siguientes etapas: (i) descripción de área urbana; (ii) diseño y validación del modelo numérico urbano (ENVI-met) y edilicio (EnergyPlus); (iii) ingreso de variables climáticas calculadas por ENVI-met para la simulación de viviendas en diferentes niveles de altura; (iv) contrastación de los resultados térmicos interiores según los niveles de altura. La Figura 1 muestra el esquema de la metodología empleada.

2.1. Descripción del área de estudio

El análisis se llevó a cabo en el área metropolitana de Mendoza (AMM) ($32^{\circ}54'48''$ S, $68^{\circ}50'46''$ W) con una superficie de 65 km^2 . Dicha zona es la de mayor densidad edilicia en altura, principalmente de uso residencial y con una densi-

dad poblacional de más de 800 hab/ha. Esta zona presenta una geometría urbana abierta, conformada por canales viales anchos fuertemente arbolados y una estructura edilicia del tipo piramidal (17). La ciudad de Mendoza está situada al pie de la cordillera de los Andes, zona centro oeste de Argentina ($32^{\circ}40'$ latitud sur, $68^{\circ}51'$ longitud oeste, y 750 m sobre el nivel del mar). El clima de Mendoza es desértico con estepa fría (BWk según Köppen clasificación) (18). Registra un porcentaje de humedad atmosférica relativamente bajo y precipitaciones anuales de 218 mm. Posee alta heliofanía, con una radiación solar máxima diaria de 1089 W/m^2 durante el período estival. La velocidad del viento anual es de 1,9 m/s a 10 metros de altura, predominantemente desde el sureste. La temperatura media anual es de $16,50 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con máximas promedio de $24,50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y mínimas promedio de $9,60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (19).

El área de estudio seleccionada abarca una cuadrícula de 6 x 6 hectáreas que suma una superficie total de 36 manzanas. Está conformada por las cinco plazas principales de la ciudad: Independencia, Chile, San Martín, España e Italia. La altura edilicia oscila entre 3 a 57 metros, con un mayor porcentaje de edificios entre 1 y 3 niveles.

La distribución de superficies en el sector evaluado corresponde a: 44% de cubiertas, 28% de circulaciones vehiculares, 10% de plazas, y 18% de superficies descubiertas privadas -patios, jardines-. Con respecto a la configuración material, se releva un uso generalizado del pavimento peatonal tipo calcárea en diferentes colores: amarillo (31%), rojo (21%), negro (11%) y de cemento color gris (22%), entre otros, con un albedo medio de 0,3. Los materiales opacos superficiales que componen las fachadas del cañón urbano son predominantemente de piedra, ladrillo y/o

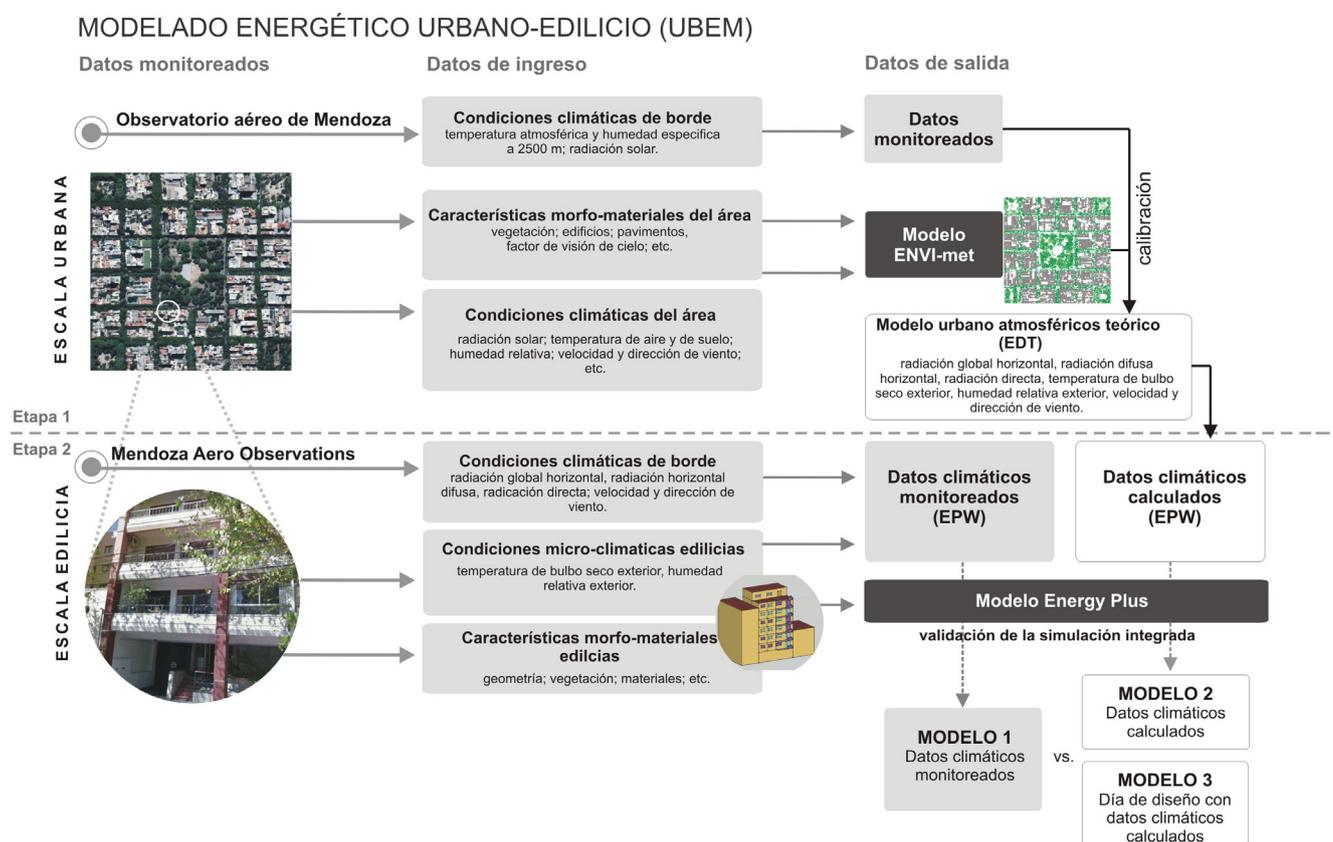


Figura 1. Esquema metodológico de la simulación termo-energética que integra el modelo numérico ENVI-met y EnergyPlus

pinturas. El albedo promedio de los materiales verticales es 0.2. El 80% de los techos son planos, construidos en hormigón armado y membranas o azotea accesible (albedo promedio=0,3). El 20% restante es inclinado y construido con tejas principalmente de cerámica (albedo promedio = 0,35) (20).

El 68% de los árboles plantados en alineación en la ciudad de Mendoza corresponden a tres especies: Morera (*Morus alba* L.) 38%; Plátano (*Platanus hispanica* Tend.) 21% Fresno europeo (*Fraxinus excelsior* L.) 19%. El 32% restante corresponde a: Fresno americano (*Fraxinus americana*), Acacia visco (*Acacia visco*), Paraíso común y paraíso sombrilla (*Melia azedarach*), Tipa (*Tipuana tipu*), Álamos (*Populus* spp.), Acer (*Acer negundo*) (21). (Figura 2).

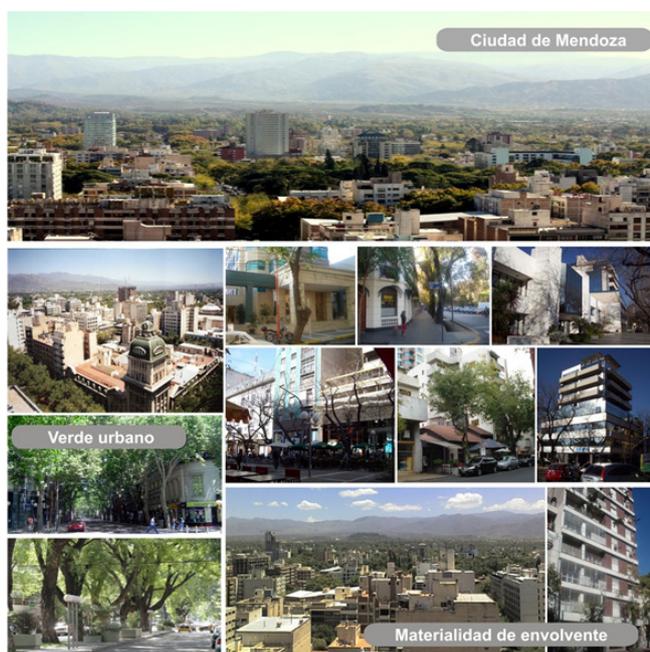


Figura 2. Morfología, materiales y forestales del Área Metropolitana de Mendoza (AMM). Fuente: Elaboración propia, 2019.

2.2. Diseño y validación del modelo numérico a escala urbana. ENVI-met 3.1

Para realizar el diseño numérico se utilizó el programa de acceso gratuito ENVI-met 3.1, desarrollado por Michael Bruse en el Instituto de Geografía de la Universidad de Mainz, Alemania. Este modelo computacional tridimensional trabaja a escala de microclima urbano y simula las interacciones entre el aire y la superficie del entorno urbano con una resolución típica de 0,5 a 10 metros en el espacio y cada 10 segundos en tiempo. ENVI-met 3.1 está basado en las leyes fundamentales de la dinámica de fluidos y la termodinámica. El modelo incluye la simulación de: flujos alrededor y entre edificios; procesos de intercambio de calor y vapor de las superficies de suelo y paredes; turbulencia; parámetros de la vegetación; bioclimatología; y dispersión de contaminantes (22).

Variables de ingreso

Los datos de ingreso para la modelación numérica del área urbana evaluada se pueden dividir en tres grupos:

- Diseño del espacio físico: El modelo fue realizado en una versión 200 x 200 x 30. La resolución del área es de 3,5 x

3,5 x 3 m y malla de 197 (x); 197 (y), debido a que la superficie de referencia es de 690 x 690 m.

- Variables climáticas: El software ENVI-met 3.1 requiere del ingreso de variables no perturbadas que caracterizan las condiciones de borde de la simulación, tales como: (i) velocidad, dirección de viento (m/s) a 10 m de altura y rugosidad de suelo (z_0) al punto de referencia; (ii) temperatura atmosférica inicial (K) y humedad específica (gr. agua/kg. aire) a 2500 m de altura. Los datos se obtuvieron del Aeropuerto Francisco Gabrielli -Estación n° 87418, Observatorio Aero de Mendoza – en colaboración con la Universidad de Wyoming; (iii) humedad relativa (%) a 2m de altura, registrada con sensor ONSET Weather, tipo HOBO HO8-003-02 (punto fijo, para el ajuste).
- Propiedades térmicas del modelo teórico urbano: Para la caracterización de los edificios es necesario definir temperatura interior, transmitancia térmica, albedo, conductividad y calor específico de paredes, techos y pavimentos. Con el propósito de especificar el comportamiento del suelo, se debe precisar temperatura y humedad para distintas capas de suelo. En la Tabla 1 se listan las condiciones de simulación y las propiedades usadas en el trabajo.

Monitoreo y calibración

Las condiciones microclimáticas del área se monitorearon durante el período estival del año 2013 mediante el punto fijo de referencia (Pf) ubicado dentro del canal vial analizado e indicado en la Figura 3. Para calibrar el modelo numérico, se contrastó la curva de temperatura de aire Pf del día 5 de marzo 2013, con la curva temperatura de aire del área simulado con ENVI-met (Ps).

La Figura 4 grafica la curva de temperatura de aire observado (A-Pf) con la simulada (A-Ps) a una altura peatonal (2,5 m). Los estadísticos que caracterizan y comparan los datos muestran una buena predicción del comportamiento térmico del día evaluado, con un coefficient of determination $R^2=0,94$ and root-mean-square error (RMSE=0,78).

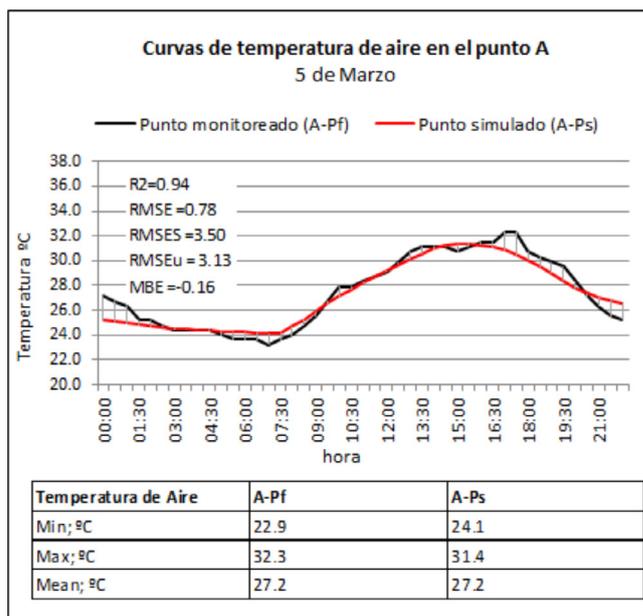


Figura 4. Gráfico de ajuste del punto simulado (Ps) y observado (Pf) el día 5 de marzo 2013 a escala peatonal (2,5m) en el área

Tabla 1. Parámetros de entrada para la simulación en ENVI-met. Fuente: Elaboración propia, 2019.

DATOS		5 de Marzo	19 de Diciembre
Principales	Velocidad de viento a 10m [m/s]	4	2
	Dirección de viento (0:N; 90:E; 180:S; 270:O)	150	150
	Rugosidad z0 al punto de referencia	0,1*	0,1*
	Temperatura atmosférica inicial [K]	297	295
	Humedad específica a 2500 m [gr agua/kg air]	3,5	2,8
	Humedad relativa a 2m [%]	40,9	35
Edilicios	Temperatura interior [K]	295	295
	Transmitancia térmica de paredes [W/m²K]	2	2
	Transmitancia térmica de techos [W/m²K]	0,7	0,7
	Albedo de paredes	0,2	0,2
	Albedo de techos	0,3	0,3
Suelo	Temperatura inicial -capa superior (0-20cm) [K]	293	293
	Temperatura inicial -capa media (20-50cm) [K]	293	293
	Temperatura inicial -capa profunda (below 50cm) [K]	293	293
	Humedad relativa -capa superior (0-20cm) [%]	50*	50*
	Humedad relativa -capa media (20-50cm) [%]	60*	60*
	Humedad relativa -capa profunda (below 50cm)	60*	60*
Número de grillas	x-Grillas: 197		x-Grillas: 197
	y-Grillas: 197		y-Grillas: 197
	z-Grillas: 23		z-Grillas: 23
Tamaño de la grilla en metros	dx: 3,5		dx: 3,5
	dy: 3,5		dy: 3,5
	dz: 5		dz: 5
Vegetación	Tree 15m light *: Height 15.0m.		Tree 15m light *: Height 15.0m.
	LAD1: 0,04; LAD6: 0,150; LAD10: 0.00 (m²/m³)		LAD1: 0,04; LAD6: 0,150; LAD10: 0.00 (m²/m³)
	Tree 15m very dense*: Height 15.0m.		Tree 15m very dense*: Height 15.0m.
	LAD1: 0,15; LAD6: 2,15; LAD10: 0,00 (m²/m³)		LAD1: 0,15; LAD6: 2,15; LAD10: 0,00 (m²/m³)
Material de pavimento vehicular	Cement Concrete: albedo 0,3		Cement Concrete: albedo 0,3
Factor de visión de cielo en el punto A	Edificio	0,648	
	Edificio + vegetación	0,332	

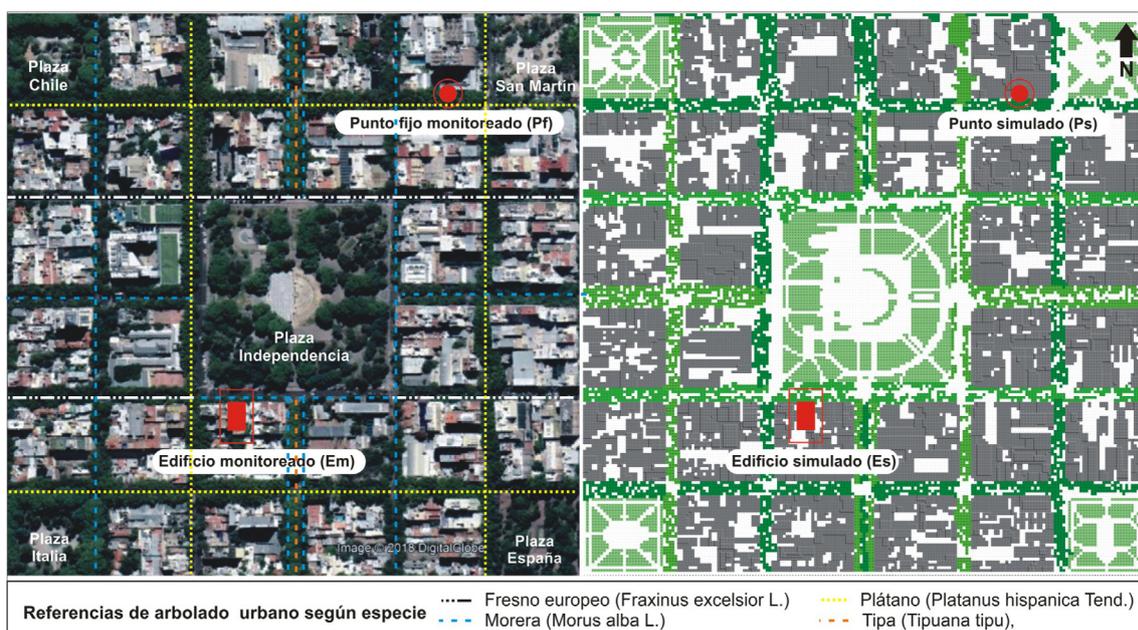


Figura 3. Vista aérea del área de estudio y configuración de modelo numérico con ENVI-met 3.1. Descripción del arbolado urbano. Ubicación de: punto monitoreado (A-Pf) y simulado (A-Ps), y de edificio monitoreado (B-Em) y simulado (B-Es). Fuente: Elaboración propia, 2019.

2.3. Diseño y validación del modelo numérico a escala edilicia -EnergyPlus V.8.8-

Descripción del edificio en estudio

El caso seleccionado es un edificio con orientación Norte correspondiente a la tipología de Torre sin retiros de las líneas divisorias de edificación. Dicha tipología corresponde a una de las tres existentes en Mendoza de acuerdo a la clasificación morfológica según las normativas edilicias en el momento de su construcción (23). La unidad de vivienda monitoreada, ubicada en el 5º nivel, tiene una superficie de 122m² y su ubicación es frontal, es decir, orientada a la vía pública y por ende a la arboleda urbana. Asimismo, para su selección se consideró pertinente que el edificio se encuentre implantado frente a una plaza, dado que de esta manera se asegura la ausencia de sombras por el entorno (ver Figura 3).

En cuanto a la materialidad, es un edificio mayormente másico, con un 73% de materiales opacos en su envoltente y un 10%

en la envoltente expuesta de hormigón armado (estructura). Los muros exteriores son de ladrillo cerámico hueco de 0,30m con revoque y pintura sin aislación y las divisiones interiores son del mismo material de 0,10 m de espesor. Los vidrios son simples de 4mm ($K= 5,8W/m^2°C$, factor solar = 0,87). Como elementos de protección solar el edificio cuenta con balcones de 1.20m de profundidad y persianas corredizas con celosías de madera color blanco (ver Figura 5).

Monitoreo y validación del modelo microclimático

Se realizaron auditorías in situ en un período comprendido entre el 14 de diciembre al 10 de enero. Se utilizaron micro-adquisidores de datos HOBO U12 de temperatura y humedad relativa y se fijaron intervalos de registro cada 15 minutos sincrónicos en todos los instrumentos, criterio adoptado de acuerdo a las recomendaciones de Longobardi y Hancock (24). Los sensores fueron instalados en diferentes ambientes: dos en el interior (estar y habitación) y uno en el exterior (balcón) protegido de la radiación solar. Los mis-

Tabla 2. Propiedades de los materiales ingresados en el modelo de Energy Plus. . Fuente: Elaboración propia, 2019.

Capas	Rugosidad	Espesor [m]	Conductividad [W/m°C]	Densidad [Kg/m3]	Calor Específico [J/Kg°C]
ENVOLVENTE EXPUESTA (ESTRUCTURA)					
Hormigón	Rugoso	0,12	1,7	2400	800
ENVOLVENTE EXPUESTA (MUROS EXTERIORES)					
Revestimiento exterior	Muy rugoso	0,025	0,93	1900	1000
Ladrillo hueco	Rugoso	0,3	0,41	1200	600
Revestimiento interior	Muy rugoso	0,025	0,93	1900	1000
MUROS INTERIORES					
Revestimiento interior	Muy rugoso	0,025	0,93	1900	1000
Ladrillo hueco	Rugoso	0,1	0,41	1200	600
Revestimiento interior	Muy rugoso	0,025	0,93	1900	1000
PISOS / CUBIERTAS					
Yeso	Suave	0,025	0,48	741,3	836,3
Hormigón	Rugoso	0,12	1,7	2400	800
Mortero cemento	Rugosidad Media	0,1	1,63	2400	800
Parket de madera	Suave	0,025	0,11	500	2800



Figura 5. Imágenes y planta tipo del edificio monitoreado. Fuente: Elaboración propia, 2019.

mos se ubicaron a una altura media de 2 metros, siguiendo las recomendaciones de (25) y a una distancia suficiente de la masa de las paredes a los efectos de evitar distorsiones en los datos (26).

Para el ingreso de datos climáticos se conformó el archivo de clima (extensión EPW) con los datos requeridos: radiación global sobre superficie horizontal, radiación difusa sobre superficie horizontal, radiación directa normal al haz, temperatura de bulbo seco exterior, humedad relativa exterior, velocidad y dirección de vientos. Los datos de temperatura y humedad relativa se obtuvieron de las mediciones realizadas en el exterior, mientras que los datos de radiación solar y vientos fueron obtenidos de bases climáticas (27).

Las mediciones efectuadas fueron utilizadas para validar el modelo de simulación dinámica mediante el programa Energy Plus, versión 8.8. Este programa gratuito fue desarrollado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) y es actualmente el software oficial para la simulación del Departamento de Energía de EE.UU. En la Tabla 2 se muestra la descripción de la materialidad opaca ingresada.

La validación se realizó en la unidad de vivienda del 5° nivel debido, por un lado, a la necesidad de aislar los aportes de calefacción o enfriamiento en el interior de los espacios: dicho departamento estuvo desocupado, con ventanas y cortinas cerradas, durante el período de medición, por lo tanto, no se utilizaron medios mecánicos de climatización. Esta situación se observó en los comportamientos térmicos auditados y se corroboró en las entrevistas realizadas a los usuarios (4). La simulación se programó 10 días antes de la fecha seleccionada dado que resulta importante que el modelo físico entre en régimen con anticipación. En la Figura 6 se presentan las curvas del ajuste realizado en el estar, para el período del 17 al 21 de diciembre.

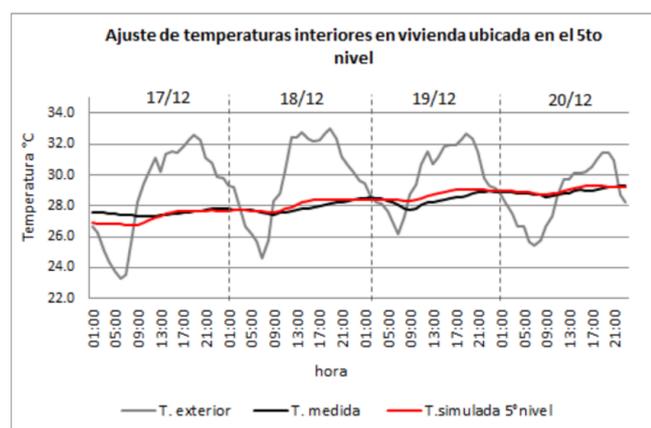


Figura 6. Ajuste de las mediciones en el modelo Energy Plus para la vivienda ubicada sobre la copa de los árboles.

2.4. Ingreso de variables climáticas calculadas por ENVI-met para la simulación de viviendas en diferentes niveles de altura

En cuanto a los flujos de radiación solar, existen algunas diferencias entre los dos modelos de simulación: en relación al efecto de sombreado de la vegetación, ENVI-met considera la vegetación como un elemento de dispersión del medio turbulento y calcula su transmitancia como una

función de la trayectoria óptica del haz solar a través de las hojas y el índice del área foliar; mientras que EnergyPlus la trata como elementos de sombra del contexto, con una transmitancia constante. Desde el punto de vista de la simulación edilicia, EnergyPlus da una descripción realista de los cálculos de sombra, radiación difusa y reflexión solar, pero simplifica los parámetros como la reflectancia del suelo y la transmitancia de los árboles (6). Por estos motivos, en el presente estudio se trabajó en la simulación edilicia con elementos de sombra en las ventanas, considerando las persianas existentes que se encontraban cerradas en el período de medición. Respecto a la radiación y al resto de variables requeridas por el archivo de clima para ingresar en EnergyPlus, se ingresaron los siguientes datos calculados por ENVI-met: radiación global sobre superficie horizontal, radiación difusa sobre superficie horizontal, temperatura de bulbo seco exterior, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad de viento.

A partir de los datos de la distribución horaria de la radiación solar global a 3, 15 y 27 metros obtenidas del modelo ENVI-met para un punto monitor localizado en el canal vial donde se ubica el edificio, simulado para el día 19 de diciembre y teniendo en cuenta la relación entre los ángulos de altitud solar correspondientes a cada hora del día evaluado y la superficie normal al haz - $\beta = 180 - (\text{Ash} + 90)$ - donde β es la inclinación de la superficie perpendicular al haz y Ash es la altitud solar horaria. La radiación horaria directa al haz se calculó mediante el uso del software Geosol (28), luego de establecer β para cada hora, ingresando la radiación global sobre superficie horizontal y los datos geográficos del lugar, utilizando el modelo de día claro de Hottel para verano de latitud media. Esos valores de radiación normal al haz se intruducen en el archivo *.epw para correr las simulaciones en Energy Plus.

En el presente trabajo, el día seleccionado para evaluar los resultados térmicos interiores es el 19 de diciembre, por ser un día representativo del periodo estival. Asimismo, en función de las posibilidades de ingresar los datos climáticos exteriores que ofrece EnergyPlus, se utilizaron los siguientes dos métodos: a) mediante un archivo climático anual (EPW) en el cual se selecciona el periodo específico a simular, y b) mediante un día de diseño, en donde se ingresan manualmente los datos específicos solicitados.

3. RESULTADOS

En función de contemplar el impacto micro climático bajo y sobre la copa de los árboles en alturas medias y altas, se analizó el comportamiento térmico interior de viviendas a diferentes niveles: por un lado, se validó la vivienda monitoreada en el 5to nivel con los datos de ENVI-met, y por otro lado se simuló el comportamiento térmico de las viviendas ubicadas en el 1° nivel (bajo la copa de los árboles) y la del 10° nivel (sobre la copa de los árboles). La Figura 7 muestra el esquema de ingreso de datos climáticos para cada caso.

Los datos calculados por ENVI-met se utilizaron para conformar los archivos climáticos necesarios (Modelo 2 y Modelo 3 en Figura 1) para ingresar en el software Energy Plus mediante los siguientes métodos:

- Modelo 2: Archivo climático (UseWeatherFile) para un periodo determinado (RunPeriod)

Se realizaron tres archivos climáticos ingresando los datos calculados por ENVI-met (Tabla 1) para las alturas de 3 metros (1°er nivel), 12,5 metros (5° nivel) y 27,5 metros (10° nivel). Los datos requeridos para la conformación del archivo de clima (EPW) se repitieron para el período de 10 días anterior a la fecha de análisis seleccionada de modo tal que el modelo entre en régimen con las variables climáticas calculadas.

- Modelo 3: Día de diseño (SizingPeriod:DesignDay)

Se conformó un día de diseño ingresando manualmente los datos calculados con ENVI-met para los tres niveles evaluados, para el 19 de diciembre (Tabla 3). Asimismo, para el cálculo de radiación solar, la versión 8.8 de EnergyPlus permite el ingreso horario de los datos de radiación solar directa (Beam Solar Day Schedule) y difusa (Diffuse Solar Day Schedule), por lo que se trabajó con esta opción, ingresando los datos calculados por ENVI-met para cada altura analizada. Respecto al índice de claridad (KT_a) se consideró el valor medio anual para Mendoza de 0,60 para las tres alturas evaluadas.

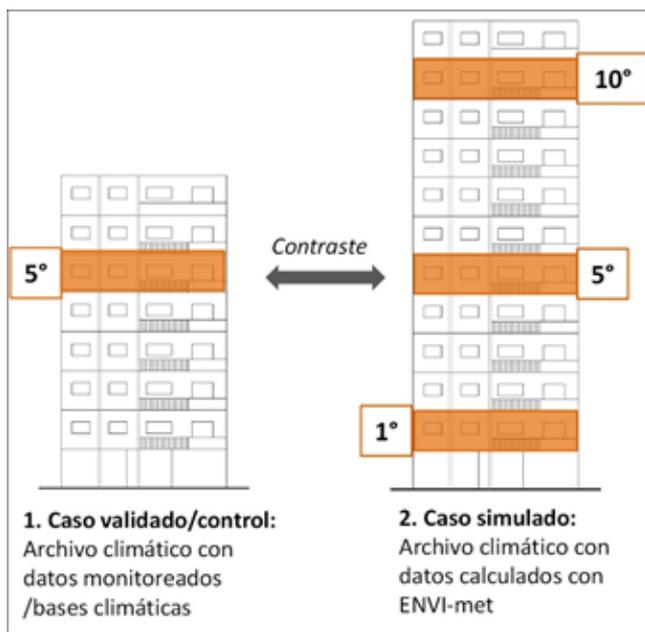


Figura 7. Esquema de ingreso de datos climáticos para cada nivel en altura evaluado.

Tabla 3. Datos microclimáticos ingresados en EnergyPlus para un día de diseño

Datos microclimáticos	1° nivel (3m)	5° nivel (15m)	10° nivel (27m)
Temperatura de bulbo seco máxima	31,4°C	31,4°C	32,2°C
Rango diario de temperatura de bulbo seco	13,1 °C	12,9 °C	12,4 °C
Temperatura de rocío	-0,34°C	-0,79°C	-1,43°C
Presión barométrica	93,386 Pa	93,386 Pa	93,386 Pa
Velocidad de viento	0,53 m/s	0,52 m/s	1,07 m/s
Dirección de viento	124,6 °	124,6 °	124,6 °
Índice de claridad de cielo (KT_a)	0,6	0,6	0,6

La Figura 8 muestra el contraste de las temperaturas interiores de la simulación, ajustadas con las variables climáticas medidas y la simulación con los datos calculados por ENVI-met para el día 19 de diciembre. Se puede observar un grado importante de ajuste ($R^2=0,83$), con diferencias de temperatura interior menores a los 0,50°C. Dichas diferencias se observan durante el período nocturno, en donde la temperatura del aire interior con los datos exteriores monitoreados no desciende, mientras que la temperatura interior con los datos exteriores de ENVI-met disminuye hasta 0,40°C.

La diferencia se debe a que las mediciones de temperaturas exteriores se realizaron en el balcón de la vivienda, en donde la inercia de la envolvente másica repercute en los datos monitoreados; mientras que el dato de temperaturas nocturnas dadas por el simulador urbano no es sensible a esta situación porque el punto de registro se encuentra a 3,5 metros de la fachada.

En la Figura 9 se presentan los resultados térmicos interiores de acuerdo a los dos modelos de ingreso de datos climáticos. Los resultados se analizan en función de comparar dos aspectos: por un lado, las diferencias térmicas según los niveles de altura: bajo la copa de los árboles (1° nivel), y sobre la copa, en niveles medios (5° nivel) y altos (10° nivel). Y, por otro lado, se comparan los resultados de acuerdo a los dos modelos (Modelo 2 y Modelo 3 en Figura 1) de ingreso de datos climáticos exteriores que posibilita el programa EnergyPlus.

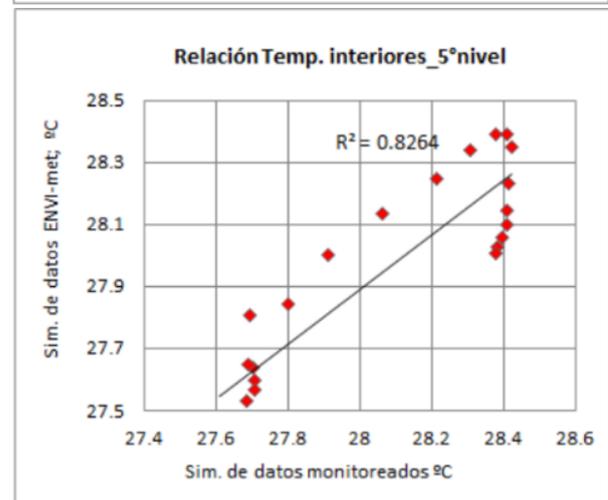
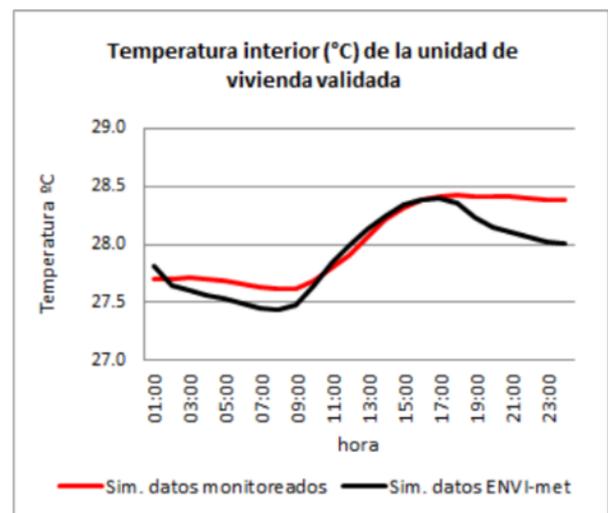


Figura 8. Ajuste de la temperatura interior con datos micro-climáticos de ENVI-met en la vivienda del 5° nivel

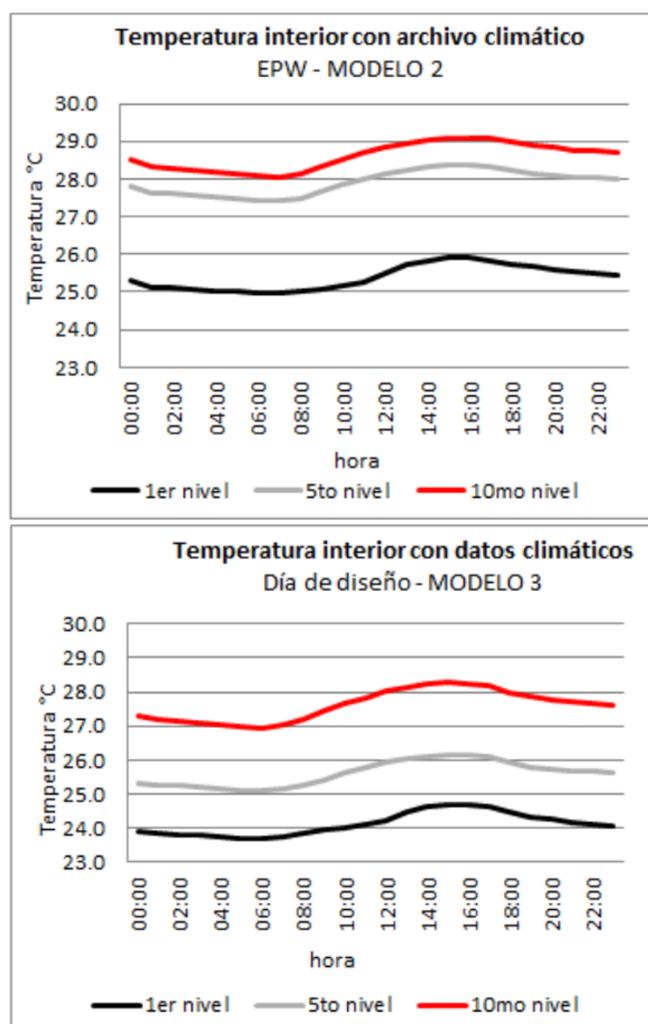


Figura 9. Temperaturas interiores con diferentes conformaciones de ingreso de datos climáticos para los niveles: primero, quinto y décimo.

En el caso simulado con el archivo climático EPW (Modelo 2) la diferencia térmica media resultante entre el nivel medio y el bajo es de 2,5°C, mientras que entre el nivel alto y el medio la diferencia resultó de 0,7°C. En cuanto al caso simulado con un día de diseño (Modelo 3) dichas diferencias son de 1,5°C entre el nivel medio y el bajo, y de 2,0°C entre el nivel alto y el medio.

Respecto a la comparación de los dos modelos evaluados, las temperaturas interiores resultantes con el modelo simulado con archivo climático EPW (Modelo 2) son mayores a los resultados dados con un día de diseño (Modelo 3). Se observa que el nivel en el que las temperaturas interiores son semejantes (diferencia media de 1°C) es el del décimo piso, con un valor medio de 28,6°C para la simulación con archivo climático y de 27,6°C para la simulación con un día de diseño. Mientras que los comportamientos de las viviendas del nivel medio y bajo difieren en cada modelo evaluado en 2,3°C y 1,3°C respectivamente.

Las diferencias entre ambas simulaciones responden a las variaciones en los modelos de radiación para definir la disponibilidad de radiación sobre las fachadas: la simulación con el archivo climático EPW representa de forma más evidente el efecto de sombreado que el árbol produce sobre la fachada en los primeros niveles debido a que el archivo requerido in-

cluye, además de la radiación solar directa y difusa sobre el plano horizontal, la radiación directa normal al haz.

No obstante, ha de tenerse en cuenta que dada la condición de ENVI-met de proporcionar los datos de un día específico, para las simulaciones realizadas con EnergyPlus se repitieron en el archivo EPW los datos micro-climáticos del día en estudio (19 de diciembre) durante los 10 días, de modo que el modelo se estabilice. Mientras que, en la simulación con el “Día de diseño”, se ingresan los datos horarios de radiación directa y difusa, pero no la directa normal al haz. Esto se evidencia en las curvas obtenidas (Figura 9) en donde se puede observar que la temperatura interior del departamento bajo la copa de los árboles se separa de manera considerable (3°C) de las temperaturas de los niveles sobre la copa, mientras que con el Modelo 3 no se evidencia dicha diferenciación dada por la incidencia del arbolado urbano que el Modelo 2 puede representar.

4. CONCLUSIONES

En la presente investigación se avanzó en la generación de herramientas integrales para el modelado energético urbano edilicio. Los resultados revelan las capacidades y ventajas de trabajar con ENVI-met como herramienta para la generación de datos climáticos que incorporan y reflejan la influencia del entorno urbano. Considerando el crecimiento en altura de las ciudades, mediante este método de integración es posible distinguir con mayor precisión las diferencias climáticas dadas en cada nivel de altura en una ciudad de intensa forestación urbana. El alto grado de ajuste (diferencias máximas de 0,50°C) de la temperatura del aire interior ajustada con EnergyPlus versus la utilizada con los datos microclimáticos calculados con el simulador urbano ENVI-met, apoya la fiabilidad de los resultados predictivos de la integración de ambos softwares.

Asimismo, los resultados de la comparación de las temperaturas interiores de acuerdo a los modelos climáticos con los que cuenta EnergyPlus (ingreso de archivo climático EPW y Día de Diseño) muestran que las viviendas ubicadas en niveles altos –a una altura mayor a los 25 metros- presentan temperaturas muy similares. Es posible deducir entonces, que esto se debe a la mayor lejanía en altura de estas viviendas de la influencia micro-climática urbana. Se observa que si bien las temperaturas interiores obtenidas con el archivo climático EPW responden de manera más representativa a la situación micro-climática urbana del contexto en estudio, la opción de simular las temperaturas interiores con el “Día de diseño” puede presentarse también como una opción válida para la integración de los softwares, dada la condición de ENVI-met de contar con los datos climáticos de un día específico.

En trabajos futuros se prevé extender este método de simulación integrada para evaluar las demandas de energía edilicia en escenarios urbanos que modifiquen parámetros relacionados a la materialidad de la envolvente, la morfología edilicia, densidad, porcentaje de vegetación en canales viales, etc. Este conocimiento generado brindará directrices para la planificación urbano/ambiental en pos de alcanzar pautas de diseño en base a configuraciones urbanas que alcancen mejoras en el consumo energético edilicio para ciudades de clima árido. Asimismo, desde el punto de vista edilicio, se podrá contar con datos microclimáticos que apoyen la fiabilidad de los resultados térmicos interiores.

5. AGRADECIMIENTOS

PICT 2017-3248: Valoración Energética y Ambiental de los Espacios Urbanos en Ciudades de Zonas Áridas. Generación de Herramientas de Calificación y Evaluación Predictiva. Titular: Correa Cantaloube, Érica.

PICT 2013-2036: Uso racional de la energía en edificios en altura: integración en la envolvente de sistemas de acondicionamiento pasivo y sistemas productores de energía (fotovoltaicos y solares térmicos). Titular: Ganem, Carolina.

6. REFERENCIAS

- (1) Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being e Current State and Trends*. Washington, DC: Island Press.
- (2) Secretaría de energía (2014) *Informe Nacional de Monitoreo de la Eficiencia Energética de la República Argentina*, 2014. Recuperado de: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37142/S1420670_es.pdf?sequence=4.
- (3) Bórmida, E. (1984). *Mendoza, una ciudad Oasis*. Mendoza: Universidad de Mendoza.
- (4) Balter, J. (2015) *Sustentabilidad de edificios en altura en Ciudades-Oasis. Características arquitectónicas y ambientales para el caso de la ciudad de Mendoza*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de La Plata.
- (5) Reinhart, C. F., y Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202. doi:10.1016/j.buildenv.2015.12.001
- (6) Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., y Meng, Q. (2012). An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy and Building* 54, 243-251. doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.042
- (7) Morakinyo, T.E., Dahanayake, K.W.D., Adegun O.B., y Balogun A.A. (2016). Modelling the effect of tree shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university. *Energy and Building*, 130, 721-732. doi:10.1016/j.enbuild.2016.08.087
- (8) Kuo-Tsang, H., y Yi-Jhen, L. (2017). Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand. *Energy and Buildings*, 154, pp. 448-464. doi:10.1016/j.enbuild.2017.08.054
- (9) Pastore, L., Corrao, R., y Heiselberg, P.K. (2017). The effects of vegetation on indoor thermal comfort: The application of a multi-scale simulation methodology on a residential neighborhood renovation case study. *Energy and Buildings*, 146, 1-11. doi:10.1016/j.enbuild.2017.08.054
- (10) Schwed, D., y Sheng, M. (2017) Assessment of the annual energy demand for cooling of buildings in their urban context in 26 cities in China. *Procedia Engineerin*, 198, 305-312. doi:10.1016/j.proeng.2017.07.087
- (11) Sosa, M., Correa, E., y Cantón, M. (2018). Neighborhood designs for low-density social housing energy efficiency: Case study of an arid city in Argentina. *Energy and Buildings*, 168, 137 -146. doi:10.1016/j.enbuild.2018.03.006
- (12) Alchapar N. Pezzuto C., Correa E., y Labaki L. (2017). The Impact of Different Cooling Strategies on Urban Air Temperatures: The Cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. *Theory & Application Climatology* 130, 35-50. doi:10.1007/s00704-016-1851-5
- (13) Alchapar N., y Correa E. (2016). The Use of Reflective Materials as a Strategy for Urban Cooling in an Arid Oasis City. *Sustainable Cities and Society*, 27, 27 1-14. doi: 10.1016/j.scs.2016.08.015
- (14) Mercado M.V., Barea Paci, G., Esteves, A., y Filippín, C. (2018). Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante EnergyPlus. *Revista Hábitat Sustentable*, 8, 54-67. doi: 10.22320/07190700.2018.08.01.05
- (15) Barea, G., Mercado, V. (2016). Estudio de sistemas de climatización natural innovativos (Ventanas Multiazimutales - SIRASOL) en distintas localidades – 3er Congreso Sudamericano de Simulación de Comportamiento de Edificios. 4ta Jornada – BIM – FADU.UBA.
- (16) Balter, J., Ganem, C., y Dicoli, C. (2016). On high-rise residential buildings in an Oasis-city: thermal and energy assessment of different envelope materiality above and below tree canopy. *Energy and Buildings*, 113, 61-73. doi:10.1016/j.enbuild.2015.11.011
- (17) Cantón, M.A., Mesa, A., y De Rosa, C. (2004). Análisis de los modelos de desarrollo del arbolado urbano como estrategia de control de la radiación solar en la estación cálida. *II Reunión Binacional de Ecología. Ecología en Tiempos de Cambio*. Mendoza.
- (18) Kottke, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., y Rubel, F. (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification update. Sustainable United Nations. (2006). *Meteorologische Zeitschrift* 15, 259–253. doi 10.1127/0941-2948/2006/0130
- (19) Mendoza_Aero_Observations (2019) Temperature Monitoring Station: MENDOZA AERO. Available at: <http://berkeleyearth.lbl.gov/stations/151655>
- (20) Alchapar, N. L., Correa, E. N., Cantón, M. A. (2014). Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *Energy and Buildings* 69, 22–32. doi:10.1016/j.enbuild.2013.10.012
- (21) Martínez, C., Ruiz, M., Atencio, L. (2017). *Proyecto integral de forestación y reforestación urbana para Mendoza. Sustentabilidad ambiental del bosque urbano para ciudades de zonas áridas de Argentina-* Etapa 1 UNICIPIO - Provincia de Mendoza. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía INAHE – CCT CONICET Mendoza. 96 pp.
- (22) Bruse E. ENVI-met 3.1. On-Line Manual. 2006. Disponible en: <http://www.envi-met.com>.
- (23) Balter, J., Ganem, C., y Cantón, M.A. (2013) Evolución morfológica y materialización en edificios en altura en la ciudad de Mendoza. Incidencias en el comportamiento térmico interior. *Revista Área*, 19, 8- 25.
- (24) Longobardi, M., Hancock, M. (2000). *Field trip strategies*. Proceedings of TIA.Oxford.
- (25) Kolher, N., y Hassler, U. (2002). The building stock as a research object. *Building Research & Information*, 30, 226-236. doi:10.1080/09613210110102238

- (26) Oke, T.R. (2004). *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. Iom Report. World Meteorological Organization. Geneva.
- (27) Repository of free climate data for building performance simulation (2019). Extraído de: <http://climate.onebuilding.org/>
- (28) Hernández, A. (2003). Geosol: Una herramienta computacional para el cálculo de coordenadas solares y la estimación de irradiación solar horaria. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7 (2), 19-24.