

Potencial de las Herramientas de Simulación para la Planificación Sustentable del Desarrollo Urbano.

Noelia L. Alchapar¹, Erica N. Correa²

Resumen

El uso de métodos numéricos como herramienta de diseño y planificación urbano/ambiental tiene ventajas sobre las mediciones exhaustivas de campo: versatilidad en el tratamiento de múltiples variables y procesos atmosféricos. Para cuantificar las capacidades de dichos modelos en el pronóstico microclimático urbano se monitoreó térmicamente una zona de gran potencialidad para la rehabilitación urbana del Área Metropolitana de Mendoza. Sobre éste recorte se simularon 12 escenarios que modifican su configuración morfológica y material -densidad edilicia, porcentajes de vegetación y materiales-. La investigación revela las capacidades y ventajas de trabajar con el software "ENVI-met 3.1" como instrumento de planificación urbana sustentable. El alto grado de ajuste de la temperatura de aire de las curvas diarias medidas en comparación con las curvas simuladas apoya la fiabilidad de los resultados predictivos en relación con el comportamiento térmico urbano tanto para el día como durante la noche.

Palabras clave: planificación sustentable; pronóstico microclimático urbano; ENVI-met 3.1 software.

Simulation Tools Potential for Sustainable Planning Urban Development.

Abstract

The use of numerical methods as a tool for design and urban / environmental planning has advantages over the exhausted field measurements: versatility in treating multiple variables and atmospheric processes. To quantify the capabilities of these models in the urban microclimate forecast, an area of great potential for urban rehabilitation of Greater Mendoza was thermally monitored. In this area were simulated 18 scenarios that modify morphological and material configuration -building density, vegetation percentages and materials-. This research reveals the capabilities and advantages of working with the "ENVI-met 3.1" software as a tool for sustainable urban planning. The high degree of adjustment of the air temperature curves measured daily

¹ y ² Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). Centro Científico y Tecnológico de Mendoza CCT-Mendoza. CONICET. Av. Ruiz Leal s/n. Parque General San Martín. Ciudad. C.C.131 C.P. 5500. Mendoza, Argentina. Tel. +54 261-5244322. Fax : +54 261-4287370. e-mail: nalchapar@mendoza-conicet. gob.ar.

compared with simulated curves supports the reliability of the predictive results regarding urban thermal behavior for both day and overnight.

Keywords: sustainable planning; urban microclimate forecast; ENVI -Met software.

Introducción

El uso de métodos numéricos para el pronóstico del clima urbano posee una clara ventaja sobre mediciones exhaustivas de campo: la versatilidad en el tratamiento de múltiples variables y procesos atmosféricos. Lo que explica la gran difusión de las simulaciones como herramientas de análisis (Arnfield, 2003).

En un principio los modelos climáticos urbanos se pueden clasificar de acuerdo a su escala, desde kilómetros a pocos centímetros. Por lo general, los modelos desarrollados para fines climáticos urbanos utilizan una menor resolución espacial (Masson, 2000). Estos programas son probablemente más adecuados para temas de planificación urbana -escala mayor a 1/5.000- que para problemas de diseño urbano.

Los modelos de microclima urbano varían sustancialmente en función de su base física y su resolución espacio/temporal. En la micro escala, el flujo de viento en tres dimensiones (3D) es el modelo mejor fundamentado (Johnsson & Hunter, 1995), mientras que los modelos que incluyen todos los procesos térmicos y energéticos hidrológicos son muy pocos, entre otras cosas porque consumen mucho tiempo de procesamiento. Tales modelos son simplificados suponiendo varias parametrizaciones y limitaciones con el fin de ahorrar tiempo y resolver problemas relacionados con las variables complejas de determinar. Por lo general, estos modelos utilizan esquemas de turbulencia simplificados (Mills, 1993; Arnfield, 2003). Los modelos de cañón urbano son también ejemplos típicos de cálculos en 2D en lugar de 3D, determinando los flujos de energía mediante suposiciones de configuraciones predefinidas de calles, formas y alturas edilicias uniformes, superficies de suelo secas, sin almacenamiento de calor en la estructura edilicia, y sin vegetación –es decir, sin calor latente-(Herbert et al., 1998).

Por otra parte, los modelos que combinan el modelado en 3D y el modelado de flujo de energía en 2D son más rápidos y más exactos (Arnfield et al., 1998). Otros modelos son más empíricos y se basan en ecuaciones derivadas de numerosos datos medidos disponibles, se realizan en un contexto específico, por ejemplo el modelo CTTC (Swaid & Hoffman, 1990; Shashua -Bar & Hoffman, 2000). Para el caso particular de Mendoza el modelo IZA (Ruiz et al., 2014) o el modelo de temperaturas propuesto por Ruiz y otros (2015).

Muchos de estos modelos trabajan con el volumen de cañón urbano como un conjunto, es decir, que todos los cálculos se realizan para un punto en el nivel de la calle y las diferencias espaciales dentro del cañón no se consideran. Por otro lado, los modelos basados en CAD tratan de reproducir con precisión las escenas urbanas en 3D. Dado que estos modelos están especialmente dedicados a los diseñadores (Teller & Azar, 2001; Asawa et al., 2004) evalúan la interdependencia entre el aire interior y exterior en términos de disponibilidad de luz solar en las superficies urbanas, por ejemplo, SOLENE (Groleau & Miguet, 1998). Se focalizan en el cálculo de las temperaturas superficiales y temperatura radiante. Sin embargo, la mayor parte de los datos meteorológicos -velocidad del viento, temperatura de aire, etc.- son variables conocidas.

Son muy pocos los modelos de microclima que evalúan el confort térmico resultante de los cambios del microclima urbano (Teller & Azar, 2001; Asawa et al., 2004). Esto se debe principalmente a la dificultad de determinar los flujos radiativos de zonas urbanas complejas sobre un cuerpo. El tema del modelado exterior del confort térmico es así a menudo calculado con métodos simplificados y promediados, dónde se eliminan muchos de los procesos atmosféricos. Estos datos son ingresados por el usuario, lo que hace dificultosa la disponibilidad de todas las variables necesarias (por ejemplo, los datos diarios de velocidad de viento, temperatura de aire, humedad relativa). El confort térmico en el modelo TOWNSCOPE (Teller & Azar, 2001) es calculado sobre una base diaria, asumiendo una media diaria de temperatura de aire (T_a), velocidad de viento (v) y humedad relativa (HR) que debe permanecer constante durante la simulación.

Por último, un aspecto decisivo en la elección de un modelo es la cantidad de datos de salida. La información resultante puede variar desde un único dato, como es el caso de la temperatura de aire (Swaid & Hoffman, 1990), a una descripción detallada microclimática, como es el caso del modelo ENVI-met (Bruse, 1999). Metodológicamente, ENVI-met 3.1 es una herramienta adecuada para pronosticar los cambios microclimáticos de los entornos urbanos y evaluar el confort térmico de los peatones. En efecto, el modelo tiene una base física sólida y bien fundamentada y ofrece muchas ventajas en comparación con otros modelos de microclima urbano disponibles (Arnfield, 2003). Esto se debe a la gran cantidad de información que puede obtenerse a partir de la entrada de sólo un conjunto de variables de borde descriptivas del tipo de clima donde se implanta la ciudad u disponibles a partir de datos de estaciones meteorológicas de meso-escala. Por estas razones en la presente investigación se analiza el potencial de éste software.

Objetivo

Evaluar las capacidades en el pronóstico microclimático del simulador urbano ENVI-met 3.1, mediante el ajuste de los datos simulados con los medidos en un día de referencia y la evaluación de sensibilidad al modificar parámetros morfológicos y materiales (densidad edilicia, porcentaje de vegetación, albedo de superficies materiales).

Características de ENVI-met 3.1

ENVI-met es un programa de acceso gratuito, desarrollado por Michael Bruse en el Instituto de Geografía de la Universidad de Mainz - Alemania. Es un modelo computacional tridimensional que trabaja a escala de microclima urbano, diseñado para simular 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 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 (Bruse, 2006).

El uso de esta herramienta está ampliamente validada a nivel internacional (Soo-Gon Han, 2007; Samaali, 2007; Acero, 2010; Krüger et al., 2011; Chowa & Brazel, 2012; Perini & Magliocco, 2014; Taleghani et al., 2015; Tanhuanpää et al., 2015) pero en nuestro país -Argentina- su desarrollo es aún incipiente (Alchapar 2015).

El esquema de construcción de ENVI-met se compone de un modelo núcleo de tres dimensiones -3D- (que incluye sub-modelos: atmosféricos, de vegetación y suelo), y un modelo de bordes en una

dimensión -1D-. La tarea del modelo en 3D es simular todos los procesos dentro del modelo que contiene el área actual (área de análisis). El límite horizontal superior y el límite vertical a barlovento actúan como una interfaz entre el modelo de 1D y el modelo central en 3D. El modelo 1D extiende el área simulada hasta una altura de 2.500 metros (es decir, con una profundidad media de una capa límite) y transfiere todos los valores iniciales al límite superior del volumen correspondiente al modelo en 3D de la simulación en curso.

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 máximo (h_{max}) de los elementos urbanos dentro del modelo ($Z \geq 2 * h_{max}$). Cada módulo ($\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$) puede ser parte de un edificio, de la vegetación, o de un espacio abierto (por ejemplo, la calle). 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.

El modelo de suelo suministra al sistema las temperaturas y humedades superficiales. El modelo de suelo es 1D, excepto las grillas de la superficie de la tierra que están conectadas en 3D para asegurar la homogeneidad. Las grillas de anidación conforman una "zona de amortiguación", que actualizan los valores iniciales de las variables en el borde del área del núcleo del modelo 3D, con el fin de evitar perturbaciones numéricas, es decir efectos de frontera. Las grillas de anidación también ajustan el perfil inicial de viento en el modelo 1D de borde, de modo que el perfil de viento en 3D dentro del modelo central sea representativa. La zona de anidación se extiende por lo menos al doble de los obstáculos más altos en el área del modelo ($2 * h_{max}$).

Las ecuaciones que rigen ENVI-met son demasiado numerosas para ser presentadas en profundidad en este trabajo. Sin embargo el modelo está bien documentado en Bruse & Fleer (1998), Bruse (1999) y se actualiza con regularidad en el sitio www.envi-met.com, allí también se puede descargar el programa de acceso libre y obtener información sobre versiones actualizadas.

Área de intervención

Se monitoreó una zona consolidada del Área Metropolitana de Mendoza que presenta un crecimiento sostenido. El sector está inserto en un área de gran potencialidad para la rehabilitación urbana que permite sentar las bases para un futuro crecimiento vertical debido a una serie de factores como: proximidad al centro de la ciudad, localización en relación a los ejes de circulación y disponibilidad de servicios e infraestructura (32°54'47"S, 68°50'46"O). El área evaluada es de uso residencial, baja densidad y tiene una superficie de 210 x 210 metros, configuración ortogonal y $H/W=0.3$. Presenta aproximadamente un 60 % de forestación principalmente *morus alba*, especie arbórea de 15 m de alto y hoja caduca. De acuerdo a la zona climática local según clasificación del índice LCZ (Stewart et al., 2014) el área evaluada corresponde a LCZ 6a.

Monitoreo

Se recogieron las variables de temperatura (Ta) humedad relativa (HR) del aire por hora para calibrar los datos simulados con los medidos. Para ello se colocó una estación fija tipo *HOB0 H08-003-02* a 2.5 m de altura dentro del canal vial (punto fijo-Pf-). Se tomaron registros de velocidad de viento (Vv) desde una estación meteorológica móvil (EMM) tipo *ONSET Weather HOB0 H21-001*. También se recogieron datos de temperatura superficial de suelo ($Tsuelo$) en el punto Pf durante un periodo de

12:00 hs con un termómetro infrarrojo tipo *FLUKE 66*. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.1)

El monitoreo se llevó a cabo en la temporada de verano, en días estables sin ocurrencia de precipitaciones. Los datos utilizados para la calibración corresponden al 14 de enero por presentar condiciones estándares al periodo estival de Mendoza (temperatura máxima: 36 °C; temperatura mínima: 21 °C; temperatura promedio: 27 °C; radiación global máxima 1.174 W/m²; y humedad relativa promedio 25 %).

Figura 1. Vista aérea del área de estudio y ubicación de la estación fija (Pf). Detalle de instrumentación utilizada para el relevamiento de datos.



Fuente: Fotografía Satelital. Google Earth (izquierda).

Simulación con ENVI-met

El modelado del espacio físico en el simulador fue realizado sobre en una versión 100 x 100 x 30. La resolución del área es de 3 x 3 x 3m, el número de grillas totales es de x: 70; y: 70; z: 30, debido a que la superficie de referencia es de 210 x 210 m.

Los datos de configuración son 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 (z₀) al punto de referencia; (ii) temperatura atmosférica inicial (K) y humedad específica (gr. agua/kg. aire) a 2.500m de altura. Los datos se obtuvieron del Aeropuerto Francisco Gabrielli – Estación n°87418- en colaboración con la Universidad de Wyoming; (iii) ajuste de radiación solar (W/m²). El programa utiliza los datos no perturbados de localización geográfica previamente seleccionados para calcular la altura solar, azimut y flujo de radiación (directa, difusa y global), estos datos fueron validados con la estación meteorológica del Aeropuerto Francisco Gabrielli.

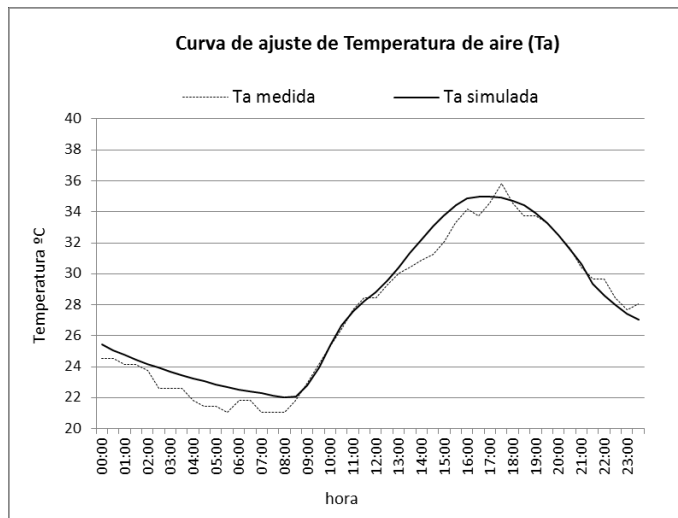
Análisis de precisión según distintos indicadores

En orden de cuantificar las capacidades en el pronóstico microclimático del simulador urbano ENVI-met 3.1 se procede a evaluar el ajuste del modelo de simulación con los datos medidos en el día de referencia.

Ajuste de temperatura de aire medida ($T_{a_{medida}}$) y simulada ($T_{a_{simulada}}$)

Para determinar la precisión del modelo numérico se validó la curva de temperatura de aire simulada con ENVI-met con el punto fijo monitoreado (Pf) en el día de referencia.

Figura 2. Ajuste de curva de temperatura de aire (°C) entre el modelo numérico ($T_{a\text{simulada}}$) y medida ($T_{a\text{medida}}$).

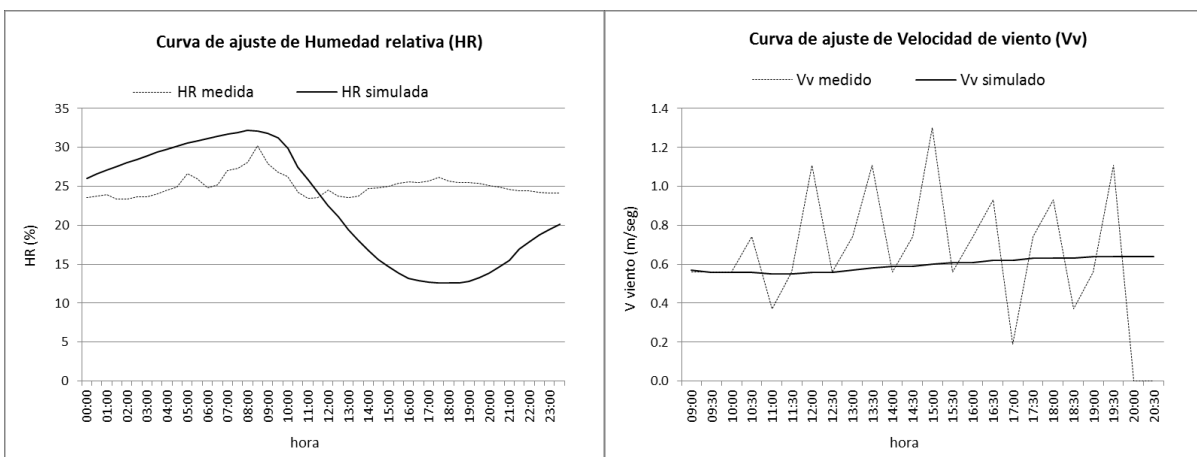


En la figura 2 se observa un buen ajuste entre las curvas. Para determinar el nivel de precisión se calcularon parámetros estadísticos. Coeficiente de determinación $R^2 = 0,98$, error típico de 0,7 y error estándar de la media igual a 0,025 (ver Tabla 1).

Ajuste de humedad relativa medida y de velocidad de viento, medidas ($HR_{\text{medida}} - Vv_{\text{medida}}$) y simuladas ($HR_{\text{simulada}} - Vv_{\text{simulada}}$)

En la figura 3 se grafica la curva diaria de humedad relativa (%) a escala peatonal (2,5m) y la curva de velocidad de viento (m/s) de los datos del día de referencia y los arrojados en modelo numérico ENVI-met.

Figura 3. Ajuste de curva de humedad relativa (%) entre el modelo numérico (HR_{simulada}) y medida (HR_{medida}) (izquierda). Ajuste de curva de velocidad de viento (Vv) entre el modelo numérico (Vv_{simulada}) y medida (Vv_{medida}) (derecha).



Las curvas de la figura 3.a muestran que el simulador tiende a sobrestimar el porcentaje de humedad hasta las 11:00 hs. y luego experimenta una caída abrupta registrando su máxima diferencia en el período de mayor ganancia de calor (entre las 17:00 y 18:00 horas) donde la humedad relativa simulada es 13 % menor a la medida. En el período de enfriamiento (8:00hs) se registra una diferencia de 2 % entre la curvas. El promedio de HR_{simulada} es de 23 % y la HR_{medida} es de 25 %.

Para el pronóstico de humedad relativa el simulador tienen un error típico de 1,4, el doble de magnitud que el registrado en el ajuste de temperatura de aire, y un error estándar de la media igual a 0,062.

Este hecho puede deberse a múltiples razones, el modelo utilizado por el simulador sin duda representa de manera adecuada el comportamiento de la humedad relativa (HR) de una zona árida, en la cual al no haber variaciones significativas del contenido de humedad específica en la atmósfera debido a aportes al balance hídrico por evapotranspiración o lluvias, la HR muestra un comportamiento opuesto al de la temperatura, es decir cuando la temperatura del aire -temperatura de bulbo seco- aumenta la HR desciende proporcionalmente y a la inversa. Eso está bien reflejado por la curva teórica que arroja el simulador. Sin embargo la curva medida-caso real- está afectada por otros aspectos que no son sólo atribuibles a la naturaleza del fenómeno físico sino que están relacionados con las limitaciones y características del instrumento de medición. El sensor utilizado tiene un rango de sensibilidad confiable por encima del 20 % de HR y hasta el 95 %. El día monitoreado, presenta rangos muy bajos de humedad por lo que la respuesta del sensor muestra menor sensibilidad a los cambios de humedad de la atmósfera. Es por ello que en este caso la magnitud del error cometido en la predicción horaria de la HR es compartido entre el modelo numérico para la simulación de la variable y la sensibilidad del sensor utilizado para monitorearla. Cómo es conocido la humedad relativa en la atmósfera es una variable de mezcla dependiente de varios componentes, como la velocidad del aire y la fisiología de la vegetación introducida al simulador cuyas especies disponibles en la base de datos de vegetación ajustan físicamente pero no ajustan completamente con los parámetros fisiológicos del arbolado urbano de Mendoza. De todos modos es importante destacar que este parámetro no ha influenciado significativamente el balance térmico y esto se ve reflejado en el buen ajuste de la curva de temperatura y también del dato de HR promedio.

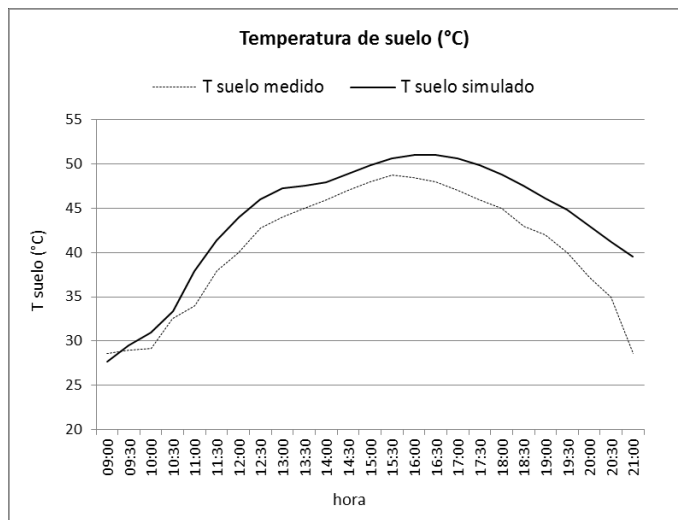
Lo mismo ocurre con la velocidad de viento, las curvas de la figura 3.b evidencian que el modelo numérico que utiliza ENVI-met no ajustan hora a hora con la Vv_{medida} , registran un error típico de 0,335 y estándar de 0,56 m/s. Sin embargo calcula de manera más precisa el promedio: $Vv_{simulada} = 0,60$ m/s y la $Vv_{medida} = 0,65$. El parámetro estadístico que mostró mayor ajuste fue la moda con registros de velocidad de viento idénticos tanto en la curva simulada como la medida ($Vv_{moda\ simulada} = 0,56$ m/s).

Estos resultados ratifican el hecho de que estos fenómenos no sólo son complejos de simular sino que también de medir. Otro aspecto a destacar es que como el área de estudio está inserta en una zona árida registra bajas frecuencias y velocidades de viento. Por lo tanto en el modelo real éstas variables no son de alto impacto en el balance térmico, siendo probable que tampoco lo sean en el modelo teórico. Resultando suficiente para el ajuste preciso del balance térmico el cálculo de los datos promedios diarios de velocidad de viento y HR. (Ver T_a en Figura 2 y Tabla 1)

Ajuste de temperatura de suelo ($T_{suelo_{medida}}$) y simulada ($T_{suelo_{simulada}}$)

En la figura 4 se grafica la temperatura superficial de los pavimentos dentro del área de estudio ($T_{suelo_{medido}}$) y la temperatura superficial ($T_{suelo_{simulada}}$) calculada por el modelo numérico ENVI-met, durante un periodo de 12 hs (9:00 a 21:00 hs).

Figura 4. Ajuste de curva de temperatura superficial de suelo (°C) entre el modelo numérico (Tsuelo_{simulada}) y medida (Tsuelo_{medida}).



La grafica evidencia que el simulador predice de manera precisa la tendencia de la curva de temperatura superficial del área evaluada, registrando un coeficiente de determinación (R^2) de 0.90. Sin embargo se observa una sobrestimación de los valores absolutos calculados, la curva simulada tiene un error típico de 2,3 y error estándar de la media igual a 0,051. El promedio de Tsuelo_{medido} es de 41 °C y el promedio de Tsuelo_{simulado} es de 44 °C. (Figura 4 y Tabla 1)

Tabla 1. Indicadores registrados in-situ (medidos) y calculados por el software ENVI-met 3.1 (simulados), según estadísticos promedios (prom); amplitud (amp); máximo (max); mínimos (min).

TEMPERATURA DE AIRE (%)	Ta medida	Ta simulada	HUMEDAD RELATIVA (%)	HR medida	HR simulada	VELOCIDAD DE VIENTO (m/seg)	Vv medida	Vv simulada
min	21	22	min	23	13	min	0,19	0,55
max	36	35	max	30	32	max	1,3	0,64
amp	15	13	amp	7	20	amp	1,11	0,09
prom	27	28	prom	25	23	prom	0,65	0,6

Modificación de parámetros morfológicos y materiales

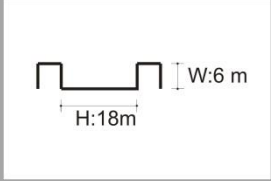
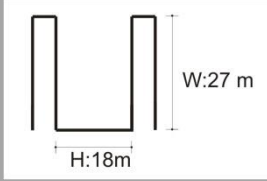
En ésta sección, se evalúa el impacto de la modificación de diferentes parámetros morfológicos y materiales sobre las temperaturas de aire exterior, humedad relativa y temperaturas superficiales. Para ello fueron simulados 18 escenarios que modifican densidad edilicia, porcentajes de vegetación dentro del canal vial y nivel de albedo superficial de materiales de la envolvente urbana. Fueron establecidos los siguientes rangos:

- *Densidad edilicia:*
 - B:** Baja densidad. Relación alto y ancho de canal vial (H/W) igual a 0,3.
 - A:** Alta densidad. Relación alto y ancho de canal vial (H/W) igual a 1,5.
- *Porcentajes de vegetación:*
 - a:** 60 % de vegetación dentro del canal vial;

- b:** 20 % de vegetación dentro del canal vial;
- c:** 0 % de vegetación dentro del canal vial.
- *Rangos de albedo (\hat{a}):*
 - R1:** Albedo bajo. Promedio de $\hat{a}=0,28$;
 - R2:** Albedo alto. Promedio de $\hat{a} =0,75$;
 - R3:** Albedo combinado, en éste rango se distingue albedo bajo en superficies horizontales - paredes y pavimentos- y en superficies verticales -paredes-. Promedio de $\hat{a} = 0,60$.

En tabla 2 se enumeran los escenarios según configuración morfológica y material.

Tabla 2. Codificación de escenarios según densidad, porcentaje de vegetación y rangos de albedo.

		BAJA DENSIDAD (H/W=0,3)			ALTA DENSIDAD (H/W=1,5)		
							
		ALBEDO			ALBEDO		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
VEGETACIÓN	60%	B1.a*	B2.a	B3.a	A1.a	A2.a	A3.a
	20%	B1.b	B2.b	B3.b	1.b	A2.b	A3.b
	0%	B1.c	B2.c	B3.c	A1.c	A2.c	A3.c

* Corresponde a las características del área actual de estudio.

- *Modificación de la densidad edilicia: A: alta densidad; B: baja densidad.*

Se observa que las configuraciones en alta densidad registran menores temperaturas de aire máximas ($T_{a_{max}}$) que los escenarios de baja densidad, debido a las sombras que proyecta la alta concentración edilicia. Los escenarios en alta densidad son hasta 3,5 °C más fríos que en baja densidad. La alternativa de alta densidad con 60 % de vegetación y albedo combinado es la que registra menores T_a (ver A3.a en Tabla 3).

Durante el periodo de enfriamiento la humedad relativa (HR_{max}) oscila entre 30 y 34 % en escenarios de baja densidad y entre 22 y 30 % en escenarios de alta densidad. Esto pone de manifiesto el efecto de isla seca que genera el incremento de masa térmica asociada a la densificación urbana.

Durante la ocurrencia de las máximas temperatura superficiales los escenarios de alta densidad registran un $T_{suelo_{max}}$ que oscila entre 37° y 63°C, mientras que en baja densidad oscila entre 40° y 63°C. La alternativa con 60 % de vegetación, alto albedo y alta densidades el escenario con menores T_{suelo} (ver A2.a en Tabla 3)

- *Modificación de porcentajes de vegetación: a: 60 %; b: 20 %; c: 0 %.*

Incrementar la vegetación es la estrategia general que aplicada a cualquier configuración morfológica y material ofrece mayores posibilidades de mejora de la condición de habitabilidad térmica exterior.

Disminuye las $T_{a_{max}}$ hasta 3 °C (ver B3.a vs B3.c en Tabla 3). Incrementa la HR_{max} hasta 5 % y además disminuye la T_{suelo} hasta 9 °C (ver A3.a vs A3.c en Tabla 3).

- *Modificación del nivel de albedo: R1: bajo; R2: alto; R3: combinado.*

Los escenarios con albedo combinado (alto albedo en superficies horizontales y bajo albedo en superficies verticales) resulta las alternativas más efectiva bajo todas las configuraciones analizadas en orden de mejorar la habitabilidad de los espacios exteriores manteniendo el 60 % de vegetación (ver B3.a vs B1.a y A3.a vs A1.a en Tabla 3). Estos escenarios registran disminuciones de hasta 3 °C en $T_{a_{max}}$ y de hasta 12 °C en $T_{suelo_{max}}$.

Tabla 3. Temperatura de aire (T_a °C), humedad relativa (HR %), temperatura de suelo (T_{suelo} °C), y Temperatura media radiante (T_{mr} °C) mínimas (min), máximas (max) y promedios (prom) para los 18 escenarios simulados, del total de los escenarios simulados.

BAJA DENSIDAD										ALTA DENSIDAD									
COD.	Ta (°C)			HR (%)			T suelo (°C)			COD.	Ta (°C)			HR (%)			T suelo (°C)		
	min	max	prom	min	max	prom	min	max	prom		min	max	prom	min	max	prom	min	max	prom
B1.a*	22	36	28	13	32	23	27	51	37	A1.a	23	34	28	15	29	23	28	52	38
B1.b	23	37	29	11	29	20	29	62	43	A1.b	24	35	29	12	25	19	29	63	43
B1.c	23	37	30	10	29	19	29	63	43	A1.c	24	35	29	12	24	18	29	63	43
B2.a	22	34	27	13	33	23	26	43	34	A2.a	23	35	28	13	27	20	24	37	30
B2.b	23	36	29	11	30	21	27	49	37	A2.b	24	35	29	12	25	18	29	53	39
B2.c	23	36	29	11	29	20	27	50	37	A2.c	24	35	29	11	23	17	29	52	39
B3.a	22	33	27	14	33	24	26	40	32	A3.a	23	32	27	17	30	24	27	40	33
B3.b	22	35	28	12	30	21	27	47	36	A3.b	23	33	28	14	27	21	27	46	35
B3.c	23	36	29	11	29	20	27	48	36	A3.c	24	34	28	13	25	19	28	47	35

En adición estos datos evidencian que el simulador es una buena herramienta para determinar la mejor condición térmica según distintas configuraciones y parámetros referentes al planeamiento y diseño urbano.

Conclusiones

El alto grado de ajuste de la temperatura de aire de las curvas diarias medidas en comparación con las curvas simuladas apoya la fiabilidad de los resultados predictivos en relación con el comportamiento térmico urbana tanto para el día como durante la noche. El pronóstico de la humedad relativa muestra deficiencias debido a las características del sensor utilizado para monitorear la realidad y las características de la fisiología vegetal incorporada en el simulador, la cual no se ajusta completamente con los forestales urbanos locales.

La principal ventaja del ENVI-met es que es un modelo que busca reproducir los principales procesos atmosféricos que afectan al microclima sobre bases física fundadas, tales como las leyes fundamentales de la dinámica y la termodinámica de fluidos (Ali-Toudert, 2005). De acuerdo con los objetivos del presente trabajo, ENVI -met posee las siguientes ventajas:

- ENVI -met simula la dinámica microclimática dentro de un ciclo diario. El modelo es dinámico, pronostica todos los procesos de cambio, incluyendo flujos de viento, turbulencia, flujos de radiación, temperatura y humedad.
- Es posible una representación detallada de estructuras y materialidades urbanas complejas, es decir, edificios con diferentes formas y alturas, y propiedades ópticas de materiales, características muy relevantes en el desarrollo de éste estudio.
- La vegetación es considerada no sólo como un obstáculo poroso al viento y a la radiación solar, sino también mediante la inclusión de los procesos fisiológicos de evapotranspiración y fotosíntesis. Se pueden seleccionar numerosas tipologías de vegetación con propiedades específicas. El suelo también se considera como un volumen compuesto de varias capas y tipologías.
- El modelo requiere un número limitado de entradas y proporciona un gran número de datos de salida. La alta resolución espacial (hasta 0,5 m en sentido horizontal) y temporal (hasta 10 segundos) permitir una detallada lectura de los cambios micro climáticos.

Bibliografía

- Acero J. (2010). *Influencia de la vegetación en la calidad del aire y el clima urbano*. CONAMA, 1,1-13.
- Alchapar, N. (2015). *Materiales de la envolvente urbana. Valoración de su aptitud para mitigar la isla de calor en ciudades de zonas áridas* (Tesis Doctoral). Universidad nacional de salta. Facultad de ciencias exactas.
- Ali-Toudert F. (2005). *Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate*. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg No. 15. <http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/2078>
- Arnfield J., Herbert J., Johnson G. (1998). *A numerical simulation investigation of urban canyon energy budget variations*. Proc. 13th Int. Conf. on Biometeorol and Aerobiol, Albuquerque, New Mexico, AMS: 2-5.
- Arnfield, A. (2003). *Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island*. International Journal of Climatology, 23 (1), 1-26. Doi: 10.1002/joc.859.
- Asawa T., Hoyano A., Nakaohkubo K. (2004). *Thermal design tool for outdoor space based on numerical simulation system using 3D-CAD*. Proc. 21th Int. Conf. on PLEA, Eindhoven. Netherlands, 2, 1013-1018.
- Bruse E. ENVI-met 3.1. On-Line Manual. 2006. Disponible en: <http://www.envi-met.com>.
- Bruse M. (1999). *Die AuswirkungenkleinskaligerUmweltgestaltungauf das Mikroklima*. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-metzur Simulation der Wind-, Temperatur-, und Feuchtverteilung in städtischen Strukturen. PhD Thesis, Univ. Bochum, Germany.
- Bruse M., Fleer H. (1998). *Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model*. Envir. Model. Software, 13(3-4), 373-384. Doi: 10.1016/S1364-8152(98)00042-5
- Bruse, M. (2009). *StadtlandschaftimKlimawandel - Zu den Grundlagen des städtischenMikroklimas*. Collinet, HD and Pesch, F (eds). StadtundLandschaft, KlartextVerlagEssen.
- Chowa W, Brazel, A. (2012). *Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city*. Building and Environment, 47, 170-181. Doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.027
- Groleau D., Miguet F. (1998). *Solèneet la simulation des éclairgements directs et diffuse des projets architecturaux et urbains*. IBPSA France '98. SophiaAntipolis. 61-65.
- Herbert J., Johnson G., Arnfield J. (1998). *Modelling the thermal climate in city canyons*. Envir. Model. Software, 13 (3-4): 267-277. Doi: 10.1016/S1364-8152(98)00027-9
- Johnsson G., Hunter L. (1995). *A numerical study of dispersion of passive scalars in city canyons*. Boundary-Layer. Meteorol, 75 (3), 235-262. Doi: 10.1007/BF00712696

- Krüger E., Minella F., Rasia F. (2011). *Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil*. Building and Environment, 46(3), 621-634. Doi: 10.1016/j.buildenv.2010.09.006
- Masson V. (2000). *A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*. Boundary-Layer Meteorol, 94 (3), 357-397. Doi: 10.1023/A:1002463829265
- Mills G. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon I. Model structure and sensitivity test. Atmos. Envir, 27B (2), 157-170. Doi: 10.1016/0957-1272(93)90002-N
- Observatorio Aéreo de Mendoza. SAME. Aeropuerto Francisco Gabrielli. Estación N° 87418. <http://www.wunderground.com/history/airport/SAME/>.
- Universidad de Wyoming (EE.UU.) - Facultad de Ingeniería - Departamento de Ciencias de la Atmósfera. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- Peini K., Magliocco A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. Urban Forestry and Urban Greening. 13(3), 495-506. Doi: 10.1016/j.ufug.2014.03.003
- Ruiz M., Correa E. (2014). *Adaptive model for outdoor thermal comfort assessment in an oasis city of arid climate*. Building and Environment. 85, 40-51. Doi: 10.1016/j.buildenv.2014.11.018
- Ruiz M., Sosa M., Correa E. Cantón M. (2015). *Forested urban configurations and its thermal behavior in an arid city*. Journal of Environmental Quality. En Prensa. Doi: 10.2134/jeq2015.06.0269.
- Samaali M., Courault D., Bruse M., Olioso A., Occelli R. (2007). *Analysis of a 3D boundary layer model at local scale: Validation on soybean surface radiative measurements*. Atmospheric Research, 85(2), 183-198. Doi: 10.1016/j.atmosres.2006.12.005
- Shashua-Bar L., Hoffman M. (2000). *Vegetation as a climatic component in the design of an urban street*. Energy and Buildings, 31(3), 221-235. Doi: 10.1016/S0378-7788(99)00018-3
- Soo-Gon H, Sun-Hye M, Jung-Ho H (2007). *Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea*. Proceedings Building Simulation, 1131-1138.
- Stewart I., Oke T., Scott Krayenhoff E. (2014). *Evaluation of the "local climate zone" scheme using temperature observations and model simulations*. Inter Jour of Climat. 34(4), 1062-1080. Doi: 10.1002/joc.3746.
- Swaid H., Hoffman M. (1990). *Prediction of urban air temperature variations using the analytical CTTC model*. Energy and Buildings, 14 (4), 313-324. Doi: 10.1016/0378-7788(90)90094-Y.
- Taleghani M., Kleerekoper M., Tenpierik M., Dobbelsteen A. (2015). *Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands*. Building and Environment, 83, 65-78. Doi: 10.1016/j.buildenv.2014.03.014.
- Tanhuanpää T., Vastaranta M., Kankare V. Holopainen M, Hyyppä J, Hyyppä , Alho P. y Raisio J. (2015). *Mapping of urban roadside trees -a case study in the tree register update process in Helsinki City*. Urban Forestry and Urban Greening. Doi: 10.1016/j.ufug.2014.03.005.
- Teller J, Azar S. (2001). TOWNSCOPE II - A computer system to support solar access decision-making. Solar Energy, 70 (3), 187-200. Doi: 10.1016/S0038-092X (00)00097-9.

Autores

Noelia L. Alchapar, es Arquitecta (Universidad de Mendoza). Doctora en Ciencias en el Área de Energías Renovables (Universidad Nacional de Salta). Especialista en Desarrollo Sustentable de Hábitat Humano (Universidad Tecnológica Nacional). Becaria Posdoctoral en el Consejo Nacional de Investigación en Ciencia y Tecnología (CONICET). nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar.

Erica N. Correa, es Ingeniera Química (Universidad Tecnológica Nacional). Doctora en Ciencias en el Área de Energías Renovables (Universidad Nacional de Salta). Profesora titular de la Universidad Tecnológica Nacional. Investigadora Independiente en el Consejo Nacional de Investigación en Ciencia y Tecnología (CONICET) de la Argentina. ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar.