

MORFOLOGÍA URBANA Y COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE CANALES VIALES.

DESARROLLO DE UN MODELO
PREDICTIVO PARA TEMPERATURAS
MÁXIMAS.

URBAN MORPHOLOGY AND THE THERMAL BEHAVIOR OF URBAN CANYONS: THE DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE MODEL FOR MAXIMUM TEMPERATURES.

MARÍA BELÉN SOSA 1
ERICA CORREA 2
MARÍA ALICIA CANTÓN 3

- 1 Becaria Doctoral CONICET
Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas (CONICET) - Centro Científico Tecnológico Mendoza (CCT)
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Av. Ruiz Leal s/n, Parque Gral. San Martín, Mendoza-Argentina
msosa@mendoza-conicet.gob.ar
- 2 Investigadora Independiente CONICET
Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas (CONICET) - Centro Científico Tecnológico Mendoza (CCT)
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Av. Ruiz Leal s/n, Parque Gral. San Martín, Mendoza-Argentina
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar
- 3 Investigadora Independiente CONICET
Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas (CONICET) - Centro Científico Tecnológico Mendoza (CCT)
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Av. Ruiz Leal s/n, Parque Gral. San Martín, Mendoza-Argentina
macanton@mendoza-conicet.gob.ar

Las ciudades modifican los parámetros climáticos de su sitio de inserción. Una de las principales alteraciones es el aumento de la temperatura del aire que origina la isla de calor urbano (ICU). La ICU aumenta la demanda de energía eléctrica y disminuye la habitabilidad de los espacios interiores y exteriores. El presente trabajo busca determinar morfologías urbanas que permitan reducir el consumo de energía eléctrica y el efecto ICU. Para ello se seleccionaron, caracterizaron y monitorearon térmicamente, durante el periodo de verano, 9 canales viales urbanos (CVU) representativos del área metropolitana de Mendoza, Argentina. Con los indicadores utilizados para caracterizar los casos se construyó un modelo estadístico multivariado que predice la temperatura máxima ($R^2=0.85$ y $RSME=2.41\%$). Se utilizó este modelo para testear 20 posibles escenarios urbanos (16 CVU forestados y 4 sin forestación). Como resultado, se observa que la temperatura máxima en los casos forestados se mantiene hasta 12.7°C más fresca versus los casos no forestados. Además, existe una diferencia de hasta 9.8°C entre los casos forestados, lo cual revela el impacto sobre la respuesta térmica que puede generar la elección de una combinación urbana — forestación + morfología— al momento de diseñar y planificar los esquemas de desarrollo de una ciudad.

Palabras clave: Morfología urbana, comportamiento térmico, isla de calor, estadística multivariada, modelo predictivo.

Cities modify the climatic parameters of the sites where they are located. One of the main changes is the increase in air temperature caused by urban heat islands (UHI). UHIs increase electricity demand and decrease the livability of indoor and outdoor spaces. This paper seeks to determine urban morphologies that help to reduce electric energy consumption and the UHI effect. To this end, 9 representative urban canyons (UC) in the metropolitan area of Mendoza, Argentina were selected, characterized and thermally monitored. With the indicators used to characterize the UCs, a predictive multivariate statistical model for maximum temperature was created ($R^2 = 0.85$ and $RSME = 2.41\%$). This model was used to test 20 possible urban scenarios (16 forested and 4 non-forested UCs). As a result, it was observed that the maximum temperature in the forested cases remains up to 12.7°C cooler than in the non-forested cases. Additionally, there is a difference of up to 9.8°C between the forested cases. This reveals the impact that the choice of urban combinations --forestation + morphology-- can have on thermal response when designing and planning city development schemes.

Keywords: Urban morphology, thermal behavior, heat island, multivariate statistics, predictive model.

INTRODUCCIÓN.

Es sabido que las ciudades —paisaje construido— consumen mayor cantidad de energía por unidad de superficie en comparación a un ecosistema natural —paisaje natural— (Odum H. y Odum E., 1980). Esta energía es necesaria para dar funcionamiento al denominado “metabolismo urbano” (Wolman, 1965). Asimismo, estudios realizados muestran que el aumento en un 1% de la población urbana incrementa el consumo de energía en un 2.2%, es decir, la tasa de cambio en el uso de energía es el doble de la tasa de cambio en la urbanización (Santamouris *et al.*, 2001).

A su vez, dicho metabolismo, impacta en el paisaje natural modificando, entre otros factores, los parámetros del clima en dos escalas: macro-escala (calentamiento global) y micro-escala (alteración del clima urbano). Estudios del panel internacional sobre el cambio climático advierten que la temperatura global aumentará en los próximos 100 años entre 1.4 y 5.8°C bajo diferentes escenarios de adaptación (McCarthy *et al.*, 2001). Una de las alteraciones más conocidas sobre el clima urbano es la formación de la isla de calor (ICU), fenómeno que provoca que en el centro de la ciudad la temperatura del aire sea más elevada que en la periferia (Oke, 1982). Investigaciones llevadas a cabo por Akbari *et al.* (1992), correlacionan el consumo de energía con el efecto de ICU. En ellas se observa que para ciudades con más de 100.000 habitantes los consumos de energía en las horas pico se incrementan 1.5 a 2% por cada grado que aumenta la temperatura urbana.

En concreto, el área metropolitana de Mendoza (AMM) —área de estudio— se encuentra situada al oeste de Argentina (32°53'25"S - 68°50'50"O). El clima de esta región es árido, con elevada heliofanía y escasas precipitaciones. Estudios desarrollados en la región determinan que uno de los principales impactos que genera la ICU es el incremento de hasta un 20% en el consumo energético para acondicionamiento térmico de las edificaciones durante el verano (Correa, de Rosa y Lesino, 2008). De igual manera, este fenómeno deteriora la calidad del aire y las condiciones de confort térmico, provocando una disminución del grado de habitabilidad y uso de los espacios abiertos (Ruiz y Correa, 2014).

En el AMM habita el 62.8% del total de la población de Mendoza y, particularmente durante la última década censada, la demografía urbana se incrementó en un 9.4% (INDEC, 2010). Este aumento de población urbana genera, entre otros factores, que el paisaje construido se expanda. Cabe señalar, ahora bien, que la tipología de mayor desarrollo constructivo en esta zona lo constituye la vivienda unifamiliar de 1 o 2 pisos, es decir, el área exhibe una baja densidad edilicia (IPV, 2010).

Durante el año 2014 se registró una intensa ola de calor en el AMM, donde la temperatura del aire alcanzó valores de más de 40°C. En respuesta a este aumento, las edificaciones utilizaron de manera exhaustiva los equipos de refrigeración para satisfacer las necesidades de confort térmico interior. Esta situación provocó que se alcanzaran valores récords de consumo de energía eléctrica, donde la demanda de potencia máxima del mes de enero de 2014 tuvo una variación de +11.5% respecto al mismo mes del año anterior (EPRE, 2014). En este sentido, es importante resaltar los estudios de Salamanca *et al.* (2014), donde se muestra que el uso prolongado de equipos de aire acondicionado aumenta la temperatura del aire exterior en 1°C en ciudades áridas durante el periodo nocturno.

El consumo de energía en una ciudad se encuentra vinculado a la temperatura ambiente, siendo el comportamiento térmico de las ciudades un subproducto de su morfología urbana (McPherson, 1994). Los canales viales urbanos (CVU), por lo general, constituyen más de una cuarta parte de las zonas urbanas (Shashua-Bar y Hoffman, 2003); por lo tanto, su morfología y orientación contribuyen en gran medida a la modificación de los parámetros del clima urbano. Del mismo modo, la altura de los edificios (Lin, Matzarakis y Hwang, 2010), las propiedades termo-físicas de los materiales utilizados en sus envolventes (Alchapar y Correa, 2015) y el tipo y cantidad de espacios verdes (Ruiz y Correa, 2014) pueden crear combinaciones urbanas que promueven o intensifican el efecto ICU (Givoni, 1989).

Los recursos que demanda el metabolismo urbano provienen mayormente de fuentes no renovables que generan contaminación de diversa índole al medio natural. Por consiguiente, resulta importante estudiar el comportamiento térmico de las ciudades a fin de detectar configuraciones morfológicas que optimicen el desempeño medio-ambiental, el hábitat de las personas y el consumo de energía. En este contexto, este trabajo busca determinar combinaciones urbanas, que permitan reducir el sobrecalentamiento del aire en los CVU para disminuir tanto el consumo de energía eléctrica en verano como el efecto ICU, y, en consecuencia, impactar positivamente en la habitabilidad térmica de los espacios públicos de la ciudad.

METODOLOGÍA.

Selección de casos de estudio.

El AMM está conformado por 6 departamentos: Capital, Las Heras, Godoy Cruz, Guaymallén, Maipú y Lujan de Cuyo. Con el objetivo de delimitar el área de estudio, se seleccionaron en una primera etapa los departamentos de mayor ocupación demográfica (INDEC, 2010). Este análisis muestra que los departamentos de mayor ocupación son los 3 que limitan con la capital de la provincia: Guaymallén (16%), Las Heras (12%) y Godoy Cruz (11%). Asimismo, la Capital de la provincia (6%) se seleccionó por ser el departamento central del AMM, sin embargo, en la última década su población ha disminuido en un 1%. Este dato demuestra, entre otros factores, cómo las áreas residenciales se han ido desplazando hacia otros sectores de la ciudad, aumentando las superficies edificadas.

Luego, con el fin de caracterizar y cuantificar los tipos de tramas urbanas existentes dentro de los 3 departamentos seleccionados, se realizó un relevamiento de tipologías de manzanas. Se entiende por trama urbana a la forma que genera un conjunto de calles y manzanas existentes en un sector de territorio (Marshall, 2005). Esta tipificación se llevó a cabo utilizando un plano catastral del AMM y el software AutoCAD®, de acuerdo a 4 formas: damero (cuatro lados de iguales dimensiones), rectangular (dos de sus lados tienen mayor longitud) e irregular (puede tener 4 o más lados de diferentes longitudes).

Los resultados del relevamiento gráfico muestran que en Godoy Cruz la forma con mayor representatividad es la de tipo rectangular (31%). Caso contrario sucede en Guaymallén donde la forma de manzana más representativa es la de tipo irregular (48%). Por último, el departamento de Las Heras coincide en mantener su forma irregular (33%), seguida por la forma rectangular con orientación Norte-Sur (30%). Cabe aclarar que el departamento Capital no se relevó mediante esta metodología ya que se conoce que la forma de manzana más representativa es el damero (Stocco, Cantón y Correa, 2013).

A partir de la tipificación morfológica de manzanas se escogieron 4 conjuntos urbanos (barrios) de diversas tramas que son representativos dentro de cada departamento. Estos barrios, de uso residencial, difieren en cuanto a forma y orientación pero, al mismo tiempo, mantienen análogos aspectos morfológicos, constructivos y tecnológicos (superficie, altura y materialidad de las viviendas) que permiten realizar comparaciones para identificar las morfológicas con mejor comportamiento térmico.

La Tabla 1 muestra la ubicación en el AMM, planimetría y un corte transversal de cada caso. Hay que destacar que el caso 4.c es considerado atípico, ya que el ancho de calle es notablemente menor (5.5m) al predominante en el AMM (16, 20 y 30m) y no tiene forestación. Este caso compacto se contrastó con 2 CVU colindantes de morfología similar a los barrios seleccionados (ancho y esquema de forestación).

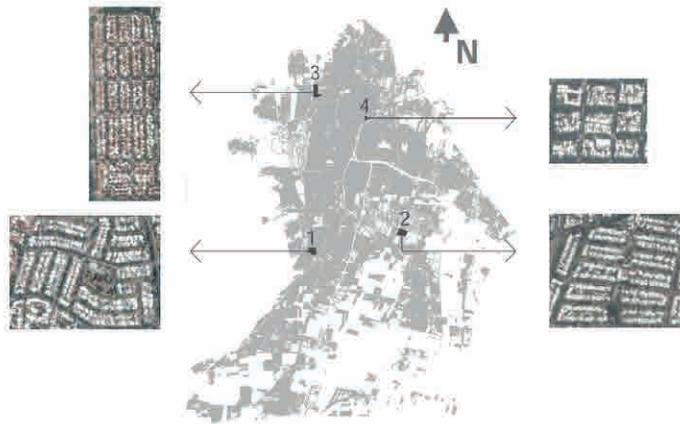
Determinación del sitio de monitoreo micro-climático.

El sitio de monitoreo microclimático en cada barrio se escogió buscando aquellos CVU que fueran representativos dentro de cada trama seleccionada. Estos casos se caracterizaron mediante 2 grupos de descriptores e indicadores de tipo: morfológico y forestal. A continuación se presentan los descriptores e indicadores utilizados en cada grupo:

Morfológicos: largo (L), ancho (A), superficie de acera+vereda (SAV), superficie del canal vial urbano (SCVU), número de viviendas (N°V), superficie total construida (STC), compacidad (C), volumen total construido (VTC), factor de ocupación de superficie (FOS), factor de ocupación total (FOT), azimut (Az) y factor de visión de cielo (SVF).

Forestales: número de forestales (N°F), volumen forestales (VF) y relación de árboles por metro cuadrado (Árbol/m²).

La Tabla 1 muestra los valores de los indicadores utilizados para caracterizar a cada caso; como así también la relación de cada uno de ellos para calcular su valor. Es importante señalar que la superficie del CVU se calcula como la sumatoria de las superficies de las parcelas que dan frente sobre la calle, más las aceras y calzada; y la compacidad es la relación entre el volumen total construido sobre la superficie del CVU. El indicador SVF fue calculado a partir de imágenes hemisféricas capturadas con una cámara digital Nikon® CoolPix, equipada con un lente ojo de pez, y procesadas con el software Pixel de Cielo desarrollado por Correa *et al.* (2006). Este software obtiene el valor de SVF en condiciones de cielo despejado, con forestación urbana intensa y en ciudades con alta reflectividad, típica de regiones áridas, como es el caso de este estudio. Si bien no se incorpora como variable la materialidad del espacio construido (aspecto tecnológico), se menciona que se mantuvo análoga esta característica al momento de seleccionar los casos de estudio. Ya que se conoce que el comportamiento en términos térmicos de cada materiales varía (Alchapar y Correa, 2015).



Forma de trama	Multi-azimutal		Cul-de-Sac	Rectangular			Reticular			
Caso	1.a	1.b	2	3.a	3.b	3.c	4.a	4.b	4.c	
Planimetría y sección										
Morfológicos	L (m)	255	226	145	128	192	83	116	110	112
	A (m)	20	20	20	16	16	20	20	20	5.5
	SAV (m ²) (L x A)	5100	4520	2900	2048	3072	1660	2320	2200	616
	SCVU (m ²)	15086	13470	9545	7129	10990	4070	7651	7929	3600
	N°V(u)	47	43	28	20	32	16	21	19	22
	STC (m ²) (N°V x 95m ²)	5699	4809	2945	2492	3789	1539	3596	3242	2326
	C (VTC % SCVU)	1.13	1.07	0.93	1.05	1.03	1.13	1.41	1.23	1.94
	VTC (m ³) (STC x 3m)	17097	14427	8835	7476	11367	4617	10788	9726	6978
	FOS (STC % SCVU-SCV)	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.7
	FOT (VTC % SCVU-SCV)	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.6	1.2	0.8	2.1
Az (°)	146	193	81	181	181	92	89	89	85	
Forestales	SVF									
		0.69	0.60	0.57	0.27	0.35	0.61	0.16	0.50	0.74
	N°F (u)	53	52	36	44	53	21	31	24	0
VF	650	638	442	540	650	271	381	295	0	
Árbol/m2 (N°F % SCV)	0.011	0.012	0.012	0.017	0.021	0.015	0.013	0.011	0	

Tabla 1 Ubicación, planimetría y sección de cada caso y valores de los indicadores utilizados para caracterizarlos. Fuente: Elaboración propia.

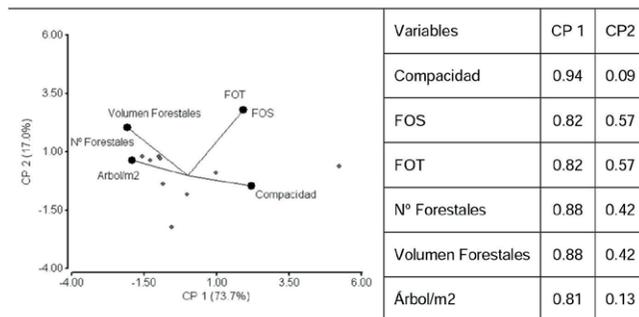


Tabla 2 Biplot y correlaciones con las variables originales.
Fuente: Elaboración propia.

		T° máxima		T° mínima	
		Pearson	p-valor	Pearson	p-valor
Morfológica	SAV	-0.52	0.1551	-0.72	0.0303
	SCVU	-0.49	0.1794	-0.68	0.0448
	STC	-0.35	0.3563	-0.68	0.0427
	C	0.79	0.0115	0.33	0.3826
	VTC	-0.35	0.3563	-0.68	0.0427
	FOS	0.78	0.0126	0.36	0.3422
Forestal	FOT	0.78	0.0126	0.36	0.3422
	N°F	-0.76	0.0179	-0.33	0.3864
	VF	-0.76	0.0178	-0.33	0.3863
	Árbol/m2	-0.86	0.0032	0.21	0.5931

Tabla 3 Variables correlacionadas con la variable respuesta
Fuente: Elaboración propia.

Monitoreo y obtención de datos microclimáticos.

Con el fin de conocer la variación microclimática —temperatura del aire— se monitoreó el comportamiento térmico de los casos anteriormente descritos (9 puntos). Esta recopilación de datos se desarrolló en el mes de enero de 2014, durante un periodo de 28 días corridos. En cada punto o caso de estudio, se instaló un sensor fijo de tipo H08-003-02. Este dispositivo se ubicó a una altura de 2m desde el nivel de calle (Oke, 2004), dentro de una caja de PVC blanca perforada, con el objeto de evitar la irradiación y asegurar una adecuada circulación de aire. La precisión de este dispositivo es de $\pm 0.7^\circ\text{C}$, y las mediciones fueron programadas cada 15 minutos.

Análisis estadístico multivariado.

Con miras a obtener un modelo para predecir el comportamiento térmico de las diversas combinaciones urbanas, se utilizaron métodos estadísticos multivariados. Estos métodos son herramientas que estudian el comportamiento de tres o más variables al mismo tiempo y se utilizan, principalmente, para buscar y eliminar las variables menos representativas del conjunto con el objetivo de simplificar la relación entre varios grupos de variables en los modelos estadísticos (Cuadras, 2007). Este procedimiento se efectuó en el trabajo utilizando el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011).

Como primer paso, para desarrollar los modelos predictivos, se contrastó la normalidad del conjunto de datos mediante el test de Shapiro-Wilk. Este test es considerado uno de los más potentes, sobre todo para muestras pequeñas ($n < 30$), donde como referencia se toma al p-valor mayor a alfa ($\alpha = 0.05$), para no rechazar la hipótesis nula y concluir que los datos siguen una distribución normal. Luego, se realizaron regresiones lineales múltiples (RLM), con el propósito de establecer las relaciones que ocurren entre la variable dependiente Y (temperatura

del aire) y el grupo de variables independientes o explicativas (descriptores e indicadores urbanos). Para ello se empleó el coeficiente de correlación de Pearson que se utiliza para medir el grado de relación de dos variables cuantitativas.

En una segunda etapa, se efectuaron análisis de componentes principales (ACP) para la temperatura máxima y otro para la mínima. El ACP es una técnica estadística multivariada que utiliza el método de interdependencia, y sirve para realizar análisis exploratorio de datos y para construir modelos predictivos. Particularmente en este estudio, se usó el método basado en la matriz de correlación, ya que los datos no son dimensionalmente homogéneos o el orden de magnitud de las variables medidas no es el mismo. Por último, se escogieron las variables más significativas para obtener el modelo estadístico predictivo.

RESULTADOS.

Los resultados se presentan en 2 secciones: primero se explica el modelo predictivo obtenido y, en segundo lugar, se expone una serie de CVU resultantes de distintas combinaciones de ancho, largo y número de forestales, y se aplica este modelo a fin de estimar el comportamiento térmico de cada escenario.

Modelo predictivo.

A continuación, se muestra el gráfico biplot del ACP, realizado con los valores de temperatura máxima (Tabla 2), como así también las correlaciones con las variables originales donde se visualiza que el primer eje (CP1) acumula el 73.7% del total de la varianza. El biplot exhibe las 6 variables que están correlacionadas con la variable respuesta (Tabla 3), siendo ellas:

Casos	1.a	1.b	2	3.a	3.b	3.c	4.a	4.b	4.c
T° máx. estimada (°C)	39.6	38.7	40.4	37.1	37.7	41.2	38.5	38.9	47.5
T° máx. medida (°C)	39.9	37.7	40.8	37.1	38.7	40.2	38.0	38.9	48.0
ΔT (°C)	-0.3	1.0	-0.4	0.0	-1.0	1.0	0.5	0.0	-0.5

Tabla 4 Deltas de las temperaturas máximas entre los valores estimados versus los medidos. Fuente: Elaboración propia.

Ancho	10	20
Largo	100 – 150 – 200 – 250	100 – 150 – 200 – 250
Perfil		
Ancho	30	5
Largo	100 – 150 – 200 – 250	100 – 150 – 200 – 250
Perfil		

Tabla 5 Secciones de los escenarios urbanos Fuente: Elaboración propia.

FOT, FOS y C, del grupo morfológico, y N°F, VF y Árbol/m², del grupo de indicadores forestales.

A partir de los datos obtenidos en el ACP y para construir el modelo estadístico, se seleccionaron las siguientes variables: C y FOT, del grupo de variables morfológicas, y Árbol/m² y N°F, del grupo forestal. La bondad de ajuste de la regresión se refleja en el coeficiente de determinación ajustado R², siendo de 0.85, el p-valor del modelo igual a 0.0014 y el error cuadrático medio (RSME) igual a 2.41%, por lo cual se considera que este modelo de regresión es estadísticamente significativo. El modelo obtenido se muestra en la Eq. (1).

$$T^{\circ}\text{máxima} = 44.61 - (3.70 \times C) + (4.81 \times \text{FOT}) - (3.25 \times \text{Árbol/m}^2) - (0.07 \times \text{N}^{\circ}\text{F})$$

Eq. (1)

Por su parte, la Tabla 4 expone los diferenciales térmicos (ΔT) calculados entre los valores de la temperatura máxima estimada

mediante el modelo versus la temperatura medida *in situ* del día 15/01/14, para los 9 casos estudiados. Los rangos de sub-estimación y sobre-estimación de la temperatura del aire se encuentran en el orden del 1°C, recordando que la precisión del instrumento es de ±0.7°C. Es importante aclarar que aunque el sentido de orientación de la calle no parezca estar considerado dentro del modelo, la temperatura máxima de un canal vial es fundamentalmente dependiente de la cantidad de radiación solar recibida, exposición solar. La intensidad de la radiación solar es máxima en las horas cercanas al mediodía solar (mayor altitud solar) y en esas horas el plano horizontal del CVU es la superficie de mayor colección, es por ello que la T° máxima parece no depender de la orientación de trama sino más bien de la disponibilidad de superficie horizontal de colección solar y de la masa térmica del CVU (acumulación). El valor del ángulo de altitud solar durante el mediodía en el verano, para el caso de Mendoza, está en el orden de los 80°. Esta situación variará cuando se desarrolle el modelo para estimar las temperaturas medias y mínimas; donde al modificarse el sentido de orientación de los CVU se podrá determinar como impacta el

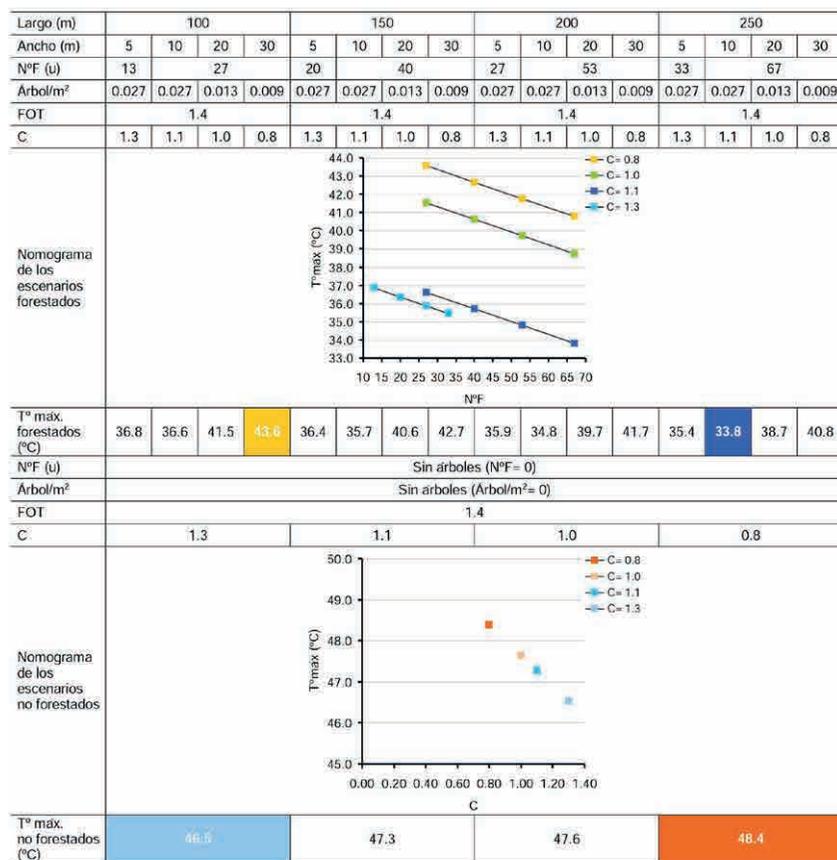


Tabla 6 Valores de los indicadores morfológicos y forestales utilizados y su respuesta térmica para cada escenario. Fuente: Elaboración propia.

calor acumulado durante el día en el balance térmico global de cada esquema.

Como se mencionó anteriormente, se realizó el ACP utilizando como variable dependiente la temperatura mínima del aire; en este caso, las variables que muestran correlación son 5 del grupo morfológico: SCVU, SCV, SC, VC y VCVU (Tabla 3). Sin embargo, al realizar el RLM, los resultados obtenidos no muestran significancia estadística como en el modelo de temperatura máxima (T_{min} ; $R^2= 0.34$). Ahora bien, es necesario destacar que durante el periodo nocturno la morfología del CVU es la que parece estar estadísticamente más correlacionada con la respuesta térmica del mismo, siendo los forestales las variables de mayor significancia para el periodo diurno (bloqueo de radiación solar). Así mismo, la incorporación de otras variables como ser la materialidad del espacio construido o el calor antropogénico generado (densidad de tráfico, etc.) podrían dar mayor precisión al modelo predictor.

Combinaciones urbanas.

A fin de utilizar el modelo predictor obtenido, una serie de combinaciones urbanas fueron testeadas. Se obtuvieron 16 posibles escenarios forestados que varían principalmente en el ancho (5, 10, 20 y 30m) y largo de calle (100, 150, 200 y 250m), como así también se incluyeron 4 combinaciones de iguales características sin forestación (Tabla 5).

La Tabla 6 resume los valores de cada indicador utilizado para generar los escenarios a testear, empleando el modelo predictor, y muestra la respuesta térmica (T° máxima) resultante de cada combinación. El número de forestales se calculó con un intervalo de implantación de 8m, siendo recomendada esta distancia para árboles de segunda magnitud (altura media del forestal entre 10 a 15m). Cabe recordar que en los casos monitoreados los forestales corresponden a esta magnitud y en su mayoría son *Morus alba*. Para el caso del esquema de 5m de ancho de calle, los forestales se calcularon implantados en una sola línea, mientras que en los demás casos el arbolado de

alineación se distribuyó a 3 bolillos (ubicados en ambas aceras, alternando las copas). El FOT se mantiene constante para todos los casos (1.4) y fue calculado considerando que las viviendas son de un solo nivel (3m) y tienen una superficie cubierta promedio de 95m². Para el caso de la compactidad, los valores varían según el largo y ancho de calle entre: 0.8, 1.0, 1.1 y 1.3; siendo de 0.8 el escenario más ancho y de 1.3, el más angosto. Los gráficos insertos en la Tabla 6 muestran los nomogramas con las respuestas térmicas de cada escenario.

Al analizar los resultados de los esquemas forestados, se detecta que:

A mayor longitud de calle (mayor superficie construida y masa térmica) y mayor cantidad de árboles, la temperatura máxima disminuye.

A mayor ancho de calle (mayor apertura al cielo - mayor ingreso de radiación), la temperatura del aire es más elevada.

Los esquemas con compactidad de 1.1, para todos los largos de CVU considerados y fijando el ancho de calle en 10m, se mantienen siempre más frescos.

La combinación forestada más fresca (T° máx= 33.8°C) es la que tiene un largo de calle de 250m y 10m de ancho. En contraste, el esquema más cálido (T° máx= 43.6°C) es el que tiene un largo de 100m y 30m de ancho.

La combinación más compacta, 1.3, se mantiene más fresca que los esquemas de compactidad de 1.0 y 0.8. Siendo el escenario más compacto 1.6°C más cálido que el escenario más fresco de C= 1.1, en el esquema de 250m de largo.

En tanto, al analizar los resultados de los esquemas no forestados, se detecta que:

Estos se mantienen siempre más cálidos que los casos forestados; y las diferencias entre el caso más fresco forestado y el más cálido no forestado, alcanzan hasta 13.6°C.

Al variar solo la longitud de calle, la temperatura máxima no muestra variación.

La combinación no forestada más fresca (T° máx= 46.5°C) es la que tiene un ancho de calle de 5m. En contraste, el esquema más cálido (T° máx= 48.4°C) es el que tiene un ancho de 30m.

A menor ancho de calle (menor apertura al cielo - menor ingreso de radiación), la temperatura máxima se mantiene más fresca.

La combinación más compacta, 1.3, se mantiene más fresca; presentando una diferencia de hasta 1.9°C con el esquema más abierto (C= 0.8).

CONCLUSIONES.

El trabajo permitió desarrollar un modelo estadístico multivariado ($R^2=0.85$ y $RSME=2.41\%$), que predice el valor de temperatura máxima exterior en verano de canales viales urbanos, para una ciudad de clima árido como es el caso del área metropolitana de Mendoza. Este modelo considera indicadores urbanos de tipo morfológicos (compactidad y factor de ocupación total) y forestales (cantidad de árboles por m² y número de forestales). Dichos indicadores constituyen variables urbanas netamente cuantificables que sirven como herramientas de fácil aplicación para urbanistas y planificadores, en aras de predecir la respuesta térmica de diversas morfologías de canales viales. A su vez, los 4 indicadores considerados en el modelo son variables que pueden ser incorporadas como premisas o lineamientos de diseño a considerar en los códigos de planeamiento urbano.

Como resultado de los 16 escenarios forestados testeados, el que mejor respuesta térmica presenta (T° máx= 33.8°C) es el CVU de: 250m de longitud, 10m de ancho, 67 forestales, con un rango de distribución de árbol/m² de 0.027, 1.4 de FOT y 1.1 de compactidad. Lo cual refleja que a mayor masa térmica, mayor humedad ambiental (efecto de evapotranspiración) y mayores superficies sombreadas por los forestales y las edificaciones, la temperatura máxima será menor. Por otra parte, al analizar los 4 escenarios sin forestación se detectó que: a menor ancho 5m, FOT 1.4 y compactidad de 1.3, el valor de T° máx. alcanza los 46.5°C. Es decir, que existe una diferencia de 12.7°C entre los escenarios más frescos forestados y no forestados; y esa diferencia, entre el caso más fresco forestado y el más cálido no forestado, llega hasta los 13.6°C.

En este sentido, se visualiza cómo la combinación entre morfología y forestación contribuye a aumentar o disminuir el grado de habitabilidad del espacio exterior en verano. Así también, condiciona las posibilidades de bioclimatizar las ciudades mediante técnicas de acondicionamiento pasivas para disminuir los consumos de energía eléctrica de los edificios.

Por otro parte, si bien no se obtuvo un modelo de significancia estadística para estimar la temperatura mínima del aire — comportamiento térmico nocturno—, se detectó que los forestales son variables de mayor significancia durante el día por el refrescamiento de tipo evaporativo y el efecto de sombra (bloqueo de radiación solar) que generan, y que la morfología del CVU es la que parece estar relacionada en mayor medida con la respuesta térmica nocturna, por los intercambios de calor de tipo radiativo y convectivo. Se plantea, entonces, como objetivo futuro, continuar en la búsqueda de un modelo estadístico predictivo y realizar simulaciones dinámicas que permitan conocer y estimar el comportamiento nocturno de estos escenarios, incluyendo la variable de orientación del CVU.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ALCHAPAR, Noelia y CORREA, Erica. Comparison the performance of different facade materials for reducing building cooling needs. En: PACHECO-TORGAL, Fernando, LABRINCHA, João, CABEZA, Luisa y GRANQVIST Claes. *Eco-efficient materials for mitigating building cooling needs*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015, pp.155-194.

AKBARI, Hashem, DAVIS, Susan, DORSANO, Sofia, HUANG, Joe y WINNETT, Steven. *Cooling our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*. Washington: US Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division, 1992.

CORREA, Érica, PATTINI, Andrea, CÓRICA, Lorena, FORNÉS, Matías y LESINO, Graciela. *Software: PIXEL DE CIELO*, 2006. Número de registro CONICET: 07304.

CORREA, Érica, DE ROSA, Carlos y LESINO, Graciela. Urban heat island effect on heating and cooling degree day's distribution in Mendoza's metropolitan area. Environmental costs. En: *EUROSUN (2008): 1st international conference on solar heating, cooling and buildings*. Sociedade Portuguesa de Energia Solar, Lisboa, 2008, pp. 951-958.

CUADRAS, Carles. *Nuevos métodos de análisis multivariante*. Barcelona: CMC Editions, 2007.

DI RIENZO, Julio, CASANOVES, Fernando, BALZARINI, Mónica, GONZÁLEZ, Laura, TABLADA, Margot, ROBLEDO, Walter. InfoStat v. 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2011.

EPRE, Ente Provincial de Regulación Eléctrica. *Informe técnico de evolución de la demanda de enero de 2014* [en línea]. [Consultado 10 Abril 2015]. Disponible en: <http://www.epremendoza.gov.ar/>

GIVONI, Baruch. *Urban design in different climates*. World meteorological organization, 1989.

IPV, Instituto Provincial de la Vivienda. *Censo nacional de población, hogares y viviendas* [en línea]. [Consultado 10 Abril 2015]. Disponible en: <http://www.ipvmendoza.gov.ar/>

INDEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. *Censo nacional de población, hogares y viviendas* [en línea]. [Consultado 10 Abril 2015]. Disponible en: <http://www.censo2010.indec.gov.ar/>

LIN, Tzu-Ping, MATZARAKIS, Andreas y HWANG, Ruey-Lung. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 2010, vol. 45, pp. 213-221.

MARSHALL, Stephen. *Streets and Patterns*. Londres y Nueva York: Spon Press, 2005.

MCCARTHY, James; CANZIANI, Osvaldo; LEARY, Neil; DOKKEN, David; WHITE, Kasey. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group II. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

McPHERSON, Gregorich. Cooling urban heat islands with sustainable landscapes. En: PLATT, Rutherford, ROWNTREE, Rowan y MUICK, Pamela (eds.), *The Ecological City: Preserving and Restoring Urban Biodiversity*. University of Massachusetts Press, Amherst, MA, 1994, pp. 151-171.

ODUM, Howard y ODUM, Elisabeth. *Energy basis for man on nature*. Nueva York: 2nd edition McGraw Hill Higher Education, 1980.

OKE, Timothy. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 1982, vol. 108, nº 45, pp. 1-24.

OKE, Timothy. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. IOM Report No. 81, WMO/TD No. 1250, Geneva: World Meteorological Organization, 2004.

RUIZ, María Angélica y CORREA, Erica. Suitability of different comfort indices for the prediction of thermal conditions in tree-covered outdoor spaces in arid cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, vol. 122, nº 1, pp. 69-83.

SANTAMOURIS, Matheos, PAPANIKOLAOU, Nikos, LIVADA, Iro, KORONAKIS, Ioannis, GEORGAKIS, Chrysa, ARGIRIOU, Athanasios y ASSIMAKOPOULOS, DN. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, 2001, nº 70, pp. 201-216.

SALAMANCA, Francisco, GEORGESCU, Matei, MAHALOV, Alex, MOUSTAOU, Mohamed y WANG, Lin. Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, vol. 119, nº 10, pp.1-17.

SHASHUA-BAR, Limor y HOFFMAN, Milo. Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, 2003, nº 35, pp. 61-68.

STOCCO, Susana, CANTÓN, María Alicia y CORREA, Erica. Evaluación de las condiciones térmicas de verano y eficiencia ambiental de distintos diseños de plazas urbanas en Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 2013, vol. 3, nº 2, pp. 19-34.

WOLMAN, Abel. The metabolism of cities. *Scientific American*, 1965, nº213, pp. 156-174.