

# Incidencia de la permeabilidad solar forestal en el comportamiento térmico de urbanizaciones adaptadas a áreas piedemontanas

## Incidence of forestry solar permeability on the thermal behavior of urbanizations adapted to hillside areas

### Resumen

Aunque la forestación es un componente esencial para mejorar la calidad ambiental y la habitabilidad térmica urbana, existe poca información cuantitativa del impacto en la selección de especies en combinación con características morfológicas y climáticas del sitio. Este trabajo aborda la incidencia de dos especies de arbolado de alineación en el comportamiento térmico de dos esquemas urbanos adaptados: trama lineal orgánica y trama orgánica con Cul-de-Sac. Las especies-Morera y Paraíso- presentan características semejantes y se diferencian en su permeabilidad solar (14.53% y 19.79%). Mediante el software ENVI-met, se simularon los distintos casos ajustando el modelo teórico a un caso real monitoreado. Los resultados demuestran diferencias en las temperaturas máximas mayores a 4°C entre las especies estudiadas en trama lineal orgánica y diferencias poco significativas en la trama orgánica Cul-de-Sac. Esta investigación colaborará en la selección y diseño de alternativas para un desarrollo urbano sustentable del piedemonte de Mendoza, Argentina.

**Palabras clave:** arbolado de alineación adaptado; piedemonte; sustentabilidad ambiental; microclima urbano; ENVI-met.

#### Abstract:

Although afforestation is an essential component to improve environmental quality and urban thermal habitability, there is a few quantitative information on the impact of the selection of species in combination with morphological and climatic characteristics of the site. This work approach the incidence of two species of tree alignment on the thermal behavior of two adapted urban schemes: linear organic grid and organic grid with Cul-de-Sac. The forestry species -White mulberry and China berry tree- present similar characteristics and differ in their solar permeability (14.53% and 19.79%). Using the ENVI-met software, the different cases were simulated by adjusting the theoretical model to a real monitored case. The results show differences in the maximum temperatures greater than 4°C between the species studied in the linear organic grid and not very significant differences in the organic Cul-de-Sac grid. This research will collaborate in the selection and design of proposals for a sustainable urban development in the hillsides of Mendoza, Argentina.

**Keywords:** tree alignment adapted; hillside; sustainable environment; microclimate urban; ENVI-met.

#### Autores:

Ana Laura Castillo\*  
alcastillo@mendoza-conicet.gob.ar

Erica Norma Correa\*  
ecorrea@mendoza-conicet-gob-ar

María Alicia Cantón\*  
macanton@mendoza-conicet.gob.ar

\*Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), CCT Mendoza, CONICET

Argentina

Recibido: 15/Mar/2021  
Aceptado: 30/Jul/2021

## 1. Introducción

El Área Metropolitana de Mendoza (AMM) es una de las mayores aglomeraciones ubicada al oeste de la República Argentina. Mendoza representa un caso único en el urbanismo de las zonas áridas. Su estructura de “Ciudad Oasis” incorpora en su trama una superposición de mallas que estructuran la tipología de la ciudad: una red hídrica desarrollada por los aborígenes de la zona adoptada por los fundadores españoles. Esta red de acequias tiene la función de ser canales regadores de los espacios públicos urbanos. Además, incorpora una trama abierta de calles y edificios en damero, característica de las ciudades fundacionales españolas. Por último, una malla que surge con posterioridad, debido a la interacción de las dos primeras y que se relaciona con la incorporación de forestales en la ciudad –hileras de árboles generalmente de igual especie, plantadas regularmente a ambos lados de las vías de circulación- dando como resultado un bosque urbano. Tanto la trama de acequias como la forestación fueron elementos característicos de la ciudad desde sus comienzos, delineando ciertos criterios de planificación (Bochaca, 2005; Bórmida, 2014).

Una de las principales estrategias para regular el metabolismo urbano de la Ciudad de Mendoza es la incorporación de forestales tanto en sus canales viales como en los espacios públicos abiertos (Martínez et al., 2017; Vargas y Molina, 2014; Lanza y Stone, 2016). La presencia masiva de forestación de alineación ha hecho de esta región desértica natural un espacio apto para el óptimo desarrollo de sus habitantes. Sus cualidades ornamentales y aportes ambientales brindan grandes beneficios al ecosistema urbano. Entre los beneficios que aportan pueden identificarse el mejoramiento del microclima urbano a partir de la reducción de la temperatura ambiente, la humectación del aire, la interceptación del agua de lluvia, la regulación y control de iluminación natural, aumento de la biodiversidad, disminución de los gases de invernadero, entre otros (Santamouris et al., 2001; Correa, 2006; McPherson, 2007; Chow y Brazel, 2012; Bowler et al., 2010; Morakinyo et al., 2017; Wheeler et al., 2019).

El AMM ha presentado un constante crecimiento a través de un modelo expansionista que se ve reflejado en el crecimiento de baja edificación, similar a los modelos de ciudad dispersa (Entrena Durán, 2005; Chavoya Gama et al., 2009; Oliver-Pujol y Bisbal-Grandal, 2019). Esta expansión se dio hacia dos áreas con características particulares: hacia el área productiva ubicada al Sur y Este de la Ciudad de Mendoza y hacia el área de piedemonte ubicada en el margen Oeste del AMM (Abraham, 1990). El crecimiento urbano hacia el piedemonte se intensificó en

la década del 70. El modelo urbano continuó con los lineamientos de la ciudad en llanura, es decir, esquemas de trama racional, morfología urbana en forma de damero, avenidas forestadas cuya orientación acompaña a la máxima pendiente (Oeste – Este) e incorporación de una forestación no adaptada al sitio de inserción (Abraham et al., 2005). Esto ocasionó una profunda transformación del territorio, ya que su crecimiento fue desmedido sin considerar las condiciones naturales del sector. La presión antrópica generada por urbanizaciones ha modificado la cobertura vegetal del suelo en áreas frágiles debido a su aridez y geomorfología. Esta situación ha acelerado los procesos e impactos ambientales como es el raleo, eliminando el importante rol que cumple la vegetación en la fijación de suelo y la rápida absorción de aguas pluviales durante las tormentas estivales. Este crecimiento, además, ha ocasionado impactos ambientales que han generado el aumento de la temperatura del aire de los espacios exteriores (López Rodríguez, 2008).

El Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) ha analizado el área a través del monitoreo y diagnóstico microclimático, detectando variables que mejoran el acondicionamiento climático del piedemonte. Diversos estudios se han centrado en identificar esquemas urbanos que respondan a las condiciones particulares del sector. Uno de los indicadores a incorporar en el diseño urbano de estos esquemas es la incorporación de especies forestales que han demostrado que, desde el punto de vista térmico y ambiental, el arbolado de alineación en calles y avenidas es la estrategia de provisión de sombra más eficiente (Ruíz et al., 2017; Lin et al., 2010). Estas propuestas están alineadas con estudios que proponen a la vegetación como herramienta para la mitigación de la Isla de Calor Urbano (ICU). Ruíz et al. (2015), Kleerekoper et al. (2010) y Middel et al. (2015) mencionan cuatro tipos diferentes de aplicación en las áreas urbanas: bosques urbanos (parques), árboles de alineación, verde en patios privados, techos y fachadas verdes (Granero-Belinchon, et al., 2020; Barriuso y Urbano, 2021). En este sentido, Schmidt (2015) ha demostrado que la vegetación tiene un efecto de enfriamiento promedio de 1 a 4.7 °C, que se extiende de 100 a 1000 m en una zona urbana, aunque este alcance depende de la disponibilidad de agua de las plantas y árboles a incorporar.

A partir de lo descripto, este trabajo tiene como objetivo analizar cómo la selección de especies forestales de distinta permeabilidad solar impacta en el comportamiento térmico de esquemas urbanos adaptados a condiciones de piedemonte. Además, propone identificar el tipo de forestación que mejor se adecua a la morfología urbana propuesta.

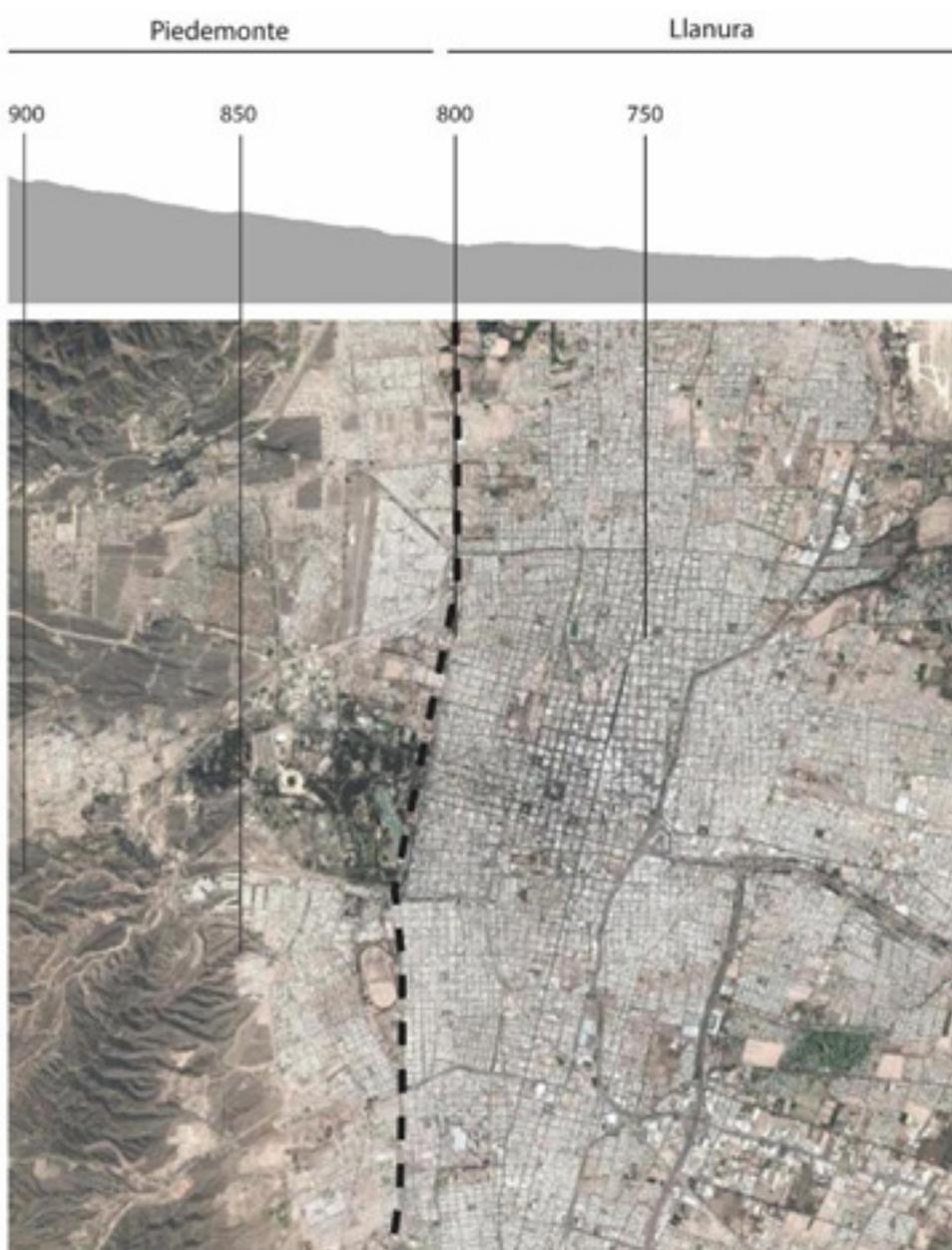
## 2. Métodos

La metodología empleada en el presente trabajo consta de tres secciones: a) Selección y caracterización del área de estudio; b) Descripción de esquemas propuestos y caracterización de especies forestales a incorporar, y c) Método de evaluación de esquemas urbanos propuestos con la incorporación de especies forestales adaptadas.

## 2.1. Selección y caracterización del área de estudio

El área de piedemonte a analizar está ubicada en la provincia de Mendoza, en el centro-oeste de la República Argentina. Tiene una latitud de 32.5°S y la longitud 68.5°O. El territorio sobre el cual se implanta el AMM, de acuerdo con su geomorfología, es caracterizado por ser una amplia planicie semidesértica de tipo aluvial con pendientes que se extienden hacia el oeste al pie de la precordillera de Los Andes. Su perfil seccional presenta hacia el oeste un paisaje dominado por la presencia de

montañas elevadas, y hacia el este el territorio desciende y se desarrolla en una amplia llanura, quedando definidos principalmente dos escenarios: llanura (500 a 800 m.s.n.m.) y piedemonte (801 a 1400 m.s.n.m.). Es las altitudes comprendidas entre los 500 y 1400 m.s.n.m. se han emplazado los principales asentamientos urbanos, y es allí donde se desarrolla la mayoría de las actividades productivas de la provincia, tanto agrícola como industrial (Figura 1).



**Figura 1:** Altimetría del Área Metropolitana de Mendoza

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

La caracterización del área de estudio se realizó a través de un relevamiento de planos catastrales e imágenes aéreas obtenidas por la utilización de drones, en donde se analizó la topografía del terreno, la lógica de crecimiento urbano, así como también las especies forestales presentes en el área. A partir del análisis cartográfico se tipificó el área de piedemonte en tres sectores urbanos: Sector Norte (Departamentos de Las Heras y Capital), Sector Centro (Departamento de Godoy Cruz) y Sector Sur (Departamento de Luján de Cuyo). Cada sector posee diferentes geomorfologías y tendencias de crecimiento urbano. En el plano de crecimiento urbano sobre el área de piedemonte desde el año 1960 (Figura 2), se puede observar que el Sector Norte seleccionado para este estudio es el que presenta un mayor desarrollo urbano, debido a la constante expansión hacia el Oeste. Este sector está ubicado sobre una altitud de 890 msnm., posee una accidentada geografía cuya pendiente principalmente es de 30%, siendo esta la máxima pendiente permitida para ser urbanizada, según regulaciones internacionales. Las especies forestales para el arbolado de alineación son variadas debido a las diversas enfermedades que han sufrido las especies plantadas originalmente. Además, los vecinos las han reemplazado reforestando sin ningún criterio. El arbolado urbano está conformado por un conjunto diverso de especies cuya elección generalmente es definida por el propietario frentista.

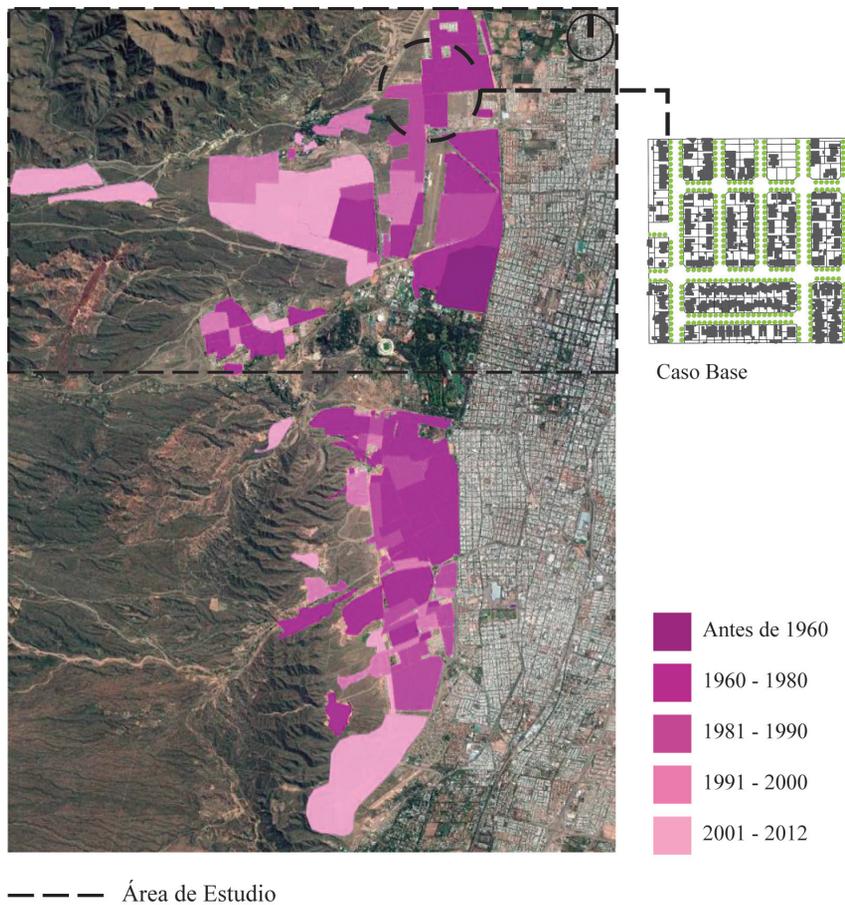
Como conjunto residencial referente de este sector se seleccionó una trama racional, ya que es el más representativo de todo el piedemonte del AMM (80%). Este conjunto posee las siguientes características: Largo de manzanas de 150 m, ancho de calles de 16 m y 20 m, superficie de lotes de 200 m<sup>2</sup>, Factor de ocupación de suelo de 0,55, Retiros: frontal de 2m, solo tienen un retiro lateral de 5,50 m, ya que el diseño del barrio consta de viviendas apareadas. La forestación de esta trama es la especie *Melia azedarach* (Paraíso), árbol de segunda magnitud, altura máxima de 15 m y diámetro de copa que varía entre 6- 8 m.

## 2.2. Descripción de los esquemas propuestos y caracterización de especies forestales a incorporar

Esta sección está dividida en una etapa que consiste en la propuesta: a) de diseño de esquemas urbanos adaptados a condiciones de piedemonte, y b) especies forestales a incorporar en esquemas urbanos.

### Diseño de esquemas propuestos adaptados a condiciones de piedemonte

Para el desarrollo de la propuesta de esquemas urbanos se tuvieron en cuenta diferentes consideraciones extraídas a partir del análisis estadístico de los diferentes comportamientos micro-climáticos de las



**Figura 2:** Expansión de la mancha urbana sobre el área piedemontana y ubicación del caso base  
**Fuente:** Elaboración propia (2021)

urbanizaciones monitoreadas (Castillo et al., 2019) y de la realización de una revisión bibliográfica de las normativas internacionales y locales que regulan el desarrollo urbano del piedemonte (Castillo et al., 2017). Este estudio permitió identificar indicadores rectores en el ordenamiento territorial que impactan en la sustentabilidad ambiental de las urbanizaciones evaluadas. Los indicadores urbanísticos seleccionados son: Preservación de la pendiente; Preservación de flora y fauna; Identificación de peligros geológicos; Posibilitar la infiltración de agua de lluvia para la mitigación de riesgos aluvionales; Accesibilidad y ancho de calles y Esquemas de Urbanización que acompañan a la morfología del terreno. Los indicadores edilicios identificados son los siguientes: Dimensión de lotes: las normativas internacionales proponen lotes de grandes dimensiones con el objeto de urbanizar moderadamente las áreas de piedemonte; FOS: la ocupación de uso del suelo se relaciona con la pendiente de la zona a intervenir, en este caso pendiente de 30%; Retiros que permitan la mejor captación de radiación solar de todas las viviendas, y Altura: fijar una altura continua y homogénea que permita continuar un perfil edilicio que acompañe las pendientes del terreno.

A partir de este conjunto de indicadores se propusieron dos esquemas de urbanización que responden a los siguientes tipos de tramas: Trama lineal orgánica caracterizada por manzanas longitudinales con desarrollo Norte – Sur, adaptadas a la topografía del terreno natural. El esquema incorpora un espacio verde público cuyo diseño distribuye áreas verdes y selladas de la siguiente forma: 10% del espacio abierto con forestación en el área central, 40% de superficie sellada en el área semi-perimetral y 50% de forestación en el área perimetral, (Stocco, 2016). El segundo esquema propuesto es la Trama orgánica con Cul-de-Sac, caracterizada por el diseño de manzanas adaptadas a la topografía del terreno con agrupamiento de lotes en formas de manzanas diversas y calles sin salida. Este esquema acompaña los conceptos de urbanización norteamericanos de agrupar viviendas en forma de cluster y la incorporación de Cul-de-Sac en el tejido urbano; de esta manera queda conformado un esquema más abierto debido a la presencia de mayor espacio de terreno, sin ocupar en relación a la Trama

lineal orgánica. Ambos esquemas poseen un diseño urbano que acompañan a la morfología y la pendiente del terreno (30%), se incorporan áreas de infiltración tanto en los canales viales como en el interior de los lotes, el factor de ocupación del suelo está relacionado con la pendiente. Es decir, a una pendiente del 30% se propone un factor de ocupación mínimo de 0.15.

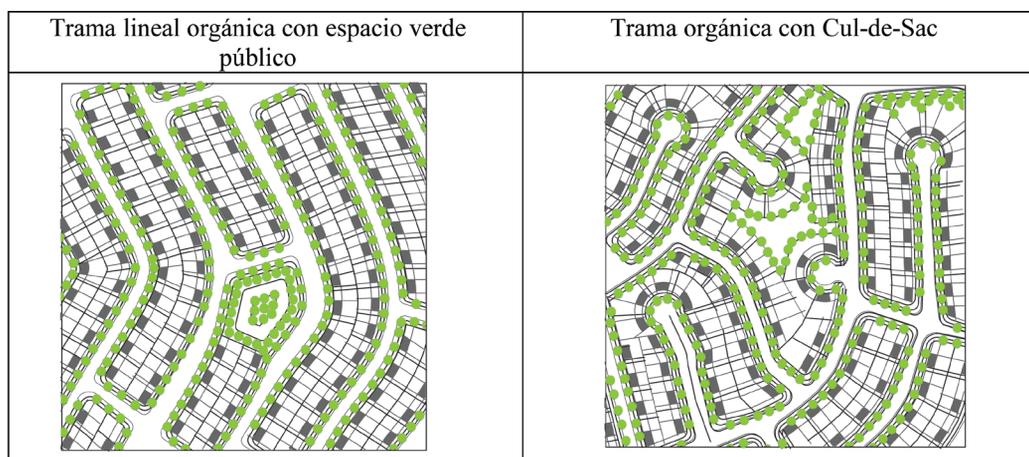
Los esquemas urbanos propuestos presentan las siguientes características: Largo de manzanas de 200 m, ancho de calles de 20 m, superficie de lotes de 480 m<sup>2</sup>, Factor de ocupación de suelo de 0,15, Retiros: frontal de 2 m; retiros laterales: retiro lateral Sur de 3m, y un retiro lateral orientación Norte de 11m con el fin de garantizar el acceso al sol.

En la Figura 3 se observa la planimetría de ambos esquemas propuestos adaptados a áreas de piedemonte.

### Especies forestales a incorporar en esquemas urbanos adaptados

Para evaluar la incidencia de forestales con diferentes porcentajes de permeabilidad solar en esquemas urbanos insertos en áreas de piedemonte, se propusieron dos especies forestales que presentan aptitud para su utilización en medios urbanos, han sido utilizadas en arbolado de alineación en el Área Metropolitana de Mendoza y presentan distintos niveles de permeabilidad a la radiación solar (Cantón et al, 2000; Cantón et al., 2003). Se persigue como objetivo determinar el impacto del uso de distintos tipos de forestales en el comportamiento térmico de los canales viales asociado a diferentes condiciones de sombreado. Se describe para cada una de las especies sus características morfológicas y fenológicas.

- Morera (*Morus alba*): árbol de segunda magnitud, caducifolio; alcanza una altura máxima de 12 m, con diámetro de copa variable entre 6 y 8 m, y posee una permeabilidad solar baja de 14.53% en verano. La especie representa el 42% del arbolado utilizado en canales viales del AMM.
- Paraíso (*Melia azedarach*) es la tercera especie más



**Figura 3:** Esquemas urbanos propuestos adaptados a condiciones de piedemonte  
**Fuente:** Elaboración propia (2021)

común, representa el 18% de la forestación del AMM; es un árbol de segunda magnitud, caducifolio, con una altura máxima de 15 m; las dimensiones de copa varían de 6 a 8 m de diámetro y una permeabilidad solar media de 19.79% en verano (UNICIPIO 2018; Cantón et al., 2000).

Ambas especies presentan desarrollos morfológicos semejantes y se diferencian entre sí en términos de permeabilidad solar. Además, cumplen con los siguientes indicadores de sustentabilidad: bajo requerimiento hídrico (Martínez et al., 2014), rápido nivel de crecimiento para alcanzar la máxima altura, mayor longevidad y una alta adaptabilidad al diseño de alineación en espacios urbanos conformados por canales viales de 16 y 20 m, anchos propuestos en los esquemas de urbanización que este trabajo evalúa (Martínez et al., 2009). Se ha demostrado que la convivencia de las especies de segunda magnitud en canales viales de 16 y 20 m de ancho y baja densidad edilicia ofrecen las mejores condiciones de habitabilidad térmica y confort (Correa, et al., 2012). En la Tabla 1 se observan las diferencias morfológicas y de permeabilidad de las dos especies propuestas.

### 2.3. Método de evaluación de esquemas urbanos con la incorporación de especies forestales adaptadas

Para verificar el comportamiento de las propuestas urbanas se seleccionó y monitoreó un escenario existente considerado como representativo del área urbana de piedemonte. Los esquemas propuestos se simularon micro-climáticamente mediante el software ENVI-met. Los resultados de las simulaciones fueron ajustados con los obtenidos del monitoreo del escenario existente.

#### Monitoreo del escenario existente

El escenario existente fue monitoreado micro-climáticamente a lo largo de una campaña de mediciones en la estación de verano durante un período de 28 días (del 2 al 30 de enero del 2018). Se adquirieron en forma simultánea los datos de temperatura y humedad relativa del aire cada 15 minutos, mediante sensores del tipo HOBO UX100-003 -Temperature/Relative Humidity data

logger- ubicados en el centro de dos canales viales con distinta orientación: Norte-Sur y Oeste-Este, sobre un poste del alumbrado público a 2 m de altura en relación al nivel de la acera (Oke, 2004). Los sensores fueron colocados en el interior de un receptáculo de PVC blanco con caladuras estratégicamente realizadas para permitir la circulación del aire y preservar a los sensores de la radiación solar. El SVF fue calculado a partir de imágenes hemisféricas capturadas en el centro del canal vial con una cámara digital a la cual se le incorporó un lente de ojo de pez. Se utilizó el software Pixel de Cielo (Correa et al., 2006) para procesar dichas imágenes.

#### Simulación y ajuste de los esquemas urbanos analizados (existente y propuestos)

Se realizó una validación de los procesos de simulación numérica que predicen el comportamiento térmico de los esquemas urbanos propuestos mediante un ajuste del modelo teórico con el modelo monitoreado.

Los esquemas urbanos propuestos y el caso existente se evaluaron micro-climáticamente mediante el uso del software ENVI-met. La termodinámica y leyes fundamentales de la dinámica de los fluidos constituyen las normas básicas con las cuales se basa este software (Bruse, 1999). ENVI-met trabaja con una serie de datos de entrada o "inputs", siendo estos datos diferenciados en tres componentes de entrada:

- Área de entrada: se crea a través de una interfaz gráfica y contiene los datos geométricos del modelo simulado, así como también la ubicación de la forestación.

- Base de Datos: se incorporan en esta sección los datos y características de la forestación y la composición del suelo. La especie forestal utilizada para el ajuste del conjunto residencial referente fue la denominada "TH" de la librería PLANTS.DAT de ENVI-met. La altura se determinó en 15 m por corresponder con el desarrollo promedio de un forestal de 2° magnitud con media permeabilidad solar (caso correspondiente a la especie *Melia azedarach*- Paraíso). Las características de esta tipología forestal son: 400 de resistencia mínima estomática, 0.20 de albedo de onda corta de la hoja de la planta, 2 m de profundidad total de la zona radicular, LAD (Leaf Area Density) de

Especie	Cantidad de especies presentes en el AMM	Diámetro de copa	Magnitud - Altura Final -	Hábito de crecimiento y velocidad	Permeabilidad	Imagen
Morera ( <i>Morus alba</i> )	42%	6-8 m	2ª Magnitud 10-12 m	Caducifolio - Alta	Baja 14.53%	
Paraíso ( <i>Melia azedarach</i> )	18%	6-8 m	2ª Magnitud 12-15	Caducifolio – Alta- Media	Media 19.79%	

**Tabla 1:** Especies arbóreas-arbustivas propuestas para la forestación de áreas urbanas y periurbanas del piedemonte de Mendoza

Fuente: Elaboración propia

0.40 a 1.80 de densidad del área foliar en  $m^2/m^3$  y RAD (Root Area Density) de 0.10 de densidad del área de la raíz en  $m^2/m^3$ . Para la simulación de los esquemas urbanos con forestación de baja permeabilidad solar se utilizó la tipología de árbol "Tb": la altura se determinó en 12m por corresponder a un forestal de 2° magnitud, caso correspondiente a la especie *Morus alba* (Morera). Las características de esta tipología forestal son: 400 de resistencia mínima estomática, 0.20 de albedo de onda corta de la hoja de la planta, 2m de profundidad total de la zona radicular, LAD de 0.80 a 2.00 de densidad del área foliar en  $m^2/m^3$  y RAD de 0.10 de densidad del área de la raíz en  $m^2/m$ . La composición del suelo se configuró en la librería (SOILS.DAT y PROFILS.DAT) ingresando la caracterización por capa en profundidad del suelo con el objetivo de representar el perfil de suelo del área de piedemonte de Mendoza.

- Archivo de Configuración: se ingresan parámetros de cálculo iniciales y condiciones de contorno que caracterizan la simulación. En este archivo se indican todos los datos iniciales de configuración de la simulación a realizar, así como también los datos climáticos iniciales.

En la Tabla 2 se presentan los datos de entrada del archivo de configuración "Configuration File" del conjunto representativo. Esta se divide en 3 categorías

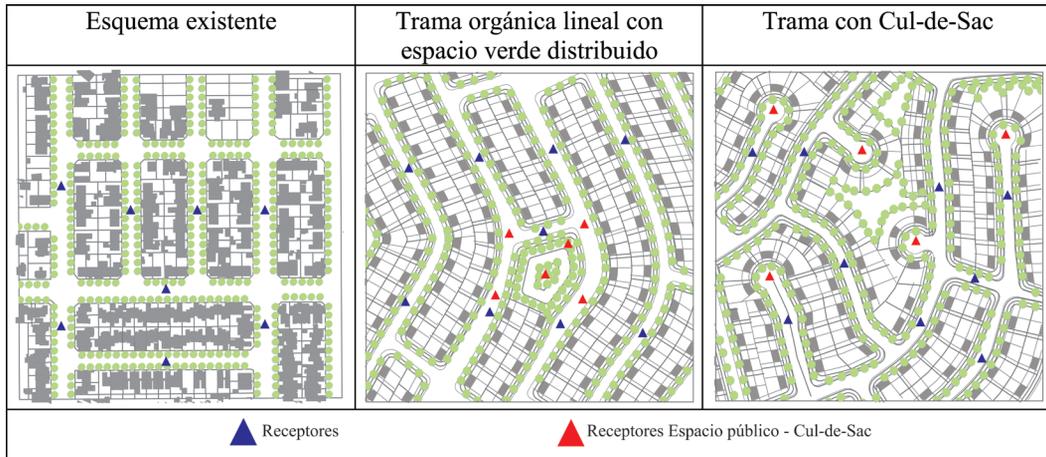
de datos: meteorológicos, edificación y suelo. Los datos meteorológicos y de edificación de entrada se mantienen constantes en los ajustes, ya que son condiciones climáticas a nivel meso-escala y la tecnología y materialidad de las viviendas es la misma. Por último, se ajustaron el perfil de composición de suelo y las temperaturas superficiales del mismo de la capa inicial y media.

Descripción del modelo físico empleado en la simulación: las simulaciones se realizaron con una superficie de referencia de 300 x 300 m. La grilla es de 100 x 100 x 30, por lo tanto, la resolución del área es de 3 x 3 x 3m y el número de grillas totales es de x: 86; y: 86; z: 30. Para la obtención de datos del efecto de la trama sobre la temperatura del aire de cada esquema urbano analizado se ubicaron 9 receptores en los canales viales urbanos y 6 receptores cercanos a los espacios verdes públicos. Los primeros 3 en un radio de 50m y los segundos en un radio de 100m. En el caso particular del esquema de trama orgánica con Cul-de-Sac, además de los receptores en los canales urbanos, se ubicaron (5) cinco receptores en los centros de cada Cul-de-Sac. En la Figura 4 se puede observar la ubicación de los receptores en cada esquema urbano analizado.

Parámetros para configuración Envi-met	Valores
<i>Meteorológicos</i>	<i>* valores por defecto de ENVI-met</i>
Velocidad viento a 10m sobre suelo (m/s)	3.5
Dirección viento (0°:N, 90°:E, 180°:S, 270°:W)	135°
Rugosidad $z_0$	0.1
Factor de ajuste solar	1.5
Temperatura atmosférica inicial (K)	298
Humedad específica a 2500m.s.n.m (g/kg-1)	2.8
Humedad relativa a 2m (%)	37
<i>Edificación</i>	
Temperatura interior (K)	297
Transmitancia pared ( $W/m^2.K$ )	2
Transmitancia techo ( $W/m^2.K$ )	0.78
Albedo pared	0.3
Albedo techo	0.2
<i>Suelo</i>	
Temperatura superficial, capa inicial (0-20cm)	293K
Temperatura superficial, capa media (20-50cm)	290K*
Temperatura superficial, capa profunda (<50cm)	290K*
Humedad relativa, capa inicial (0-20cm)	20%*
Humedad relativa, capa media (20- 50cm)	35%*
Humedad relativa, capa profunda (<50cm)	60%*

**Tabla 2:** Valores archivo configuración ENVI-met

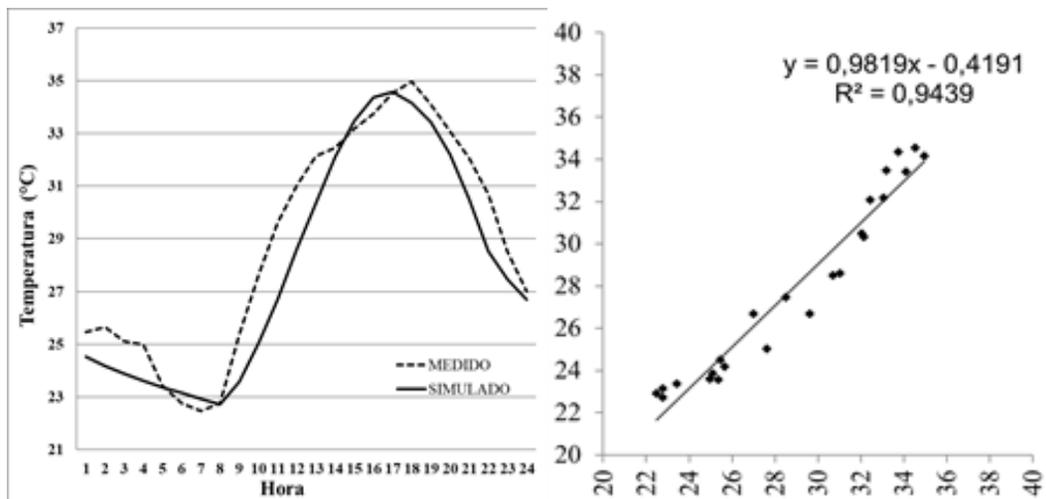
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 4:** Ubicación de receptores en las tramas urbanas  
Fuente: Elaboración propia (2021)

Con el fin de validar los resultados, se realizó un ajuste entre el comportamiento microclimático monitoreado in situ con el modelo numérico. En la Tabla 3 se presentan las curvas de ajuste del caso simulado con los valores de temperatura del aire máxima, mínima, promedio y amplitud; así como también se muestran los valores de SVF y los 6 indicadores estadísticos utilizados para estimar el grado de precisión del modelo numérico simulado versus el monitoreado. Esto permite demostrar la confiabilidad de los resultados arrojados por la simulación. La

identificación y cuantificación de los errores se realizó mediante la determinación del coeficiente de correlación ajustado o determinación ( $R^2$ ), el error de polarización media (MBE), el error absoluto medio (MAE), el error medio porcentual absoluto (MAPE), el error cuadrático medio (RSME), el error cuadrático medio sistemático (RSMEs) y el error cuadrático medio aleatorio (RSMEu). Cada indicador expresa el grado de exactitud o error del modelo bajo diferentes perspectivas.



Tº	Máxima	Mínima	Prom.	Ampl.	SVF
Simulado	34.56	22.72	27.52	11.84	0.69
Medido	34.96	22.48	28.86	12.48	0.62
Delta	0.39	-0.24	0.94	0.64	0.07
MBE	MAE	MAPE	RMSE	RMSEs	RMSEu
-1.9	0.5	-6.1%	2.2	1.0	1.1

**Tabla 3:** Curva de ajuste del caso simulado y los indicadores estadísticos  
Fuente: Elaboración propia

### 3. Resultados

En esta sección se expone el análisis comparativo de los esquemas urbanos adaptados a condiciones de piedemonte con la incorporación de forestales de permeabilidades diferentes. Se contrasta el comportamiento térmico de las distintas propuestas urbano-edilicias (Trama lineal orgánica y Trama orgánica con Cul-de-Sac) con arbolado de alineación conformado por dos tipos de especies: Morera y Paraíso. Además, se presenta un análisis de variabilidad de los valores de temperatura máxima y mínima a partir del gráfico box-plot.

#### 3.1. Análisis de las temperaturas del aire promedio: máximas, mínimas y medias

Se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con el software ENVI-met de los diferentes esquemas urbanos propuestas que incorporan especies forestales para configurar el arbolado de alineación adaptado a las condiciones del área de piedemonte. En la Figura 5 se exponen los resultados de las temperaturas promedio máximas, mínimas y medias, calculadas a partir de los receptores colocados en los esquemas propuestos con las especies con diferentes permeabilidades de radiación solar.

#### Comportamiento térmico de trama lineal orgánica

Al evaluar el comportamiento de las dos especies forestales incorporadas en la trama lineal orgánica (Figura 5) se observa un mejor desempeño térmico en la trama con especie forestal de menor permeabilidad – Morera-. La incorporación de esta especie forestal logra los menores valores de temperatura, alcanzando una diferencia en la temperatura máxima mayor a los 4°C, en la temperatura mínima de más de 2°C y en la media de 3°C. Esta disminución de la temperatura del aire está relacionada a la reducción de la exposición solar en los canales viales presentes en trama orgánica con especie forestal de menor permeabilidad solar. Si bien la trama con especie forestal de mayor permeabilidad solar mejora el comportamiento de la temperatura mínima debido a las mayores posibilidades de enfriamiento radiativo y convectivo nocturno, esto no es suficiente para compensar el efecto de la radiación solar incidente durante las horas del día, generando un mejor funcionamiento térmico día-noche de la trama con forestal de menor permeabilidad.

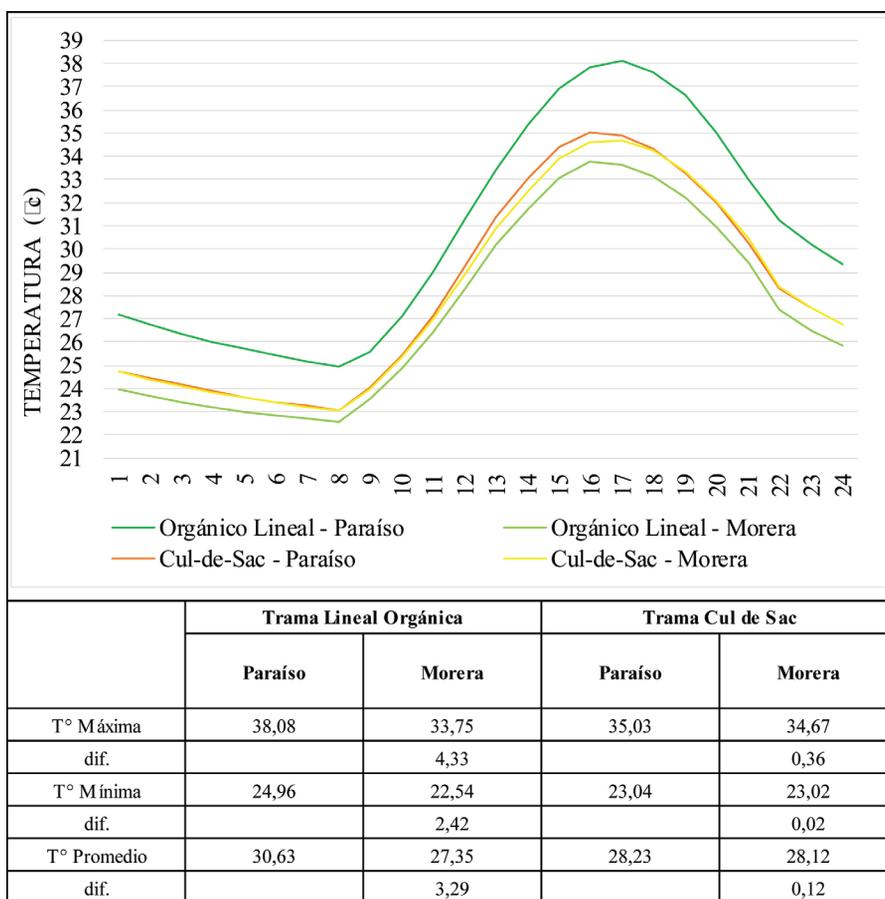


Figura 5: Comportamiento térmico de los esquemas urbanos propuestos con la incorporación de especies forestales  
Fuente: Elaboración propia (2021)

### Comportamiento térmico de Trama con Cul-de-Sac

De la comparación térmica de las tramas con Cul-de-Sac con especies forestales de diferente permeabilidad se observa un comportamiento similar en ambos casos. Esto se desprende del análisis de la diferencia de las temperaturas máximas, donde la trama Cul-de-Sac con especie de permeabilidad alta solo presenta temperaturas máximas del orden de medio grado superior a la misma trama forestada con especies de menor permeabilidad (35.03°C vs 34.67°C- ver Figura 5). Respecto al comportamiento de la temperatura mínima no se aprecian diferencias significativas (23.04°C vs 23.02°C). Estos resultados parecerían indicar que, en este tipo de trama de carácter abierto, la variación en la condición de sombra -resultante de distintas permeabilidades del arbolado- no sería la variable dominante para controlar el balance térmico de la trama asociado a los procesos de ganancia, acumulación térmica y enfriamiento.

### Comparación del comportamiento térmico de esquemas urbanos propuestos con distintas especies forestales

Al comparar el comportamiento térmico de dos tramas con la incorporación de especies forestales con diferentes permeabilidades (Figura 5), la trama lineal orgánica muestra mayores variaciones de comportamiento térmico en relación al uso de especies de distinta permeabilidad como arbolado de alineación.

Esta trama además presenta variaciones de temperatura máxima en un rango comprendido entre (38.08°C y 33.75°C) y de temperatura mínima entre (24.96°C y 22.54°C). Mientras que la trama orgánica con Cul-de-Sac no presenta diferencias significativas de comportamiento térmico, las temperaturas máximas varían entre 35.03°C y 34.67°C y las mínimas entre 23.04°C y 23.02°C. Esto se debe a que, para el caso de la trama lineal orgánica, la variable de análisis (permeabilidad forestal) es de alto impacto en los procesos de ganancia y acumulación de calor que a la noche condicionan el enfriamiento de la trama; y en el caso de la trama orgánica con Cul-de-Sac, el comportamiento semejante entre los dos casos evaluados con especies de diferentes permeabilidades podría indicar el bajo impacto de la variable en el comportamiento térmico del espacio urbano-edilicio. Este resultado pone en discusión la eficiencia del esquema del arbolado de alineación como concepto de sombreado del espacio público en tramas de carácter orgánico-abierto e indicaría la necesidad de fortalecer la condición de sombra a partir de la evaluación de otros esquemas de agrupamiento de árboles.

### 3.2. Variabilidad de respuesta térmica de los diferentes esquemas

Para contrastar el comportamiento de todos los receptores ubicados en los diferentes puntos de los esquemas urbanos se realizaron unos gráficos del tipo box-plot. Estos gráficos muestran la variabilidad de la distribución de las temperaturas: máxima y mínima.

#### Temperatura máxima

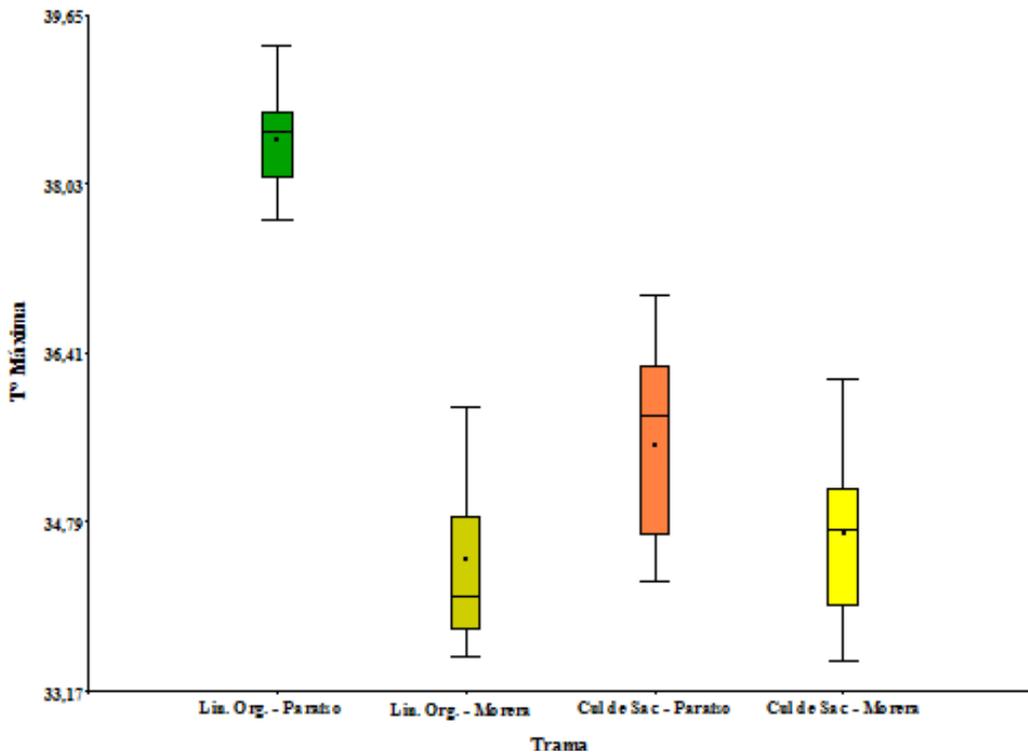


Figura 6: Gráfico Box.plot de temperaturas máximas  
Fuente: Elaboración propia (2021)

En el gráfico box-plot de la Figura 6 se observa que la trama orgánica Cul-de-Sac con especie forestal de mayor permeabilidad solar (Paraíso) es la que presenta mayor variabilidad de las temperaturas máximas alcanzando diferencias de 1.5°C (Q1=34.70°C y Q3= 36.20°C); esta misma trama, pero con especie forestal de menor permeabilidad solar (Morera), logra disminuir la variabilidad de la temperatura en 1.15°C (Q1= 34°C y Q3= 35.15°C). Finalmente, si se analiza la variabilidad de las temperaturas máximas para la trama lineal orgánica, se observa que la trama que incorpora especie forestal de baja permeabilidad (Morera) posee la mayor diferencia de valores (1.10°C –Q1=33.74°C y Q3= 34.86°C), mientras que la especie de mayor permeabilidad solar (Paraíso) es la que presenta la menor variabilidad de 0.62°C (Q1=38.10°C – Q3=38.72°C). La variabilidad de la distribución de la temperatura máxima en la trama lineal orgánica con especie forestal de mayor permeabilidad es alta y su comportamiento es homogéneo en toda el área analizada. Esto se debe a que, si bien se trata un planteo orgánico, el esquema de manzanas y lotes presenta condiciones de relativa regularidad, mientras que en la trama Cul-de-Sac se observa heterogeneidad en la distribución de valores de las temperaturas máximas asociada al esquema orgánico con agrupamiento de lotes en torno a manzanas con diversidad de morfologías.

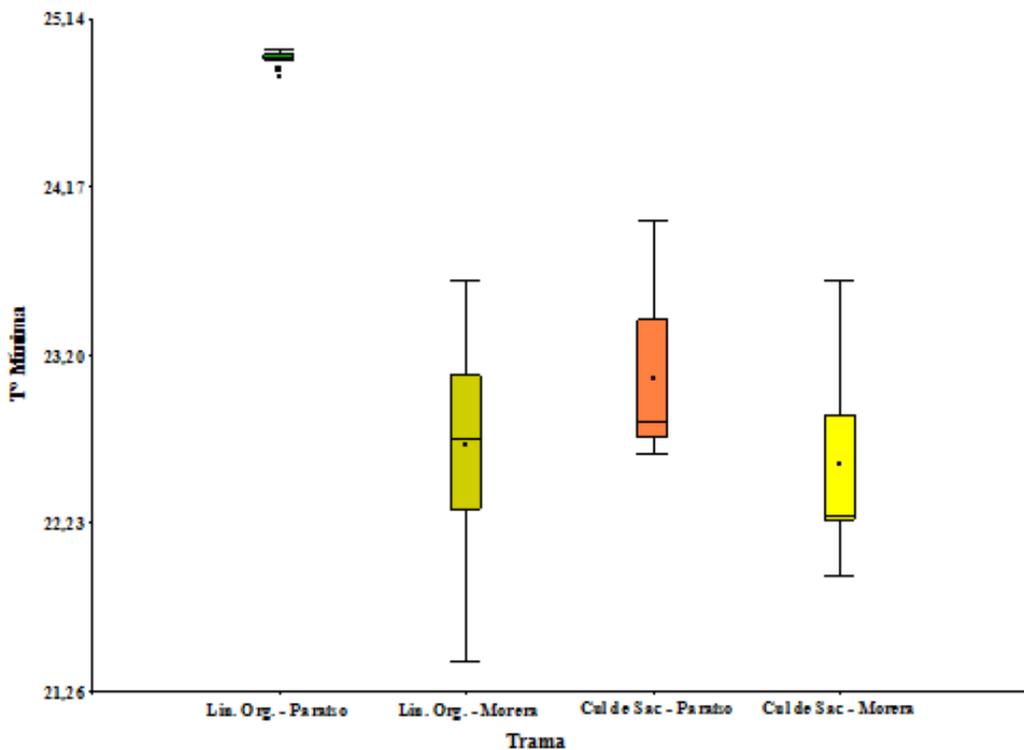
Al analizar el diagrama de variabilidad de las temperaturas mínimas (Figura 7) se observa que la trama orgánica Cul-de-Sac presenta similar distribución de temperaturas: en especies forestales de mayor permeabilidad la diferencia es de 0.68°C (Q1= 22.71°C

y Q3= 23.39°C), mientras que, para especies forestales de menor permeabilidad solar (Morera) la diferencia es de 0.57°C (Q1= 22.4°C y Q3= 22.97°C). En la trama lineal orgánica con especie forestal de menor permeabilidad (Morera) se observa que la misma es de 0.78°C (Q1= 22.45°C y Q3= 23.06°C), mientras que para la especie forestal de mayor permeabilidad (Paraíso) la variabilidad es mínima (Q1=24.9°C y Q3=24.95°C). La condición de heterogeneidad u homogeneidad en el comportamiento térmico de las tramas está asociado a esta condición en el diseño de las tramas evaluadas. Es decir, en tramas heterogéneas, como es el caso de la trama orgánica con Cul-de-Sac, la respuesta térmica es heterogénea, y viceversa en el caso de la trama lineal orgánica.

#### 4. Conclusiones

El piedemonte del Área Metropolitana de Mendoza se caracteriza por ser un sector con una alta fragilidad ambiental, que cuenta con escasos recursos hídricos y una alta disponibilidad de radiación solar. Estas condiciones demandan un desarrollo urbano que considere estrategias que mitiguen el aumento de la temperatura del aire, mejoren la habitabilidad de los espacios públicos exteriores, y que causen el menor impacto ambiental del sector. Una de esas estrategias es proponer esquemas urbanos adaptados a las condiciones particulares del sector a intervenir en donde no solo se preserve la geomorfología del terreno, sino que contribuya a mitigar el calentamiento ocasionado por el crecimiento urbano y que incorpore especies forestales adaptadas a las condiciones de aridez y de alta incidencia solar.

**Temperatura mínima**



**Figura 7:** Gráfico Box.plot de temperaturas mínimas  
**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Ante este marco, el presente trabajo propone evaluar la incorporación de distintos tipos de especies forestales como arbolado de alineación en esquemas urbanos que responden al tipo de trama lineal orgánica y trama orgánica con Cul-de-Sac.

Los resultados de este trabajo indican que existen diferencias en la respuesta térmica de los esquemas urbanos propuestos frente a la selección de la especie forestal para el arbolado de alineación. Dichas diferencias son mayores en el caso de la trama lineal orgánica debido a que sus características intrínsecas generan una alta dependencia entre la respuesta térmica de la trama y la selección de la especie para conformar el arbolado de alineación de canales viales. Es decir, el tipo de árbol en relación al potencial de sombreado tiene una alta incidencia en la temperatura del espacio urbano-edificio. Para esta trama, la forestación de canales viales con especie del tipo Morera reporta disminuciones de la temperatura máxima del orden de los 4°C con respecto a canales viales forestados con especies de mayor permeabilidad solar (Paraíso).

En el caso de la trama orgánica Cul-de-Sac, las características morfológicas de los canales viales –abiertos- y amanzanamientos –heterogéneos- determinan que la variación de la permeabilidad forestal tenga una menor impronta sobre la respuesta térmica de los espacios públicos.

Del análisis realizado también se desprende que es necesario repensar el diseño de la forestación urbana para la trama con Cul-de-Sac, a fin de reorientar el concepto de arbolado de alineación hacia otros esquemas de agrupamiento que potencien los beneficios de la forestación urbana, en términos de sus aportes a las condiciones de sombra del espacio público y su impacto en el comportamiento térmico.

Finalmente, el propósito de este trabajo es generar conocimiento sobre el impacto de la implementación de distintas estrategias de acondicionamiento térmico de esquemas sustentables para el desarrollo urbano de áreas de alta fragilidad ambiental, como el piedemonte de Mendoza. Con esto se facilitará a los responsables de la producción del hábitat la toma de decisiones que permitan a mediano y largo plazo garantizar la sustentabilidad ambiental del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Mendoza.

Cómo citar este artículo/How to cite this article:  
Castillo, A., Correa, E., y Cantón, M. (2022). Incidenca de la permeabilidad solar forestal en el comportamiento térmico de urbanizaciones adaptadas a áreas piedemontanas. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 11(21), 7-19. <https://doi.org/10.18537/est.v011.n021.a01>

## 5. Referencias bibliográficas

- Abraham, E. (1990). *Proyecto: Planificación y Ordenamiento Ambiental del Piedemonte al Oeste de la Ciudad de Mendoza*. IADIZA. Gobierno de Mendoza.
- Abraham, M. E., Roig, F. A. y Salomon, M. (2005). Planificación y gestión del piedemonte al oeste de la Ciudad de Mendoza. Un asunto pendiente. En A. Scoones y E. Sosa (Eds). *Conflictos socio- ambientales y políticas públicas en la provincia de Mendoza* (pp. 267-295). OIKOS-Red Ambiental.
- Barriuso, F. y Urbano, B. (2021). Green roofs and walls design intended to mitigate climate change in urban areas across all continents. *Sustainability*, 13(4), 2245. <https://doi.org/10.3390/su13042245>
- Bochaca, F. (2005). El verde en la estructura urbana de Mendoza. *ARQ (Santiago) [online]* (60), 68-71. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-69962005006000013>
- Bórmida, E. (2014). Mendoza, una Ciudad oasis. *Revista de la Universidad de Mendoza*, (4-5), 121-137.
- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M. y Pullin, A.S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape Urban Planning*, 97(3), 147–155.
- Bruse, M. (1999). *The influences of local environmental design on microclimate*. University of Bochum.
- Cantón, M. A., Cortegoso, J. L. y De Rosa, C. (2000). Environmental and energy impact of the urban forest in arid zone cities. *Architectural Science Review*, 44 (1), 3-16.
- Cantón, M. A., Cortegoso, J. L. y De Rosa, C. (2003). Assessing the solar resource in forested urban environments: results from the use of a photographic-computational method. *Architectural Science Review*, 46 (2), 115-123.
- Castillo, A. L., Correa, E. N. y Cantón, M. A. (2017). Regulación urbanística de piedemonte en ciudades latinoamericanas. Análisis crítico de la normativa internacional y el marco regulatorio de la Ciudad de Mendoza, Argentina. *ACE. Arquitectura, Ciudad y Entorno*, 12 (35), 39-70. <https://doi.org/10.5821/ace.12.35.4761>
- Castillo, A., Correa, E., y Cantón, M. (2019). Geomorfología y forma urbana. Comportamiento térmico de distintas tramas en áreas de piedemonte: el caso de Mendoza, Argentina. *Revista EURE - Revista de Estudios Urbano Regionales*, 45(136), 183-207. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612019000300183>
- Chavoya Gama, J. I., García Galván, J. y Rendón Contreras, H. J. (2009). Una reflexión sobre el modelo urbano: ciudad dispersa-ciudad compacta. En *5th International Conference Virtual City and Territory* (pp. 37-50). Centre de Política de Sòl i Valoracions.

- Chow, W.T.L. y Brazel, A.J. (2012). Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building Environment*, 47, 170–181.
- Correa, E. (2006). *Isla de Calor Urbana. El caso del área metropolitana de Mendoza*. Universidad Nacional de Salta.
- Correa, E., Pattini, A., Córca, M. L., Fornés, M., y Lesino, G. (2006). *Software: Pixel de Cielo. Programa informático que calcula el factor de visión de cielo en un punto determinado de un área de estudio, a partir del procesamiento de una imagen digital hemisférica tomada con una lente ojo de pez*. Número de registro CONICET: 07304.
- Correa, E., Ruíz, A., Cantón, A. y Lesino, G. (2012). Thermal comfort in forested urban canyons of low building density. An assessment for the city of Mendoza, Argentina. *Building and Environment*, 58, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.007>.
- Entrena Durán, F. (2005). Procesos de periurbanización y cambios en los modelos de ciudad: un estudio europeo de casos sobre sus causas y consecuencias. *Papers: revista de sociología*, 78, 59–88, <https://raco.cat/index.php/Papers/article/view/40273>
- Granero-Belinchon, C., Adeline, J., Lemonsu, A. y Briottet, X. (2020). Phenological Dynamics Characterization of Alignment Trees with Sentinel-2 Imagery: A Vegetation Indices Time Series Reconstruction Methodology Adapted to Urban Areas. *Remote Sens.* 12, (4), 639. <https://doi.org/10.3390/rs12040639>
- Kleerekoper, L., Van Esch, M., y Salcedo, T. (2010). How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.004>
- Lanza, K. y Stone, B. (2016). Climate adaptation in cities: What trees are suitable for urban heat management? *Landscape and Urban Planning*, 153, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.002>
- Lin, T., Matzarakis, A. y Hwang, R. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 45, 213–221.
- López Rodríguez, M. (2008). Riesgo en el piedemonte del Gran Mendoza por avance urbano. *Tiempo y Espacio*, 21, 47–57.
- Martínez, C., Cantón, A. y Roig, F. (2009). Impacto de la condición de aridez en el desarrollo ambientalmente sustentable de ciudades oasis. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 113 – 120.
- Martínez, C., Cantón, A. y Roig, F. (2014). Incidencia del déficit hídrico en el crecimiento de árboles de uso urbano en ciudades de zonas áridas. Caso de Mendoza, Argentina. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 39 (12), 890–897.
- Martínez, C., Ruíz, A. y Atencio, L. (2017). *Proyecto Integral de forestación y reforestación urbana para Mendoza. Sustentabilidad ambiental del boque urbano para ciudades de zonas áridas de Argentina*. UNICIPIO.
- McPherson, G. (2007). Urban tree planting and greenhouse gas reductions. *Arborist News* (6), 32–34. [www.isa-arbor.com](http://www.isa-arbor.com)
- Middel, A., Chhetri, N. y Raymond, Q. (2015). Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighbourhoods. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14, 178–186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2014.09.010>
- Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K., Yuan, C. y Ng, E. (2017). A study of the impact of s shadow-cast and tree species on in-canyon and neighbourhood's thermal comfort. *Building and Environment*, 115, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>
- Oke, T. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *IOM Report* (81), World Meteorological Organization.
- Oliver-Pujol, M. y Bisbal-Grandal, I. (2019). Diversidad en la dispersión: Morfología de las áreas residenciales en el periurbano del Gran Mendoza, *Urbano*, 22(40), 46–63. <https://doi.org/10.22320/07183607.2019.22.40.03>
- Ruíz, M. A., Correa, E. N. y Cantón, M. A. (2015). Incidencia de la selección de la especie forestal en el confort térmico de cañones urbanos de zonas áridas: El caso de Mendoza, Argentina. *Urbano*, 18(32), 60–70. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RU/article/view/2155>
- Ruíz, M. A., Sosa, M. B., Correa, E. N. y Cantón, M. A. (2017). Design tool to improve daytime thermal comfort and nighttime cooling of urban canyons. *Landscape and Urban Planning*, 167, 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.07.002>.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A. y Assimakopoulos, D.N. (2001). On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, 70(3), 201–2016. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00095-5).
- Schmidt, M. (2015). *The contribution of rainwater harvesting against global warming*. London, UK. Technische Universität Berlin, IWA Publishing.
- Stocco, S. (2016). *Impacto de la morfología y materialidad de las plazas en la calidad energético-ambiental de ciudades emplazadas en zonas áridas*. Universidad Tecnológica Nacional.
- UNICIPIO. (2018). *Sistema integrado de información y gestión para la refuncionalización y recuperación del arbolado urbano. Área Metropolitana de Mendoza*. Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Presidencia de la Nación Argentina: <https://www.mendoza.gov.ar/unicipio/wp-content/uploads/sites/32/2018/08/PROYECTO-ARBOLADO-FINAL.pdf>

Vargas, O. y Molina, L.F. (2014). Arborizaciones urbanas: estrategia para mitigar el calentamiento global. *Revista NODO*, 8(16), 99-108.

Wheeler, S.M., Abunnasr, Y., Dialesandro, J., Assaf, E., Agopian, S. y Gamberini, VC. (2019). Mitigating Urban Heating in Dryland Cities: A Literature Review. *Journal of Planning Literature*, 34(4), 434-446. doi:10.1177/0885412219855779