

# ACE 34

Electronic offprint

Separata electrónica

## ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA EN LAS CALLES DE BARCELONA, EN BASE A LA RELACIÓN ENTRE SU MORFOLOGÍA Y VEGETACIÓN

Carlos Fernando López Ordóñez, Jaume Roset Calzada y Gilkauris María  
Rojas Cortorreal.

---

Cómo citar este artículo: LÓPEZ ORDÓÑEZ, C.; ROSET CALZADA, J. y ROJAS CORTORREAL, G. *Análisis de la radiación solar directa en las calles de Barcelona, en base a la relación entre su morfología y vegetación* [en línea] Fecha de consulta: dd-mm-aa. En: ACE: Architecture, City and Environment = Arquitectura, Ciudad y Entorno, 12 (34): 45-68, 2017. DOI: 10.5821/ace.12.34.4708. ISSN: 1886-4805.

ACE

Architecture, City, and Environment  
Arquitectura, Ciudad y Entorno

c

## ANALYSIS OF THE DIRECT SOLAR RADIATION IN THE STREETS OF BARCELONA, BASED ON THE RELATION BETWEEN ITS MORPHOLOGY AND VEGETATION

**Key words:** Solar access; urban canyon; urban vegetation; Sky View Factor.

### Structured abstract

The use of vegetation as a protection against solar radiation and as a generator of thermal comfort in outdoor areas is not something new and it has been used throughout history, many times in the right way and many others in the wrong way, obtaining results that are not always the desired ones. The objective of this study is the quantification of direct solar radiation on the horizontal plane of an urban canyon, taking into account its relation between its morphology and the urban vegetation present in the canyon. The methodology used consists in several stages: firstly, the selection of the areas of study (in the city of Barcelona); secondly, a survey of the tree species present; thirdly, three-dimensional models were made in order to run simulations to analyse; as the fourth stage, on-site measurements are made in order to compare the simulation's results, obtaining as main conclusion that the factor that has greater weight in regard to the incidence or not of direct solar radiation on the horizontal plane of the urban canyon, is its morphology (aspect ratio (H/W), which goes hand in hand with the sky view factor (SVF)), being possible to modify the incidence of direct radiation through the correct use of urban vegetation. The originality of this study, lies in taking into consideration multiple factors that affect the incidence of direct solar radiation on the horizontal plane of any urban canyon (orientation, ratio aspect and SVF), along with the use of urban vegetation.

# ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA EN LAS CALLES DE BARCELONA, EN BASE A LA RELACIÓN ENTRE SU MORFOLOGÍA Y VEGETACIÓN

LÓPEZ-ORDÓÑEZ, Carlos Fernando <sup>1</sup>  
ROSET, Jaime <sup>2</sup>  
ROJAS-CORTORREAL, Gilkauris <sup>3</sup>

Remisión inicial: 03-12-2015

Remisión final: 21-06-2017

**Palabras clave:** acceso solar; cañón urbano; vegetación urbana; factor de vista de cielo.

## Resumen

El uso de la vegetación como protección a la radiación solar y como generadora de bienestar térmico en espacios exteriores no es algo nuevo y se ha utilizado a lo largo de la historia, en muchas ocasiones haciéndolo de una manera correcta y otras tantas de manera incorrecta, obteniendo resultados que no siempre son los deseados. El objetivo de este estudio es la cuantificación de la incidencia de la radiación solar directa sobre el plano horizontal de un cañón urbano, considerando la relación entre su morfología y la vegetación urbana con la que cuenta. La metodología utilizada consiste en varias etapas: primeramente, la selección de las áreas de estudio (en la ciudad de Barcelona), en segundo lugar un levantamiento de las especies arbóreas presentes, en tercer lugar se elaboraron modelos tridimensionales para llevar a cabo simulaciones para el análisis; como cuarta etapa se tomaron mediciones “in situ” para el comparar el resultado de las simulaciones, se analizaron y compararon los resultados, obteniendo como conclusión principal que el factor que tiene mayor peso en cuanto a la incidencia o no de la radiación solar directa sobre el plano horizontal del cañón urbano, es su morfología (relación de aspecto (H/W) lo cual va de la mano con el factor de vista de cielo, SVF, por sus siglas en inglés)<sup>4</sup>, siendo posible modificar la incidencia de radiación mediante el uso correcto de la vegetación urbana. La originalidad de este estudio, radica en tomar en consideración múltiples factores que afectan la incidencia de la radiación directa en el plano horizontal de cualquier cañón urbano (orientación, relación de aspecto y SVF) en conjunto con el uso de la vegetación urbana.

<sup>1</sup> Candidato a doctor por el programa Arquitectura, Energía y Medio Ambiente, del Departamento de Tecnología en la Arquitectura (TA), de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Av. Diagonal 649, 08028, Barcelona, España. E-mail: [carlosflo@gmail.com](mailto:carlosflo@gmail.com)

<sup>2</sup> Profesor del Departamento de Física Aplicada, de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Av. Diagonal 649, 08028, Barcelona, España. E-mail: [jaime.roset@upc.edu](mailto:jaime.roset@upc.edu)

<sup>3</sup> Doctora en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente, del Departamento de Tecnología en la Arquitectura (TA), de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Av. Diagonal 649, 08028, Barcelona, España. E-mail: [gilkaurisrojas@gmail.com](mailto:gilkaurisrojas@gmail.com)

<sup>4</sup> Sky View Factor: Porcentaje de cielo que se ve desde un punto situado en cualquier superficie.

## 1. Introducción

La vegetación ha sido un elemento importante en la arquitectura desde los inicios de ésta, no sólo para satisfacer una necesidad instintiva de protección o como decoración, sino como elemento esencial para determinar el ambiente físico inmediato, ya sea como vallado, pantalla visual, acústica, contra el viento, la lluvia, el sol, etc.

El uso de la vegetación como protección a la radiación solar no es un tema nuevo, y se ha utilizado a lo largo de la historia, en muchas ocasiones haciéndolo de manera correcta y muchas otras de manera incorrecta, obteniendo resultados que no siempre son los deseados, sobre todo si se considera su comportamiento a lo largo del año.

En muchos casos actuales el uso de la vegetación se sigue dando de manera que sólo se le da prioridad a los fines estéticos, sin tomar en cuenta la importancia que ésta toma en cuanto al control del confort ambiental en los diferentes espacios; esto es principalmente en los espacios públicos abiertos, como las calles y plazas. Es aquí donde surge la necesidad de este análisis sobre la relación de la morfología del cañón urbano con la vegetación urbana, de cómo el uso correcto de la vegetación representa la posibilidad de un mayor confort ambiental en estos espacios. Para la comprobación de las simulaciones efectuadas por medio del software Heliodon2 se realizaron mediciones “in situ”.

### 1.1 *Objetivo*

El objetivo de este artículo es la cuantificación de la incidencia de la radiación solar directa sobre el plano horizontal entre la relación de la morfología del cañón urbano<sup>5</sup> y la vegetación con la que éste cuenta, cómo ésta influye en la cantidad de radiación solar directa que incide sobre el plano horizontal, es decir, la calle, afectando en distintos niveles el grado de confort térmico en este espacio público. Conocer los porcentajes de reducción que representa la correcta utilización de la vegetación urbana en los distintos modelos de cañón urbano con los que cuenta la ciudad de Barcelona, España (lat. 41°N).

### 1.2 *Estado del arte*

Se han llevado a cabo múltiples investigaciones sobre la incidencia de la radiación solar en las calles y espacios públicos abiertos, en base a su morfología, sus diferentes orientaciones y sobre el comportamiento de la vegetación con la que cuentan dichos espacios, son investigaciones que incluyen tesis (tanto de nivel máster como de nivel doctoral), así como artículos y libros que abordan esta temática.

Cabe mencionar que para este trabajo se analizó la tesis doctoral realizada en 1999, titulada “La vegetación como Instrumento para el Control Micro climático” (Ochoa de la Torre, 1999), así como las tesinas de máster “La Vegetación Tropical en el Confort del Clima Urbano” (Rojas-Cortorreal, Roset y Naves, 2013), “Análisis de la radiación en calles de latitud 20°N” (Cedano Billini, 2014), “La Radiación Solar como Indicador Ambiental en Plazas del Barrio de Vila de

---

<sup>5</sup> Relación de aspecto: Proporción geométrica que existe entre la altura de los edificios adyacentes a una calle y al ancho de esta (H/A).

Gràcia” (Magnano, 2014), “Efectos de la morfología de las calles en el fenómeno de la isla de calor urbana en la ciudad de Barcelona” (Cabras, 2014) y “Análisis de la radiación en las calles de Barcelona y de Hermosillo” (López-Ordóñez y Roset, 2015), desarrolladas en la ciudad de Barcelona.

En cuanto a los *artículos y libros* de investigación consultados, realizados de 1976 a 2014 cabe destacar los siguientes: “The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands” (Oke, 1976), “Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden” (Barring, Mattsson y Lindqvist, 1985), “Effects of individual trees on the solar radiation climate of small buildings” (Heisler, 1986), “Street design and urban canopy layer climate” (Oke, 1988), “Street design and urban canyon solar access” (Arnfield, 1990), “La reconciliación de la escala urbana” (Echave Martínez, 2006), “Las escalas de luz” (Beckers, 2009a), “Effects of canyon geometry on outdoor thermal comfort: a case-study of high-density, warm-humid climate” (Sharmin & Steemers, 2013), “Street design and urban microclimate: Analyzing the effects of street geometry and orientation on airflow and solar access in urban canyons” (Shishegar, 2013), “La influencia de la configuración de los cañones urbanos en el confort del peatón” (Alicia, Lusett y Izaguirre, 2013), “Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands” (Bretz, Akbari & Rosenfeld, 1998), “Human thermal comfort below the canopy of street trees on a typical Central European summer day” (Mayer et al. 2009), “Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons” (Ali-Toudert y Mayer, 2007), “Solar energy as a design parameter in urban planning” (Kanters & Horvat, 2012), “El efecto del confort térmico producido por la especie arbórea Almez en el espacio público” (Rojas-Cortorreal, Roset, Jaime, et al. 2016a); así como los libros: “Boundary layer climates” (Oke, 1978), “Arquitectura y energía natural” (Coch Roura y Serra Florensa, 1995), “Environmental site layout planning: solar access, microclimate and passive cooling in urban areas” (Littlefair et al. 2000), “Evaluation of vegetation in urban space. Barcelona base model and propose to Dominican Republic” (Rojas-Cortorreal, Roset, Jaime, et al. 2016b).

Cabe destacar las conclusiones obtenidas por Mayer et al. (2009), respecto que el uso de árboles en el cañón urbano ayuda a reducir la temperatura radiante en 24.8°C, esto directamente bajo la sombra del árbol, debido a que hay una menor incidencia de la radiación solar. Por su parte Ali-Toudert y Mayer (2007) demostraron en su estudio como el uso correcto de los árboles contribuye a una disminución de hasta 22°C de PET<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> PET (Physiological Equivalent Temperature), (Temperatura Fisiológica Equivalente): Es equivalente a la temperatura del aire a la cual, en un lugar bajo techo típico, sin viento, ni radiación solar, el balance del cuerpo humano se mantiene con temperaturas interiores y cutáneas iguales a aquellas bajo las condiciones que son evaluadas.

### 1.3 Metodología

La metodología utilizada se divide en las siguientes etapas:

1. Selección de áreas de estudio en la ciudad de Barcelona. Se seleccionaron calles que presentan un alto tránsito de personas, así como una morfología semejante entre ellas.
2. Levantamiento de las especies arbóreas presentes en las calles. Se consideró el tipo de especie arbórea, altura, forma, la separación entre ellas y entre los edificios adyacentes.
3. Elaboración de modelos tridimensionales (elaborados en AutoCAD y SketchUp) para llevar a cabo las simulaciones mediante el software Heliodon2<sup>7</sup> para el análisis de la morfología de los cañones urbanos en cuestión. Las simulaciones se realizaron los días 21 de junio y 21 de diciembre de 2015 para obtener una comparativa entre el verano con la mayor altura solar posible y el invierno con la menor altura solar.
4. Elección de puntos de medición “in situ” en las zonas de mayor tránsito peatonal, para comparar resultados con simulaciones y obtener resultados de mayor fiabilidad.
5. Se realizaron simulaciones los días mencionados, con la vegetación urbana existente, y sin vegetación, obteniendo los porcentajes de reducción aportados por la misma.
6. Se analizaron y compararon los resultados obtenidos a través de cada simulación y se han presentado por medio de gráficos y tablas.

## 2. Barcelona

### 2.1 Características de la ciudad

La ciudad de Barcelona (latitud 41°23'N, 2°11'E), localizada en la comunidad autónoma de Cataluña, es la segunda mayor ciudad de España, con una población (Instituto Nacional de Estadística, 2015) de 1, 604, 555 habitantes sobre una superficie de 100 km<sup>2</sup> (densidad de 16, 045 hab./km<sup>2</sup>), es decir, cuenta con una gran cantidad de personas que circula diariamente por sus calles, por lo tanto es importante mencionar algunas características con las que cuenta la ciudad.

Barcelona posee un clima mediterráneo, con veranos secos y cálidos con temperaturas medias por arriba de los 22°C e inviernos húmedos y lluviosos, con temperaturas suaves; a su vez presenta los mayores niveles de radiación solar en el mes de junio. Por ello las mediciones “in situ” fueron realizadas este mes en días con condiciones muy propicias para la toma de datos relacionados con la radiación solar.

---

<sup>7</sup> Heliodon2, Software desarrollado por Benoit Beckers y Lucas Masset desde 2003.

Tabla 1. Características de la ciudad de Barcelona, España

Barcelona					
Cataluña, España					
Latitud 41°23'N 2°11'E			Población: 1 604 555 hab.		
Condiciones climáticas					
Tipo	Temperatura media máxima	Temperatura media	Temperatura media mínima	Precipitación media	Humedad relativa
Clima mediterráneo	20.3°C	16.1°C	11.8°C	588 mm	69%
Radiación solar <sup>1</sup>					
Radiación global media			Radiación difusa media		
Junio	6.67 kWh/m <sup>2</sup>		Junio	2.32 kWh/m <sup>2</sup>	
Diciembre	1.68 kWh/m <sup>2</sup>		Diciembre	0.76 kWh/m <sup>2</sup>	
Radiación solar (Heliodon2) <sup>2</sup>					
Junio (media)	7.10 kWh/m <sup>2</sup>		Diciembre (media)	1.18 kWh/m <sup>2</sup>	

<sup>1</sup> Promedio de la radiación solar recibida sobre una superficie horizontal.

<sup>2</sup> La radiación solar obtenida por medio del software Heliodon2 es directa y considerando un cielo siempre despejado.

Fuente: Elaboración propia. Datos climatológicos: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2015), datos radiación solar: *Atlas de radiación solar a Catalunya* (Instituto Catalán de Energía, 2000) y mediante simulaciones en Heliodon2.

## 2.2 Ubicación de los casos de estudio en Barcelona

Las áreas que se tomaron en consideración para la elaboración de este estudio se encuentran en el Ensanche de Barcelona, tomando como ámbito principal de estudio la sección de la Avenida Diagonal que lo atraviesa (zona A1 y A2), siendo una de las principales vías de comunicación de la ciudad. Ésta cuenta con una sección que se mantiene constante a lo largo de su recorrido, lo cual permite realizar una comparativa de manera más sencilla en el comportamiento de la relación entre la radiación directa, morfología y vegetación. Estas áreas de estudio se encuentran al límite del Ensanche con otros barrios con un trazado de calle más irregular, que contrasta con la regularidad del Ensanche.

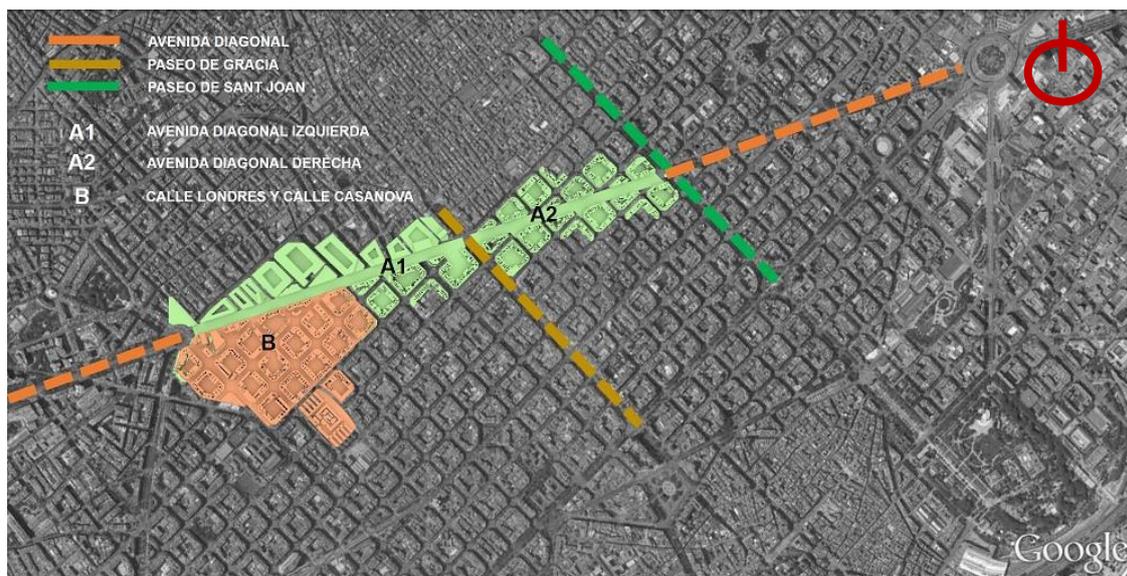
Se ha seleccionado el Ensanche como área de estudio debido a la importancia histórica y actual que representa para la ciudad, ya que éste fue concebido como el modelo para crecimiento y urbanización que la ciudad de Barcelona debía de seguir, esto fue propuesto por Ildefonso Cerdà en 1859 y aceptado el 31 de mayo de 1860. El plan del Ensanche se basaba en tres conceptos mediante los cuales buscaba dar solución a los problemas que aquejaban a la sociedad barcelonesa que seguía habitando la ciudad amurallada, el primero de ellos la higiene: Cerdà escribió "Monografía estadística de la clase obrera" para acompañar su propuesta preliminar, en él estudiaba a gran detalle las condiciones de vida en la ciudad amurallada, para su elaboración se basó en los estudios estadísticos "Estadística de Barcelona" (Figuerola, 1849) y el "Diccionario geográfico-histórico-estadístico de España y sus posesiones de ultramar" (Madoz, 1845). El reporte estadístico mostraba una tasa de mortalidad extremadamente alta: la expectativa de vida entre 1837 y 1847 era de 38.3 años para la clase rica y 19.7 años para la clase obrera, éstas eran, entonces, condiciones realmente dramáticas que Cerdà analizó casa por casa y familia por familia. Además, el proyecto preliminar contaba

con un minucioso análisis geográfico de la posición y localización de la ciudad, así como su climatología y condiciones de luz solar, en pocas palabras, un análisis urbano muy completo. (Busquets, 2006)

El segundo concepto al que había de dar solución, era la circulación. Cerdà se había familiarizado con el uso de la locomotora de vapor desde su implementación en Barcelona y las condiciones que se requerían para su correcto funcionamiento, el profundo impacto que tuvo en él, hizo que pensara en como la ciudad debería de estar preparada para el uso de este instrumento mecánico de movilidad, su propuesta para Barcelona quedó definida por una bien establecida jerarquización de las calles, basada en dos principios que aún se aplican: el primero, los espacios en la sección de la calle destinados a las “máquinas de vapor”, ahora vehículos motorizados, y a los peatones, son igual de importantes, ambas dentro de secciones de 20 metros de ancho, el segundo, todas los cruces de las calles es en un área que “carece de esquinas” esto, debido al uso de chaflanes de 20 metros, uno en cada manzana del Ensanche, para facilitar su cruce y proporcionar una mayor visibilidad.(Busquets, 2006)

El tercer concepto que abordaba el plan Cerdà, era el introducir la idea de una ciudad que se tenía que extender a través del llano de Barcelona: la construcción y la futura ciudad, siendo, de alguna manera, una completa reconfiguración de Barcelona. Esta idea de una ciudad funcional e higiénica era de acuerdo a Cerdà para producir condiciones de igualdad entre todos los residentes de la misma. Como resultado, el plan era cubrir el territorio entero, incluyendo todas las formas de asentamiento existentes en esta nueva retícula homogénea.(Busquets, 2006)

Figura 1. Mapa de ubicación de los ámbitos de estudio en Barcelona



Fuente: Elaboración propia.

El sistema viario donde se asienta la trama urbana. Está constituido por la síntesis de dos sistemas distintos, uno radial y otro cuadrangular. El sistema viario radial está girado 45° respecto al reticular y consta de dos vías que en su prolongación se cruzarían formando un ángulo de 90° (Paralelo y Meridiana), por último una tercera vía oblicua, la Diagonal, con un sentido ambivalente ya que por un lado apoya la salida de Paralelo y se cruza con la Meridiana y por el otro contribuye a agilizar las comunicaciones internas de la ciudad e interconectar los pueblos del llano: Sarrià, Les Corts, Gràcia, Clot y Poble Nou. Se trata; junto con el eje longitudinal de la Gran Vía, de las vías trascendentales. El sistema viario reticular será el utilizado para articular las comunicaciones internas de la ciudad y se forma a instancias de dos ejes generadores-ordenadores del conjunto: NO-SE (Paseo de Sant Joan) y SO-NE (Gran Vía). (Padrés y Vela, 1976)

### 3. Desarrollo del caso de Avenida Diagonal

La Avenida Diagonal, es una de las avenidas más importantes y de mayor tamaño de la ciudad de Barcelona, tiene una sección continua de 50 metros de ancho y alrededor de 10.5 km de largo, se extiende desde el barrio de Sant Martí a un costado de Ronda Litoral y cruza la ciudad de manera diagonal, es decir, presenta una orientación OSO-ENE.

La Avenida Diagonal va modificando su morfología urbana a lo largo de su trayecto, comienza en la Plaza de Llevant como un bulevar que cuenta al centro con un paseo ajardinado y dos vías para tranvía, dos calzadas laterales para vehículos y dos aceras laterales para peatones, esta configuración cambia en la calle de Josep Pla, la calzada central se convierte en un paseo peatonal, las vías del tranvía circulan a los lados de la calzada central, cuenta con dos calzadas laterales para vehículos y dos aceras para uso peatonal, su composición cambia al pasar de la Plaza de Les Glòries Catalanes, pierde las vías del tranvía, pero es al llegar a la calle d'Aragó, que su configuración se compone por una calzada central y dos laterales para el paso de vehículos, así como dos paseos peatonales entre estas circulaciones, además cuenta con dos aceras laterales para el uso peatonal; esta configuración se mantiene hasta Paseo de Gràcia, a partir de ahí y hasta la Plaza Francesc Macià presenta la misma configuración, solo que los paseos peatonales dejan de serlo convirtiéndose en áreas ajardinadas; el tramo final, a partir de esta plaza, la configuración de la avenida vuelve a modificarse un poco, sigue contando con una calzada central y dos laterales para el paso vehicular, dos paseos entre estas circulaciones, uno dedicado a peatones y otro al tranvía, así como dos aceras.

Figura 2. Sección izquierda y sección derecha de la Av. Diagonal

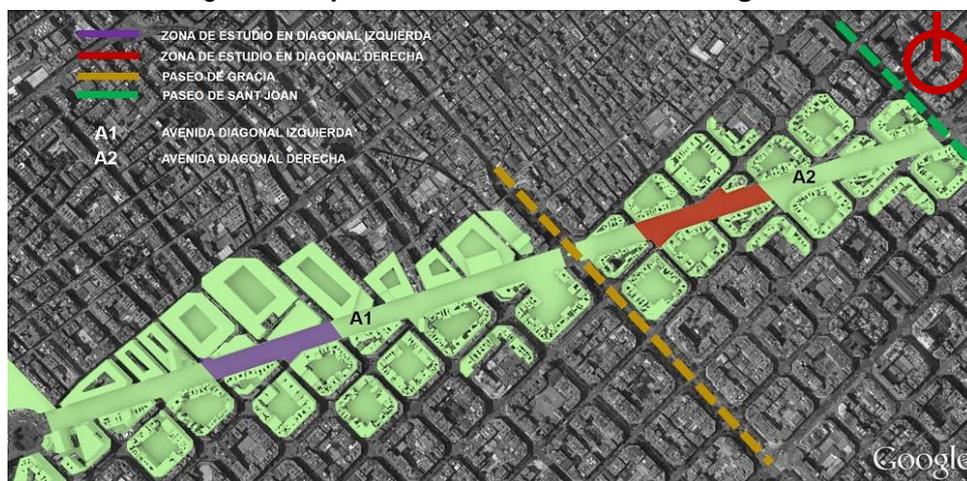


Fuente: Elaboración propia.

Al ser una avenida tan cambiante, este estudio se enfoca en la sección comprendida entre la Plaza Francesc Macià y Paseo de Sant Joan, a su vez, esta sección será dividida en dos, en Avenida Diagonal Derecha y Avenida Diagonal Izquierda (divididas por Paseo de Gràcia), la razón de esta división es que si bien, forman parte de la misma avenida, estas presentan diferente vegetación urbana, lo cual es uno de los motivos para la elaboración de este estudio. Para una mayor comprensión en el tema, en éste estudio solo se explicará el caso A (figura 1).

### 3.1 Análisis morfológico Avenida Diagonal secciones izquierda y derecha

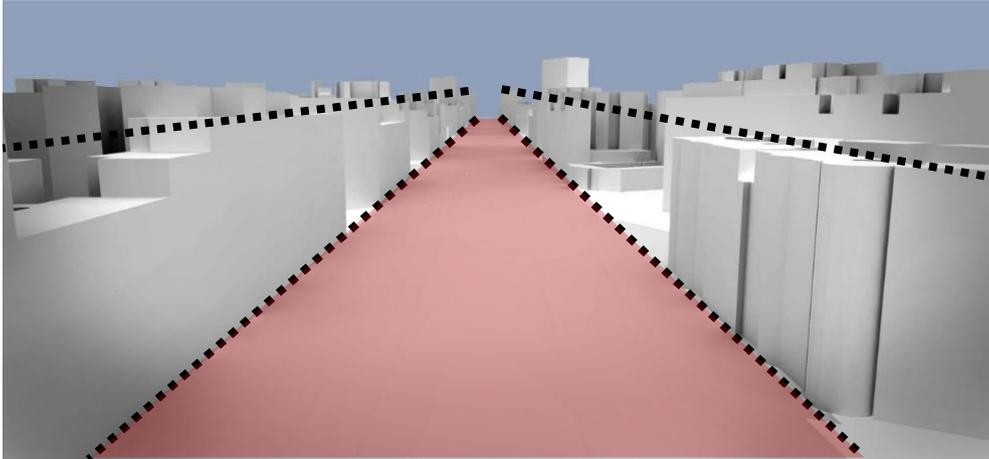
Figura 3. Mapa de secciones de Avenida Diagonal.



Fuente: Elaboración propia.

Para poder elaborar un estudio del cañón urbano de la Avenida Diagonal, se ha procedido a considerar un modelo teórico, en el cual, se sacará una media en lo que respecta a las alturas de los edificios adyacentes del cañón, esto con el fin de facilitar los cálculos y dar una mayor homogeneidad en el proceso.

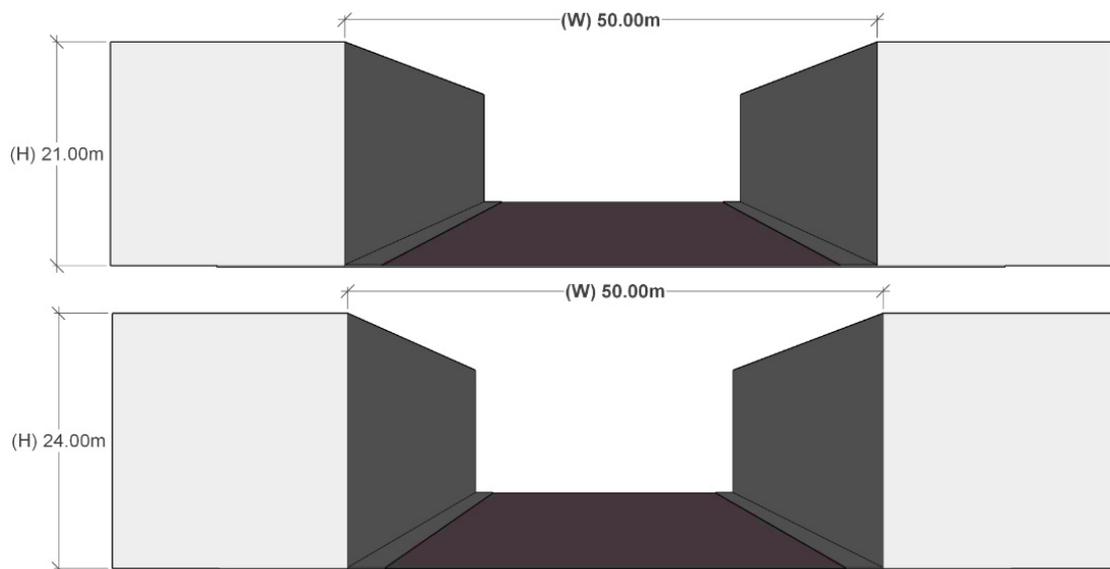
Figura 4. Esquema cañón urbano teórico, Avenida Diagonal



Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a la relación de aspecto ( $H/W$ ) del cañón urbano que se forma, el plano horizontal ( $W$ ) se mantiene constante en 50 metros de ancho, mientras que la altura media en los planos verticales ( $H$ ) es de 21.00 m. para la sección derecha y de 24.00 m. para la sección izquierda, lo cual genera que haya una relación de aspecto de  $H/W= 0.42$  (*derecha*) y  $H/W= 0.48$  (*izquierda*), como se puede ver, presentan una relación de aspecto muy similar, por lo que la vegetación urbana debe de jugar un papel importante para que la cantidad de radiación incidente sobre el plano horizontal sea diferente de manera notoria entre ambos casos.

Figura 5. Esquemas de relación de aspecto, Avenida Diagonal



Fuente: Elaboración propia, (arriba) esquema de relación de aspecto Diagonal derecha, (abajo) Diagonal izquierda.

### 3.2 Análisis de vegetación urbana presente

La Avenida Diagonal del distrito del Eixample es una de las calles principales de la ciudad y de mayor atractivo por la gran diversidad de estilos arquitectónicos y usos urbanos. Por este motivo, ha sido una de las calles mayormente condicionadas para el tránsito urbano peatonal, carril bici y vehicular. Las especies arbóreas predominantes en esta avenida principal son: *Platanus x hispanica*, *Phoenix canariensis*, *Washingtonia robusta*, *Celtis Australis*, *Quercus Ilex* y *Celtis siliquastrum*.

Cada una de estas especies arbóreas, se caracterizan por su variedad de morfología tanto a nivel estructural como vegetal, logrando con esto una versatilidad de paletas de colores en las calles de la ciudad, brindando a los espacios urbanos un toque de estilo y belleza. Cada una de ellas logra un nivel de protección distinto de las condiciones ambientales a micro escala. A través de las simulaciones y mediciones in situ, obtendremos una evaluación del comportamiento de la radiación solar incidente frente a una gran variedad de especies arbóreas, permitiendo conocer cuales tipologías de combinaciones de especies son más adecuadas para el uso urbano en calles y avenidas. Para este estudio se evaluaron la tipología de ramaje y el tipo de sombra proyectada por cada especie arbórea. En la tabla 2 presentamos los resultados obtenidos de esta evaluación. (Rojas-Cortorreal, Roset y Navés, 2015) (Rojas-Cortorreal, Roset, Jaume, et al. 2016a)

Tabla 2. Especies arbóreas existentes en sitio.

Vegetación urbana existente Avenida Diagonal							
Barcelona							
Avenida Diagonal (izquierda)				Avenida Diagonal (derecha)			
Especie	Nombre común	Ramaje	Sombra	Especie	Nombre común	Ramaje	Sombra
<i>Platanus x hispanica</i>	Plátano de sombra	Expandido	Densa/grande	<i>Celtis Australis</i>	Almez	Expandido	Densa
<i>Phoenix canariensis</i>	Palmera canaria	Palmiforme	Media/grande	<i>Platanus x hispanica</i>	Plátano de sombra	Expandido	Densa/grande
<i>Washingtonia robusta</i>	Palma de abanico mexicana	Palmiforme	Media/grande	<i>Quercus Ilex</i>	Encina	Tortuoso	Densa/grande
				<i>Celtis siliquastrum</i>	Árbol del amor	Expandido	Media/medio

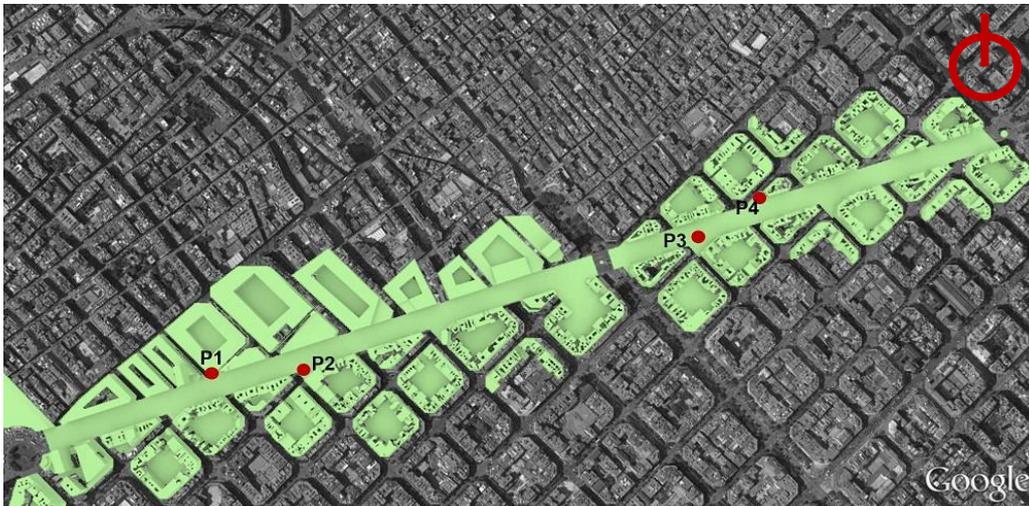
Elaboración propia. Información del libro *Arquitectura del paisaje natural*, 2005. (Navés, 2004)

### 3.3 Selección de puntos para mediciones “in situ”

Se seleccionaron cuatro (4) puntos para mediciones “in situ”, para de esta forma tener un mayor margen de evaluación de las áreas de tránsito peatonal y carril bici, ubicados en cada escenario seleccionado, los datos obtenidos en campo se utilizarán para comprobar con los obtenidos por medio de las simulaciones hechas en el software Heliodon2 (Beckers y Masset, 2006)(Beckers, 2009b). El criterio para la elección de estos días para la toma de mediciones, es que en estos días se presentan temperaturas muy elevadas, a su vez se registran altos niveles de radiación solar debido a la cercanía con el 21 de junio (solsticio de verano), en

cuanto a las condiciones atmosféricas que se presentaron estos días eran las adecuadas para este tipo de mediciones, es decir, días con cielo abierto.

Figura 6. Ubicación de los puntos para mediciones “in situ”



Fuente: Elaboración propia.

El uso de Heliodon2 se debe a que es un software de simulaciones para el estudio de la radiación solar directa, que ha sido desarrollado por Benoit Beckers, profesor miembro del equipo de investigadores del programa de doctorado de Arquitectura, Energía y Medio Ambiente, de la ETSAB, en la Universidad Politécnica de Cataluña, y su uso da resultados muy claros y exactos, fáciles de cuantificar.

Tabla 3. Comparativa de mediciones “in situ” y simulaciones en Heliodon2

Radiación solar recibida (kWh/m <sup>2</sup> )					
Avenida Diagonal, Barcelona.					
Mediciones "in situ"			Mediciones Heliodon2		
Punto	kWh/m <sup>2</sup>	Fecha y hora	Punto	kWh/m <sup>2</sup>	Fecha y hora
P1	0.41 kWh/m <sup>2</sup>	25/06 a las 9:00	P1	0.52 kWh/m <sup>2</sup>	25/06 a las 9:00
P2	0.41 kWh/m <sup>2</sup>	25/06 a las 9:00	P2	0.52 kWh/m <sup>2</sup>	25/06 a las 9:00
P3	0.60 kWh/m <sup>2</sup>	23/06 a las 13:00	P3	0.82 kWh/m <sup>2</sup>	23/06 a las 13:00
P4	0.82 kWh/m <sup>2</sup>	23/06 a las 13:00	P4	0.84 kWh/m <sup>2</sup>	23/06 a las 13:00

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla 3, la cantidad de radiación que se indica en Heliodon2 es mayor a la que se obtiene al medir en campo, esto se debe a que Heliodon2 considera un cielo completamente despejado, por lo que las medidas en este software siempre serán cantidades mayores, si bien, se puede apreciar que las medidas fueron tomadas correctamente ya que los valores que proporciona Heliodon2 no están muy alejados de los obtenidos “in situ”; lo mismo

se puede decir a los valores proporcionados por medio de las simulaciones, son correctos porque no se alejan de los valores de las mediciones.

#### 4. Simulaciones y resultados caso Avenida Diagonal

Se llevaron a cabo las simulaciones de la manera que fue explicada en la metodología antes expuesta, es decir, la primera simulación se llevó a cabo considerando solamente la morfología y la orientación de las calles, en la segunda simulación se consideraron estos mismos aspectos, sumando el factor de la vegetación existente. Cabe mencionar que el mismo modelo ha sido utilizado para ambos casos (21 de junio y 21 de diciembre), lo que significa que en la simulación de diciembre las aceras y calles estarán recibiendo un poco menos radiación de la que se recibe en realidad, ya que en la mayoría de los casos, son arboles caducifolios, es decir, pierden sus hojas durante el otoño e invierno.

##### 4.1 Avenida Diagonal derecha

La sección derecha al igual que la sección izquierda, presenta una orientación OSO-ENE, tiene una relación de aspecto (H/W) de 0.42, la cual entra en una zona de compatibilidad que según Oke (1988), es donde se pueden satisfacer los distintos objetivos básicos que se persiguen al diseñar las calles en ciudades de latitud media, situando la zona entre  $0.40 < H/W < 0.60$ ; para la elaboración del cálculo del SVF se ha situado un punto sobre la superficie horizontal del cañón urbano, este punto ha sido colocado a la mitad entre los planos verticales del cañón, el resultado obtenido es un SVF<sup>8</sup> de 69.3%.

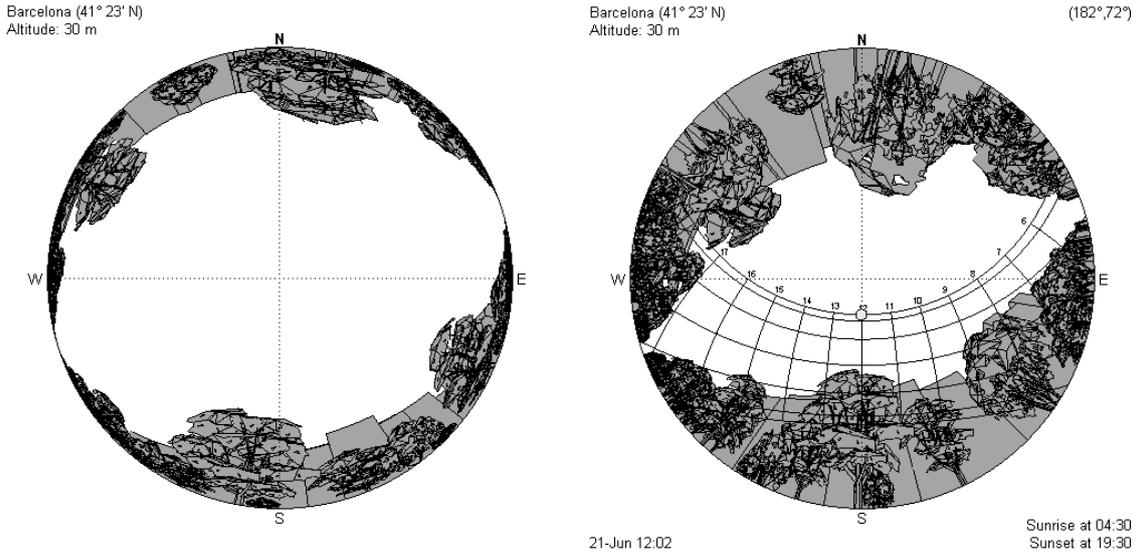
Figura 7. Ubicación del punto para cálculo del SVF



Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2.

<sup>8</sup> SVF calculado por medio del software Heliodon2, se tomó en consideración la vegetación existente.

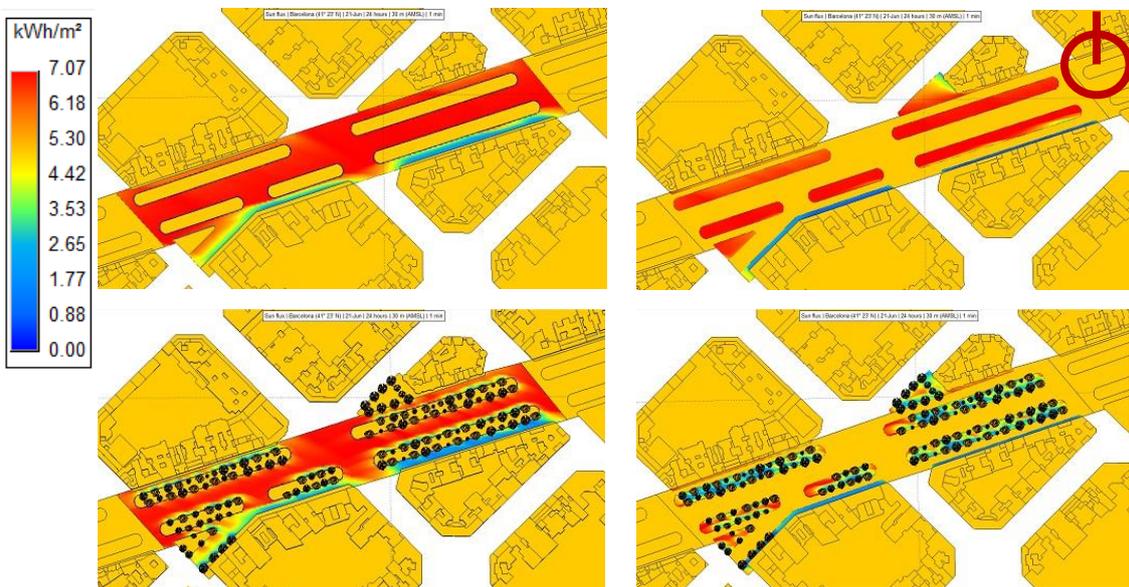
Figura 8. Diagramas de SVF y estereográfico



Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2. A la izquierda la representación gráfica del SVF en el punto señalado en la figura 6, donde se pueden apreciar las obstrucciones del cielo, a la derecha el diagrama estereográfico del mismo punto, donde se ven las sombras proyectadas sobre este punto a lo largo del día y del año.

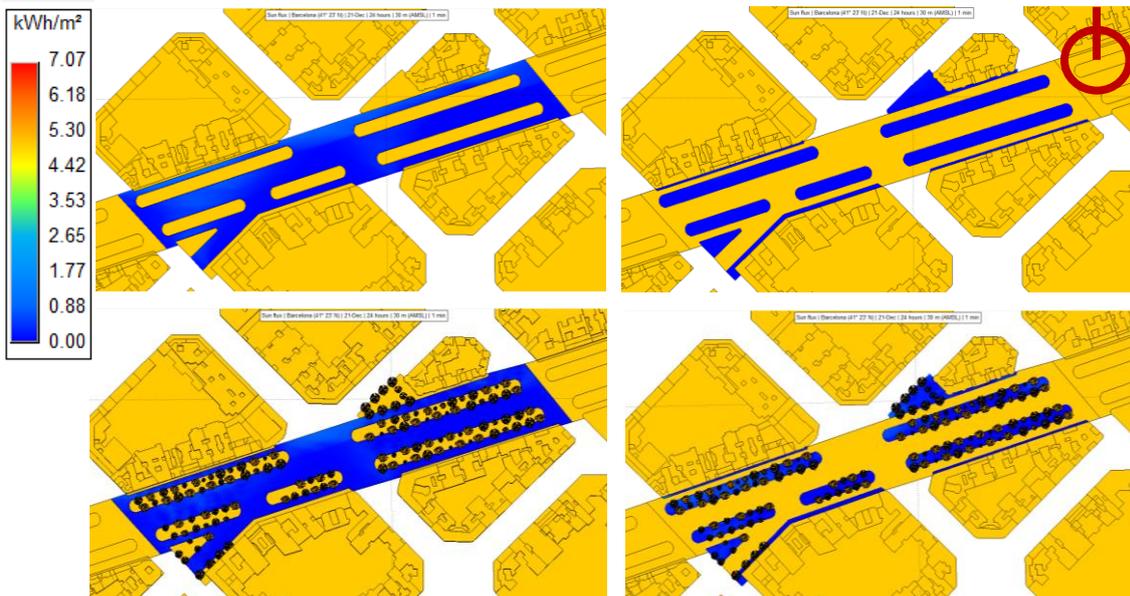
A continuación se llevaron a cabo las simulaciones sin vegetación y con vegetación existente, donde se muestra la cantidad de energía que incide sobre el plano horizontal del cañón a lo largo del día (24 horas).

Figura 9. Simulaciones 21 de junio



Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2. Arriba se muestra la simulación de la radiación incidente en la sección derecha de la Avenida Diagonal sin vegetación, abajo se muestra la misma sección con la vegetación existente.

Figura 10. Simulaciones 21 de diciembre.

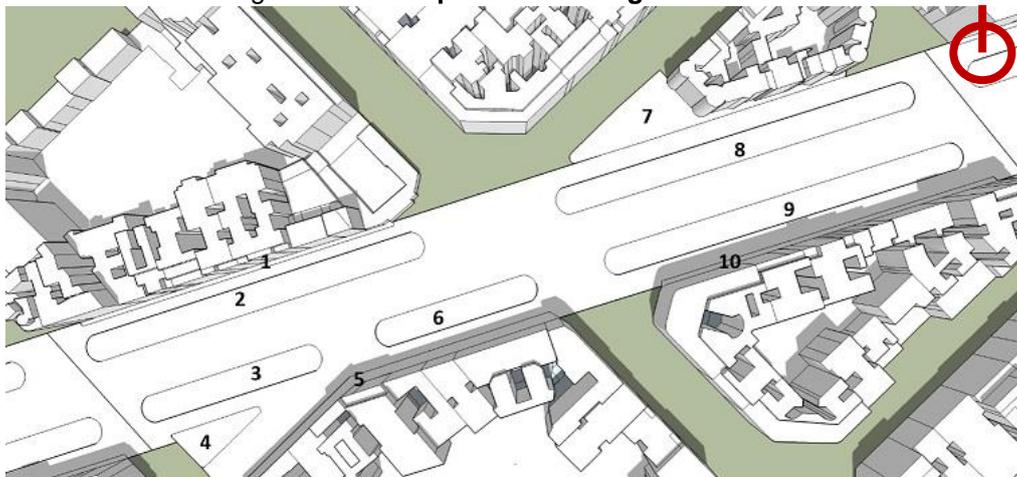


Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2. Arriba se muestra la simulación sin vegetación, abajo se muestra la simulación con la vegetación existente.

A simple vista y comparando las dos situaciones, se observa como la vegetación reduce la cantidad de energía que llega a la superficie en el área de tránsito vehicular, pero esta diferencia es aún mayor en las áreas peatonales.

En base a estas simulaciones se pueden elaborar gráficos donde se demuestra la influencia de la vegetación sobre la cantidad de energía recibida en la superficie, a continuación se muestra un gráfico donde se puede ver el comportamiento de la radiación solar el día 21 de junio (se muestra la de este día ya que es cuando se presentan altos niveles de radiación, así como temperaturas altas).

Figura 11. Áreas peatonales Diagonal derecha



Fuente: Elaboración propia. Numeración de aceras para estudio.

Tabla 4. Datos de radiación por hora, obtenidos en simulación

Aceras Diagonal derecha (21 de Junio)						
Radiación recibida (kWh/m <sup>2</sup> )						
Hora medición	08-09 horas		12-13 horas		16-17 horas	
Orientación	Con vegetación	Sin vegetación	Con vegetación	Sin vegetación	Con vegetación	Sin vegetación
Acera 1 (SSE)	0.50	0.56	0.89	0.89	0.00	0.00
Acera 2 (SSE)	0.24	0.56	0.49	0.89	0.05	0.10
Acera 3 (NNO)	0.37	0.55	0.67	0.89	0.22	0.37
Acera 4 (NNO)	0.40	0.51	0.69	0.89	0.29	0.36
Acera 5 (NNO)	0.01	0.01	0.14	0.19	0.31	0.33
Acera 6 (NNO)	0.31	0.54	0.58	0.89	0.26	0.37
Acera 7 (SSE)	0.27	0.41	0.65	0.89	0.07	0.11
Acera 8 (SSE)	0.25	0.56	0.51	0.89	0.19	0.34
Acera 9 (NNO)	0.23	0.47	0.52	0.89	0.17	0.37
Acera 10 (NNO)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.28	0.37

Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2.

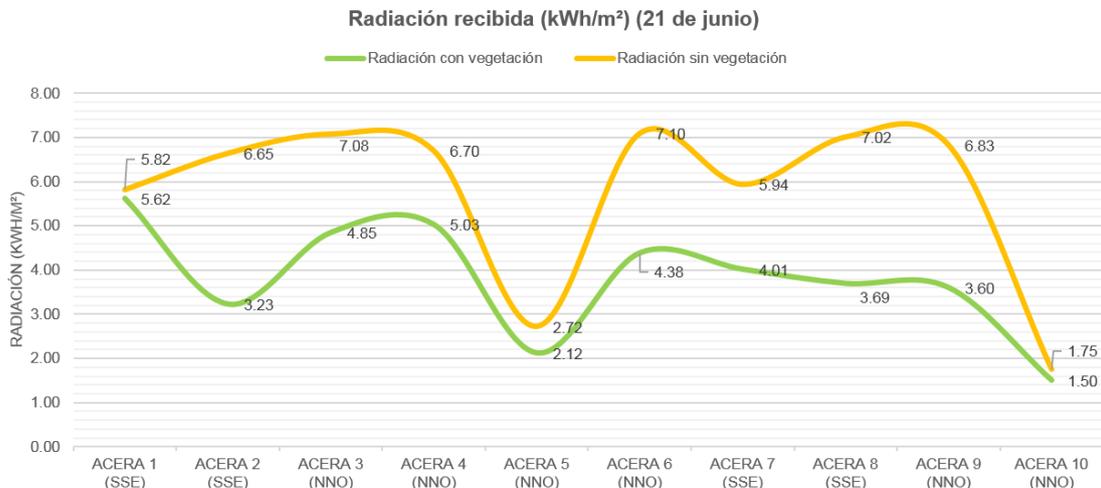
Tabla 5. Datos de radiación por día, obtenidos en simulación

Aceras Diagonal derecha (21 de Junio)				
Radiación recibida (kWh/m <sup>2</sup> )				
Orientación	Con vegetación	Sin vegetación	Diferencia	Reducción %
Acera 1 (SSE)	5.62 kWh/m <sup>2</sup>	5.82 kWh/m <sup>2</sup>	0.20 kWh/m <sup>2</sup>	3.50%
Acera 2 (SSE)	3.23 kWh/m <sup>2</sup>	6.65 kWh/m <sup>2</sup>	3.42 kWh/m <sup>2</sup>	51.47%
Acera 3 (NNO)	4.85 kWh/m <sup>2</sup>	7.08 kWh/m <sup>2</sup>	2.24 kWh/m <sup>2</sup>	31.58%
Acera 4 (NNO)	5.03 kWh/m <sup>2</sup>	6.70 kWh/m <sup>2</sup>	1.68 kWh/m <sup>2</sup>	25.00%
Acera 5 (NNO)	2.12 kWh/m <sup>2</sup>	2.72 kWh/m <sup>2</sup>	0.60 kWh/m <sup>2</sup>	22.09%
Acera 6 (NNO)	4.38 kWh/m <sup>2</sup>	7.10 kWh/m <sup>2</sup>	2.71 kWh/m <sup>2</sup>	38.24%
Acera 7 (SSE)	4.01 kWh/m <sup>2</sup>	5.94 kWh/m <sup>2</sup>	1.93 kWh/m <sup>2</sup>	32.43%
Acera 8 (SSE)	3.69 kWh/m <sup>2</sup>	7.02 kWh/m <sup>2</sup>	3.32 kWh/m <sup>2</sup>	47.37%
Acera 9 (NNO)	3.60 kWh/m <sup>2</sup>	6.83 kWh/m <sup>2</sup>	3.23 kWh/m <sup>2</sup>	47.30%
Acera 10 (NNO)	1.50 kWh/m <sup>2</sup>	1.75 kWh/m <sup>2</sup>	0.25 kWh/m <sup>2</sup>	14.03%

Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2.

Como se observa en la gráfica 1 (a continuación) y en las tablas 4 y 5 la presencia o no de vegetación urbana en la calle puede llegar a significar una diferencia muy importante, alcanzando porcentajes de reducción a lo largo del día de hasta un 51% (acera 2), esto es, hablando de las aceras, en lo que respecta al espacio vehicular, sin vegetación presente recibe 6.04 kWh/m<sup>2</sup> mientras que con vegetación su valor es de 5.38 kWh/m<sup>2</sup> lo que significa un porcentaje de reducción del 11% durante el transcurso del día.

Gráfica 1. Comportamiento de la radiación en 21 de junio, Diagonal derecha

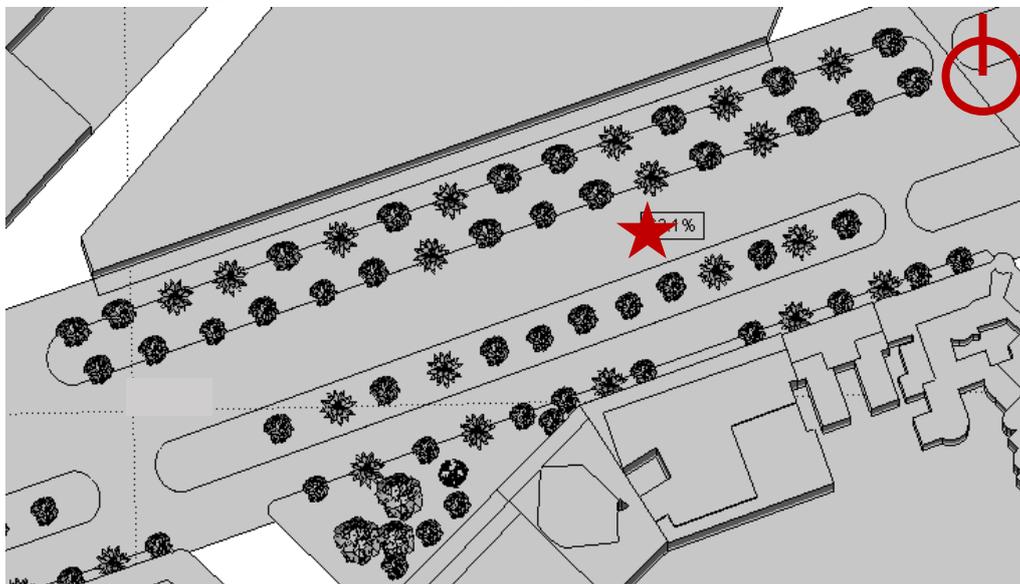


Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2 Avenida Diagonal izquierda

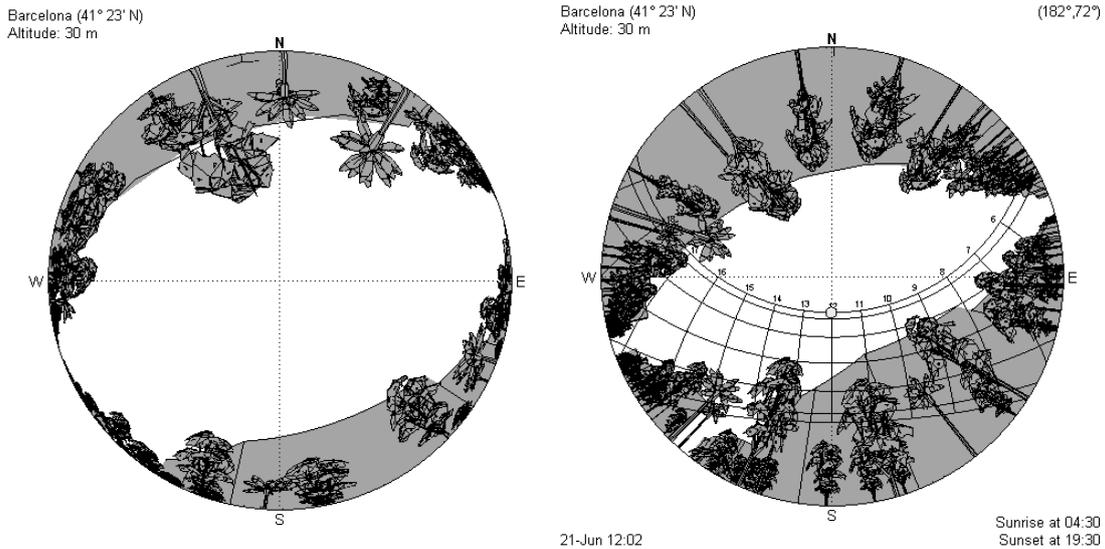
La sección izquierda, presenta una orientación OSO-ENE, tiene una relación de aspecto (H/W) de 0.48, para la obtención del SVF se ha realizado el mismo procedimiento que en la sección derecha, el resultado obtenido es un SVF de 62.1%.

Figura 12. Ubicación del punto para cálculo del SVF



Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2.

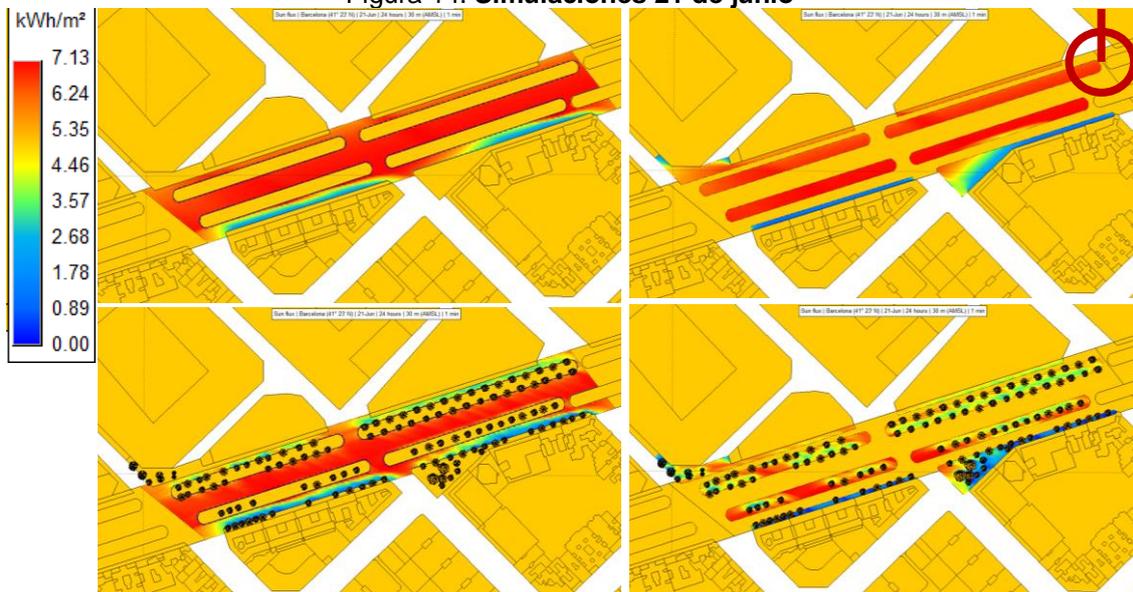
Figura 13. Diagramas de SVF y estereográfico



Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2. A la izquierda la representación gráfica del SVF en el punto señalado en la figura 11, donde se pueden apreciar las obstrucciones del cielo, a la derecha el diagrama estereográfico del mismo punto, donde se ven las sombras proyectadas sobre este punto a lo largo del día y del año.

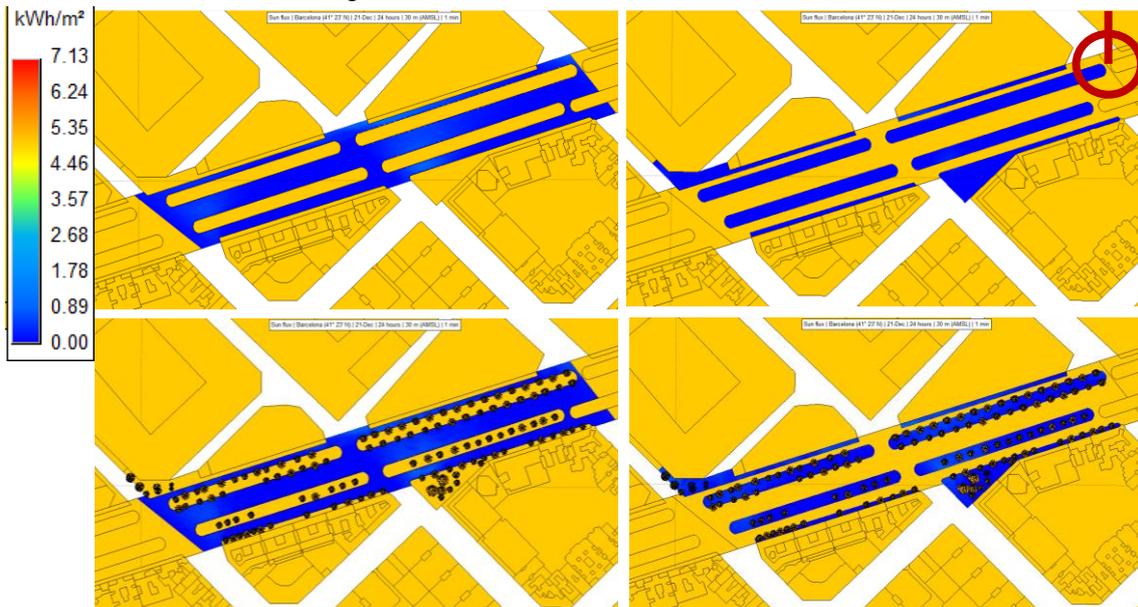
A continuación se sigue el mismo procedimiento realizado en la sección derecha, es decir, la elaboración de simulaciones sin vegetación y con vegetación existente.

Figura 14. Simulaciones 21 de junio



Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2. Arriba se muestra la simulación de la radiación incidente en la sección izquierda de la Avenida Diagonal sin vegetación, abajo se muestra la misma sección con la vegetación existente.

Figura 15. Simulaciones 21 de diciembre



Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2. Arriba se muestra la simulación sin vegetación, abajo se muestra la simulación con la vegetación existente.

Al igual que en la sección derecha es que, a simple vista y comparando las dos situaciones, se observa como la vegetación reduce la cantidad de energía que llega a la superficie en el área de tránsito vehicular, pero esta diferencia es aún mayor en las áreas peatonales.

Figura 16. Áreas peatonales Diagonal izquierda



Fuente: Elaboración propia. Numeración de aceras para estudio.

Tabla 6. Datos de radiación por hora, obtenidos en simulación

Aceras Diagonal izquierda (21 de Junio)						
Radiación recibida (kWh/m <sup>2</sup> )						
Hora medición	08-09 horas		12-13 horas		16-17 horas	
Orientación	Con vegetación	Sin vegetación	Con vegetación	Sin vegetación	Con vegetación	Sin vegetación
Acera 1 (SSE)	0.39	0.50	0.77	0.89	0.00	0.00
Acera 2 (SSE)	0.42	0.56	0.70	0.89	0.06	0.09
Acera 3 (NNO)	0.45	0.56	0.77	0.89	0.30	0.33
Acera 4 (NNO)	0.01	0.01	0.11	0.01	0.29	0.36
Acera 5 (SSE)	0.28	0.56	0.79	0.89	0.00	0.00
Acera 6 (SSE)	0.37	0.56	0.67	0.91	0.05	0.12
Acera 7 (NNO)	0.38	0.51	0.71	0.93	0.32	0.37
Acera 8 (NNO)	0.01	0.10	0.38	0.54	0.22	0.35

Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2.

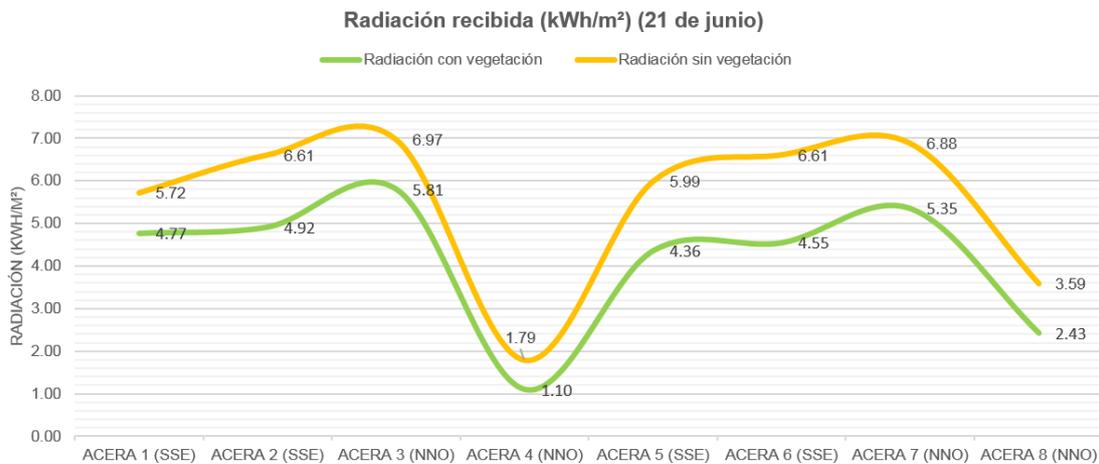
Tabla 7. Datos de radiación por día, obtenidos en simulación

Aceras Diagonal izquierda (21 de Junio)				
Radiación recibida (kWh/m <sup>2</sup> )				
Orientación	Con vegetación	Sin vegetación	Diferencia	Reducción %
Acera 1 (SSE)	4.77 kWh/m <sup>2</sup>	5.72 kWh/m <sup>2</sup>	0.95 kWh/m <sup>2</sup>	16.61%
Acera 2 (SSE)	4.92 kWh/m <sup>2</sup>	6.61 kWh/m <sup>2</sup>	1.69 kWh/m <sup>2</sup>	25.57%
Acera 3 (NNO)	5.81 kWh/m <sup>2</sup>	6.97 kWh/m <sup>2</sup>	1.16 kWh/m <sup>2</sup>	16.64%
Acera 4 (NNO)	1.10 kWh/m <sup>2</sup>	1.79 kWh/m <sup>2</sup>	0.69 kWh/m <sup>2</sup>	38.55%
Acera 5 (SSE)	4.36 kWh/m <sup>2</sup>	5.99 kWh/m <sup>2</sup>	1.63 kWh/m <sup>2</sup>	27.21%
Acera 6 (SSE)	4.55 kWh/m <sup>2</sup>	6.61 kWh/m <sup>2</sup>	2.06 kWh/m <sup>2</sup>	31.16%
Acera 7 (NNO)	5.35 kWh/m <sup>2</sup>	6.88 kWh/m <sup>2</sup>	1.53 kWh/m <sup>2</sup>	22.24%
Acera 8 (NNO)	2.43 kWh/m <sup>2</sup>	3.59 kWh/m <sup>2</sup>	1.16 kWh/m <sup>2</sup>	32.31%

Fuente: Elaboración propia. Software Heliodon2.

Al comparar la tabla 5 con la tabla 7, se observa que sin vegetación es la sección izquierda la que recibe menor cantidad de radiación, esto es debido a que tiene una relación de aspecto mayor (0.48 > 0.42) y un SVF menor (62.1% < 69.3%).

Gráfica 2. Comportamiento de la radiación en 21 de junio, Diagonal izquierda



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la gráfica 2 y en la tabla 7 la presencia o no de vegetación urbana en la calle puede llegar a significar una diferencia muy importante, alcanzando porcentajes de reducción de hasta un 38% (acera 4), esto es, hablando de las aceras, en lo que respecta al espacio vehicular, sin vegetación presente recibe 5.81 kWh/m<sup>2</sup> mientras que con vegetación su valor es de 5.27 kWh/m<sup>2</sup> lo que significa un porcentaje de reducción del 9%.

## 5. Conclusiones generales

El propósito principal de este análisis es entender cómo el comportamiento de la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal, las calles, es modificado de acuerdo a la morfología (relación de aspecto, SVF, orientación) y a la presencia o ausencia de la vegetación urbana, utilizada como barrera de protección.

Es claro que, una vez concluido el estudio, el factor que tiene mayor peso en cuanto a la incidencia o no de la radiación solar sobre la superficie horizontal del cañón urbano, es el de la morfología del mismo, es decir, el cañón urbano que cuenta con una relación de aspecto mayor (comparando las dos secciones de la Avenida Diagonal) tiende a recibir una menor cantidad de radiación solar directa y esta relación de aspecto va de la mano al SVF, mientras mayor sea la relación de aspecto menor será el SVF y como se ha concluido a mayores porcentajes de SVF mayor es la cantidad de radiación solar directa sobre el punto estudiado; esta situación puede ser solucionada por medio del correcto uso de la vegetación urbana, ya que como se observó en el análisis de la Avenida Diagonal la sección derecha termina por presentar porcentajes de reducción mayores (51% > 38%) a los que se obtienen en la sección izquierda, y no solo son mayores porcentajes, sino que en ciertos casos la cantidad de radiación solar directa sobre la

superficie es incluso menor que la que se presenta en la sección izquierda, aun cuando la sección izquierda tiene una mayor relación de aspecto y menor SVF.

¿Por qué se da esta diferencia entre dos secciones de una misma avenida? La respuesta está en el mismo estudio, las características de la vegetación utilizada hace la diferencia entre estas dos secciones, por el lado derecho tenemos arboles de un follaje denso, como el Almez, o de gran altura como el Plátano, que proporcionan sombras densas y grandes; mientras que en la sección izquierda encontramos en mayoría palmeras, las cuales no pueden competir con los árboles en lo que se refiere a proporcionar sombra y por lo tanto confort térmico.

Otro efecto que causa la presencia de vegetación similar en aceras contrarias en una misma calle, es que se logra reducir las diferencias en la cantidad de radiación que reciben, ocasionando que exista un mismo nivel de confort térmico, esto ocasionado por la protección que genera la barrera vegetal; lo cual se puede apreciar en la gráfica 1 de este análisis, donde la fluctuación de la energía recibida a través de la barrera de árboles produce una línea con cambios más suaves que la que se presenta sin arboles; algo que no es tan claro en la gráfica 2, donde se utiliza una vegetación que no funciona adecuadamente como barrera de protección.

Se concluye que utilizar la vegetación urbana como un sistema de protección contra la radiación solar es una excelente estrategia para lograr generar espacios públicos (en este caso aceras y calles) con un confort térmico que invite a las personas a habitarlos, ya que la ciudad es la gente en la calle, fue Julio Cortázar quien dijo: *¿Qué es un puente? Se preguntaba y se respondía: una persona atravesando el puente. ¿Qué es una ciudad? Un lugar con mucha gente.* Para una ciudad lo más importante deben de ser las calles y plazas, los espacios colectivos, y después los edificios. Por lo tanto la calidad de vida de una ciudad queda definida por el espacio público de esta.

Esta investigación deja una metodología de cómo se pueden elaborar estudios similares en diferentes ciudades sin importar la latitud en que se encuentre y el tipo de clima con que se cuente en el sitio, lo cual es útil tanto para arquitectos como para urbanistas encargados del diseño de una ciudad, tanto como para las ciudades ya establecidas como en futuras planeaciones urbanas. Para poder extender y ayudar a entender mejor el comportamiento de la vegetación en el ámbito urbano es recomendable el realizar más experimentos.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Dr. Arq. Helena Coch Roura, así como a los miembros del grupo de investigación de la UPC; *Arquitectura, energía y medio ambiente (AiEM)*

## Bibliografía

AEMET, 2015. *Valores climatológicos normales. Barcelona Aeropuerto*. En: AEMET. Agencia Estatal de Meteorología [en línea]. [Fecha de consulta: 18 agosto 2015]. Disponible en: <<http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=0076&k=cat>>

ALI-TOUDERT, F. & MAYER, H., 2007. *Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons*. En: Solar Energy [en línea], vol. 81, no. 6, pp. 742-754. ISSN 0038092X. [Fecha de consulta: 12 agosto 2015] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X06002623>>

ALICIA, M.; LUSETT, R. e IZAGUIRRE, M.G. *La influencia de la configuración de los cañones urbanos en el confort del peatón*. En: Revista Electrónica Nova Scientia [en línea]. 2013, vol. 6, no. 11, pp. 228-253. [Fecha de consulta: 12 agosto 2015] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203329578013>>

ARNFIELD, A.J. *Street design and urban canyon solar access*. En: Energy and Buildings [en línea]. 1990, vol. 14, no. 2, pp. 117-131. ISSN 03787788. DOI 10.1016/0378-7788(90)90031-D. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877889090031D>>

BÄRRING, L.; MATTSSON, J. & LINDQVIST, S., *Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden*. En: Journal of Climatology [en línea]. 1985, vol. 5, no. 4, pp. 433-444. ISSN 08998418. DOI 10.1002/joc.3370050410. [Fecha de consulta: 18 septiembre 2015] Disponible en: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3370050410/full>>

BECKERS, B. *Las escalas de la luz*. En: CPSV (ed.), 5º Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual [en línea]. 2009a. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, pp. 417-426. Disponible en: <<http://upcommons.upc.edu/handle/2099/11580>>

BECKERS, B. *Manual de Heliodon*. [en línea]. 2009b. [Consulta: 30 enero 2015]. Disponible en: <[http://heliodon.net/downloads/Heliodon2\\_User\\_Guide\\_2009\\_es\\_02\\_11.pdf](http://heliodon.net/downloads/Heliodon2_User_Guide_2009_es_02_11.pdf)>

BECKERS, B. y MASSET, L., 2006. *Heliodon 2* [en línea]. 2006. S.l.: s.n. 2.7-02. Disponible en: <<http://heliodon.net/heliodon/index.html>>

BRETZ, S.; AKBARI, H. & ROSENFELD, A. *Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands*. Atmospheric Environment [en línea]. 1998, vol. 32, no. 1, pp. 95-101. ISSN 13522310. [Fecha de consulta: 19 septiembre 2015] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231097001829>> DOI 10.1016/S1352-2310(97)00182-9.

BUSQUETS, J. *Barcelona, the urban evolution of a compact city*. S.l.: Applied Research + Design Publishing. ISBN 978-8884472045. 2006. 480 p.

CABRAS, E. *Efectos de la morfología de las calles en el fenómeno de la isla de calor urbana en la ciudad de Barcelona*. S.l.: Universidad Politecnica de Cataluña. 2014. 79 p.

CEDANO BILLINI, S.C. *Análisis de la radiación en calles de latitud 20°N: estudio del FVC, radiación y sombras en calles urbanas de distinta relación de aspecto (h/w) y orientación, en la latitud 20° N, a partir del análisis previo de radiación incidente en un cubo de 1m<sup>2</sup>, en diferentes latitudes*. Universidad Politécnica de Cataluña. 2014. 96 p. Disponible en: <<http://hdl.handle.net/2099.1/20479>>

COCH ROURA, H. y SERRA FLORENSA, R. *Arquitectura y energía natural*. 2000. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. ISBN 8476535058. 1995. 395 p.

ECHAVE MARTÍNEZ, C., *La reconciliación de la escala urbana*. En: *Idea Sostenible* [en línea] 2006. vol. 4, no. 15, pp. 1-9. ISSN 1887-2379. [Fecha de consulta: 10 agosto 2015] Disponible en: <<https://upcommons.upc.edu/handle/2099/2255>>

FIGUEROLA, L. *Estadística de Barcelona en 1849*. 1993. Madrid: Editorial Alta Fulla. ISBN 8479000392. 1849. 320 p.

HEISLER, G.M. *Effects of individual trees on the solar radiation climate of small buildings*. *Urban Ecology* [en línea]. 1986. vol. 9, no. 3-4, pp. 337-359. ISSN 03044009. DOI 10.1016/0304-4009(86)90008-2. [Fecha de consulta: 20 septiembre 2015] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304400986900082>>

INSTITUTO CATALÁN DE ENERGIÍA. *Atlas de Radiació Solar* [en línea]. 2000. Barcelona: Generalitat de Catalunya. [Fecha de consulta: 10 agosto 2015] Disponible en: <<http://icaen.gencat.cat/es/detalls/publicacio/Atlas-de-radiacio-solar-a-Catalunya-00003>>

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. *Cifras oficiales de población*. [en línea]. 2015. [Consulta: 13 junio 2015]. Disponible en: <<http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2911>>

KANTERS, J. & HORVAT, M. *Solar energy as a design parameter in urban planning*. *Energy Procedia* [en línea]. 2012, vol. 30, pp. 1143-1152. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2012.11.127. [Fecha de consulta: 14 agosto 2015] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212016438>>

LITTLEFAIR, P.J.; SANTAMOURIS, M.; ALVAREZ, S.; DUPAGNE, A.; HALL, D.; TELLER, J.; CORONEL, J. & PAPANIKOLAOU, N. *Environmental site layout planning: solar access, microclimate and passive cooling in urban areas*. Illustrate. London: Building Research Establishment. 2000. ISBN 1 86081 339 9. 151 p.

LÓPEZ-ORDÓÑEZ, C. y ROSET, J. *Análisis de la radiación en las calles de Barcelona y de Hermsillo, en base a su relación entre morfología, orientación y vegetación*. S.l.: Universidad Politécnica de Cataluña. 2015. 135 p.

MADOZ, P. *Diccionario geográfico-histórico-estadístico de España y sus posesiones de ultramar*. 1845. Madrid: s.n. ISBN 8497615727.

MAGNANO, N.A. *La radiación solar como indicador ambiental en plazas del barrio de Vila de Gracia, Barcelona*. S.l.: Universidad Politecnica de Cataluña. 2014.

MAYER, H.; KUPPE, S.; HOLST, J.; IMBERY, F. & MATZARAKIS, A. *Human thermal comfort below the canopy of street trees on a typical Central European summer day*. En: METEOROLOGICAL INSTITUTE y ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITY OF FREIBURG (eds.), 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology [en línea]. 2009. Freiburg: Meteorological Institute, Albert-Ludwigs-U, pp. 211-219. [Fecha de consulta: 20 agosto 2015] Disponible en: <[http://www.researchgate.net/publication/228503675\\_Human\\_thermal\\_comfort\\_below\\_the\\_canopy\\_of\\_street\\_trees\\_on\\_a\\_typical\\_Central\\_European\\_summer\\_day/file/d912f5072b20905674.pdf](http://www.researchgate.net/publication/228503675_Human_thermal_comfort_below_the_canopy_of_street_trees_on_a_typical_Central_European_summer_day/file/d912f5072b20905674.pdf)>

NAVÉS, F. et al. *Arquitectura del paisaje natural de la Península Ibérica*. Barcelona, Spain: Omega. ISBN 9788428212625. 2004. 502 p.

OCHOA DE LA TORRE, J.M. *La vegetación como instrumento para el control microclimático*. S.l.: Universidad Politécnica de Cataluña. 1999. Tesis doctoral. Disponible en: <<http://www.tesisenred.net/handle/10803/6124>>

OKE, T.R. *The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands*. *Atmosphere* [en línea]. 1976, vol. 14, no. 4, pp. 268-277. ISSN 20734433. DOI 10.1080/00046973.1976.9648422. [Fecha de consulta: 10 agosto 2015] Disponible en: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00046973.1976.9648422>>

OKE, T.R. *Boundary layer climates*. 1987. S.l.: Taylor & Francis Group. ISBN 9780415043199. 1978. 435 p.

OKE, T.R. *Street design and urban canopy layer climate*. En: *Energy and Buildings* [en línea]. 1988. vol. 11, no. 1-3, pp. 103-113. ISSN 03787788. DOI 10.1016/0378-7788(88)90026-6. [Fecha de consulta: 11 agosto 2015] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778888900266>>

PADRÉS, S. y VELA, S. *El modelo teórico del plan Cerdà*. En: *2c construcción de la ciudad* [en línea]. 1976, vol. 3, no. 6-7, pp. 46-55. Disponible en: <<http://upcommons.upc.edu/handle/2099/5313>>

ROJAS-CORTORREAL, G.; ROSET, J. y NAVES, F. *La vegetación tropical en el confort climático urbano aplicado a Santo Domingo, República Dominicana en comparación con el clima mediterráneo, Barcelona España*. S.l.: Universidad Politécnica de Cataluña. 2013.

ROJAS-CORTORREAL, G.; ROSET, J. y NAVÉS, F. *La vegetación en el confort micro climático. Comparación de especies del clima mediterráneo de Barcelona, España*. *ACE Arquitectura, Ciudad y Entorno* [en línea], 2015. vol. 11, no. 29, pp. 59-84. DOI 10.5821/ace.10.29.3589. [Fecha de consulta 10 noviembre 2015] Disponible en: <<http://revistes.upc.edu/ojs/index.php/ACE/article/view/3589>>

ROJAS-CORTORREAL, G.; ROSET, J.; NAVÉS, F.; LÓPEZ-ORDÓÑEZ, C. y CRESPO, I. *El efecto del confort térmico producido por la especie arbórea Almez en el espacio público*. *ACE Arquitectura, Ciudad y Entorno* [en línea], 2016a. vol. 11, no. 32, pp. 187-202. DOI 10.5821/ace.11.32.4839. [Fecha de consulta: 5 noviembre 2016] Disponible en: <<http://upcommons.upc.edu/handle/2117/91364>>

ROJAS-CORTORREAL, G.; ROSET, J.; NAVÉS, F.; LÓPEZ-ORDÓÑEZ, C. y VIDMAR, J. «*Evaluation of vegetation in urban space*». *Barcelona base model and propose to Dominican Republic. SBE 16 MALTA* [en línea]. 2016b. Malta: SBE Malta - Sustainable Built Environment, pp. 195-206. ISBN 978-99957-0-935-8. [Fecha de consulta 5 abril 2016] Disponible en: <<http://www.sbe16malta.org/wp-content/uploads/2016/05/2.pdf>>

SHARMIN, T. & STEEMERS, K., *Effect of Canyon Geometry on Outdoor Thermal Comfort: A case-study of high-density, warm-humid climate*. En: *PLEA 2013: Sustainable Architecture for a Renewable Future* [en línea]. 2013. Munich: s.n., pp. 611-616. [Fecha de consulta: 13 agosto 2015] Disponible en: <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1169310/1169310.pdf>>

SHISHEGAR, N. *Street design and urban microclimate: analyzing the effects of street geometry and orientation on airflow and solar access in urban canyons*. *Journal of Clean Energy Technologies* [en línea]. 2013, vol. 1, no. 1, pp. 52-56. ISSN 1793821X. DOI 10.7763/JOCET.2013.V1.13. [Fecha de consulta: 11 agosto 2015] Disponible en: <<http://www.jocet.org/show-7-273-1.html>>