

Simulación microclimática de una tormenta urbana utilizando el modelo ENVI-met

Flávio Henrique Mendes¹, António Manuel Saraiva Lopes², Demóstenes Ferreira Silva Filho³, Hugo Romero⁴

¹Estudiante de doctorado, Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidad de São Paulo (USP).

E-mail: friquemendes@usp.br

²Prof. Doctor, Instituto de Geografía y Ordenamiento del Territorio (IGOT), Universidad de Lisboa (UL),

E-mail:antonio.lopes@campus.ul.pt

³Prof. Doctor, Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidad de São Paulo (USP).

E-mail: dfilho@usp.br

⁴Prof. Doctor, Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad de Chile (UChile).

E-mail: hromero@uchilefau.cl

Fecha de recepción: 13 de Octubre 2019

Fecha de aceptación: 10 de Diciembre 2019

RESUMEN

El conocimiento de la geografía y de la planificación espacial es un elemento esencial para el desarrollo organizado de las ciudades y la consiguiente mitigación de problemas urbanos, como las islas de calor. En Lisboa (Portugal), los fuertes vientos otoñales que se dirigen hacia el sur o suroeste suelen causar daños, como la caída de árboles, que corresponde al 50% del total de 1.673 caídas registradas entre 1990 y 2008 por los bomberos. Una herramienta disponible para dicha planificación es el software ENVI-met, capaz de realizar simulaciones microclimáticas de la interacción superficie - planta - aire. El objetivo de esta investigación fue analizar el efecto de un viento fuerte en la caída de árboles en un barrio residencial de Lisboa (Portugal), a través del modelado computacional de la localización y caracterización de los diferentes tipos de edificios, vegetación y suelos. Para el procesamiento de datos, se requerían dos archivos: el primero, extensión .in (modelado de área), y el segundo, extensión .cf (archivo de configuración, que contiene variables climáticas). El fenómeno estudiado ocurrió el 24 de noviembre de 2006, con vientos de 13 m/s, según la Estación Meteorológica Gago Coutinho (Estación número 085790), y derribó al menos 66 árboles en la ciudad, según el Departamento de Bomberos. Con la simulación, zonas de aceleración del viento han sido mapeadas, donde el diseño del área demostró tener una gran influencia, ya que los cañones urbanos pueden facilitar las caídas al canalizar altas velocidades de viento. En estos lugares más vulnerables, es importante prestar especial atención al uso y ocupación de la tierra, con árboles con mayor resistencia biomecánica y raíces más profundas, para garantizar su sustento. El modelo ENVI-met se puede utilizar para predecir escenarios futuros de fenómenos naturales, ayudando a la gestión urbana actual.

Palabras clave: Clima Urbano; Cañón Urbano; Caída de Árboles; Fuerza del Viento; Zonas de Aceleración del Viento.

Microclimatic simulation of an urban storm using the ENVI-met model

ABSTRACT

The knowledge about geography and spatial planning is an essential element for the organized development of cities and the consequent mitigation of urban problems, as urban heat islands. In Lisbon (Portugal), strong south or southwest autumn winds usually cause damages, such as the fall of trees, which corresponds to 50% of the total of 1673 falls recorded between 1990 and 2008 by the Fire Department of Lisbon. One tool available for such planning is the ENVI-met software, capable of performing microclimatic simulations of the ground - plant - air interaction. The objective of this research was to analyze the effect of a strong wind in the fall of trees in a residential neighborhood of Lisbon (Portugal), through computer modeling, locating and characterizing the different types of buildings, vegetation and soils. For data processing, two files were required: the first, extension .in (area modeling) and the second, extension .cf (configuration file, containing climate variables). The selected phenomenon occurred on November 24, 2006, with wind speed of 13 m/s, according to Gago Coutinho Meteorological Station (Station number 085790), and felled at least 66 trees in the city, according to the Fire Department. With the simulation, we mapped wind acceleration zones, where the design of the area proved to have a high influence, since urban canyons can facilitate falls by channeling high wind speeds. In these most vulnerable locations, we suggest special attention to land use and occupation, with trees with greater biomechanical resistance and deeper roots, to ensure sustenance. The ENVI-met model can be used to predict future scenarios of natural phenomena, helping current urban management.

Keywords: Urban Climate; Urban Canyons; Tree Fall; Wind Power Potential; Wind Acceleration Zone.

INTRODUCCIÓN

Cada vez más, la academia discute la situación de las ciudades. La planificación urbana se ha convertido en un área clave dentro de la geografía, ya que busca asignar los mejores recursos en sus ubicaciones más adecuadas, conciliando el mobiliario urbano con la infraestructura verde. Si no se planifica, problemas como la isla de calor pueden ocurrir, comúnmente en el centro de las ciudades, debido al alto porcentaje de sellado del suelo, creando diferentes microclimas urbanos (Oke, 1978). Por lo tanto, la forestación urbana aparece como un elemento mitigante de este efecto (Zhou, Huang y Cadenasso, 2011). Sin embargo, cuando tales árboles son susceptibles a las caídas, sus condiciones espaciales circundantes resultan ser relevantes.

El viento se origina por la diferencia en la presión atmosférica, desplazando las masas de aire desde un área de alta presión a una de baja presión, además de fuerza de Coriolis (rotación de la Tierra), fuerza centrífuga, fricción y gravedad (Bonan, 2002). A nivel microclimático, se han realizado estudios de simulación por computadora para comprender estos fenómenos naturales: con una velocidad inicial del viento de 9 m/s (rumbo SW), Lopes y Fragoso (2009) buscaron entender el flujo del viento de un barrio central de Lisboa (Portugal), identificaron áreas para su aceleración y encontraron una correlación directa entre las altas velocidades y la dirección norte-sur de la calle.

Una herramienta disponible para comprender los fenómenos naturales en las zonas urbanas es el modelo ENVI-met. La versión 3.1 es gratuita, mientras que actualmente la última versión, la 4, alcanza

un precio que oscila entre 290 € para estudiantes y 2900 € para negocios (ENVI-met, 2019). A través de simulaciones por computadora, estudios recientes han tratado de comprender el microclima urbano en un centro histórico en la región de Abruzzo, Italia (Ambrosini, Galli, Mancini, Nardi y Sfarra, 2014), en barrios áridos en Phoenix (Arizona), Estados Unidos (Middel, Hüb, Brazel, Martin y Guhathakurta, 2014), en diferentes diseños de urbanización en los Países Bajos (Taleghani, Kleerekoper, Tenpierik y Van den Dobbelen, 2015), bajo diferentes composiciones de jardines urbanos en Creta, Grecia (Tsilini, Papantoniou, Kolokotsa y Maria, 2015) y también para la regulación de la temperatura, el confort térmico y el ahorro de energía en Kowloon Bay, Hong Kong (Morakinyo, Lau, Ren y Ng, 2018).

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio se encuentra en Lisboa, en una sección del distrito de Alvalade en el área central (Figura 1). La ciudad se encuentra en las coordenadas geográficas 38° 43' N y 9° 09' W, bajo clima templado (Csa, según la clasificación Köppen-Geiger), con inviernos lluviosos y veranos calientes y secos, y una precipitación anual promedio de 691 mm (Climate-Data, 2019). Abarca un área de 100 km² y tiene una población de 547.773 habitantes, según el último censo de 2011 (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2012), aunque el Área Metropolitana de Lisboa (AML), compuesta por 18 municipios, tiene poco menos de tres millones de habitantes (AML, 2019).



Figura 1: Ubicación del área de estudio: 21,5 ha (495 m x 435 m), cada marcador (a la derecha) representa un árbol. Fuente: Adaptado de Google Earth (2020).

Modelo ENVI-met

El modelo ENVI-met fue desarrollado en Alemania. Es una dinámica de fluidos computacional (CFD), capaz de realizar simulaciones microclimáticas (fragmento hasta 2,5 km x 2,5 km) entre suelo - vegetación - atmósfera (Bruse y Fleer, 1998). En su versión 3 (gratuita), necesita dos archivos:

- (i) modelado: en extensión .in, correspondiente a la estructura del área, con edificios, vegetación y suelo. Para los edificios contiene las diferentes alturas; para la vegetación, diferentes tipos de árboles basados en la estructura de la copa y su altura; para el suelo, su composición, tal como arena, arcilla, agua, asfalto, concreto, ladrillos entrelazados o granito (Figura 2);

(ii) configuración: en extensión .cf, correspondiente a los datos de entrada en el modelo, es decir, las variables microclimáticas, siendo las principales el período de simulación, velocidad (m/s) y dirección inicial (°) del viento a 10 m de altura, temperatura atmosférica inicial (K), humedad específica a 2500 m (g agua / kg aire) y humedad relativa a 2 m (%) (Tabla 1).



Figura 2: Modelado del área con edificios (gris), vegetación (tonalidad verde) y suelo (blanco/celeste). Fuente: Google Earth (izquierda) y los autores (derecha).

Tabla 1: Ingreso de los principales datos climáticos en el modelo ENVI-met v. 3.1. Fuente: Los autores.

MAIN-DATA Block	Value
Name for Simulation (Text):	=temuco
Input file Model Area	=C:\ENVI\met31\input\temuco.in
Filebase name for Output (Text):	=temuco
Output Directory:	=C:\ENVI\met31\output
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):	=24.11.2006
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):	=16:00:00
Total Simulation Time in Hours:	=1.00
Save Model State each ? min	=60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]	=13
Wind Direction (0:N. 90:E. 180:S. 270:W. .)	=200
Roughness Length z0 at Reference Point	=0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]	=302
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air]	=6.1
Relative Humidity in 2m [%]	=87
Database Plants	=C:\programas\ENVI\met31\sys.basedata\Plants.dat

El modelo es adecuado para simular vientos fuertes alrededor de edificios y calles (Jung, Park, Lee, Kim y Choi, 2009). La fecha elegida para la simulación fue el 24 de noviembre de 2006, con vientos de 13 m/s (~ 47 km/h), según la Estación Meteorológica Gago Coutinho, en la que hubo caída de al menos 66 árboles en la ciudad, según el Departamento de Bomberos, cuya institución ha registrado datos de caídas por más de 20 años, desde 1990). La metodología para las otras variables microclimáticas se

siguió de acuerdo con el "Tutorial para iniciantes: software ENVI-met versão 3.1" (Mendes, 2014).

Para este modelo, se utilizó una grilla (X; Y; Z) de 136 x 100 x 20, donde cada cuadrícula de X = Y = 5,1 m y cada cuadrícula de Z, 4,0 m, y más otras cuatro cuadrículas en cada borde, sugerido por el modelo, basado en las dimensiones mencionadas. Como ENVI-met es un modelo complejo, requiere buenos procesadores. Para fines de comparación, la simulación se realizó en dos máquinas separadas para evaluar el tiempo empleado simulando una hora. El primero fue una CPU Intel® Xeon E7-2870 a 2,40 GHz (8 procesadores en clúster) con 32 GB de RAM. El segundo se realizó a través del emulador Wine en Linux, ya que ENVI-met es específico de Windows, con CPU Intel® Core i5-2400S a 2,50 GHz (4 procesadores) con 4 GB de RAM. Ambos eran de 64 bits. El primero tomó aproximadamente seis horas, mientras que el segundo tomó tres horas, o sea, la mitad del tiempo (Figura 3).

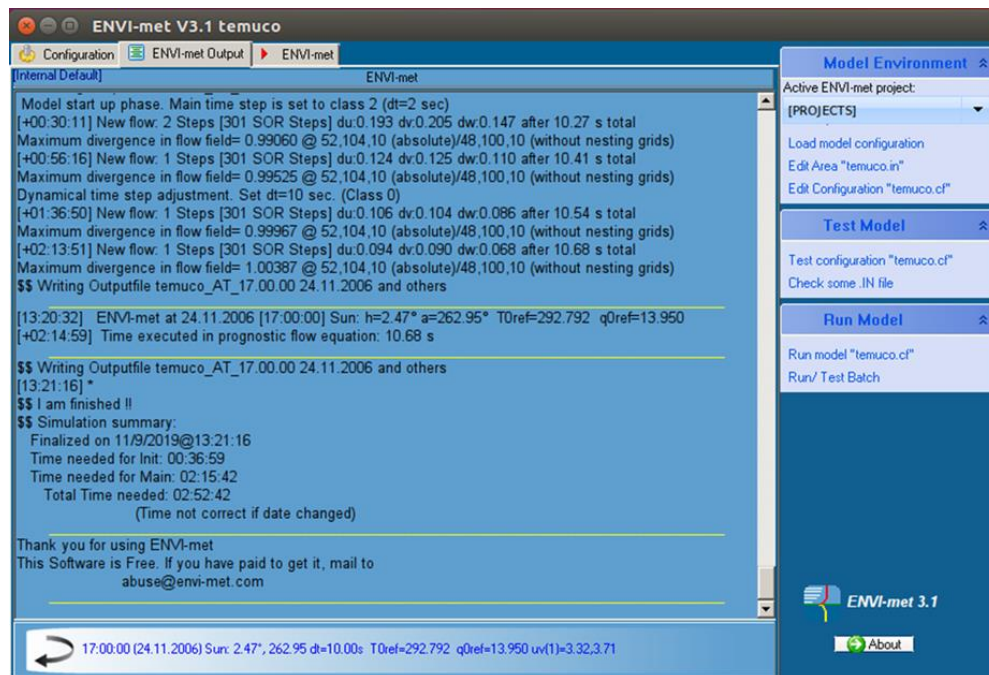


Figura 3. Tiempo de procesamiento de datos a través del emulador Wine en Linux (Total Time needed), mostrando casi tres horas necesarias para realizar la simulación. Fuente: Los autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aquí se realizó una simulación microclimática considerando una velocidad inicial del viento de 13 m/s (casi 50 km/h). Con la simulación, fue posible mapear el área para las zonas de aceleración del viento, en las cuales el diseño mostró una gran influencia en las velocidades. En este recorte del barrio, en la fecha indicada, hubo cinco caídas de árboles, cuya velocidad simulada a 8 m de altura fue alrededor de 6 o 7 m/s (Figura 4). Según estudios de Lopes et al. (2009), valores superiores a 7 m/s (25 km/h) comienzan a ser críticos para la caída de árboles en Lisboa (Portugal). Sin embargo, los eventos extremos con velocidades mucho más altas que esta, con rumbo variable, hacen que el análisis sea más complejo y requiera de una mayor interdisciplinariedad entre las áreas de ingeniería, geografía, biología, etc.

En términos biomecánicos, los cañones urbanos pueden facilitar la caída de árboles al canalizar tales vientos, ejerciendo una palanca mecánica. Los cañones urbanos están formados por condiciones

locales, tales como edificios altos y estructuras que aceleran la velocidad del viento. Se pueden definir por la proporción de las alturas de los edificios adyacentes (H) dividida por el ancho de la calle (W), también conocida como la relación H/W, en la que un cañón regular tiene una relación de hasta 1 y cuyas características son factores relevantes en la creación de islas de calor urbanas (Oke, 1981). Arnfield (2003) y Vardoulakis, Fisher, Pericleous y Gonzalez-Flesca (2003) estudiaron la influencia de los cañones urbanos en la dispersión de contaminantes por el viento y encontraron una influencia directa entre las variables. Este fenómeno también debe estudiarse en las calles de Lisboa y analizar la influencia de la vegetación en el paisaje.

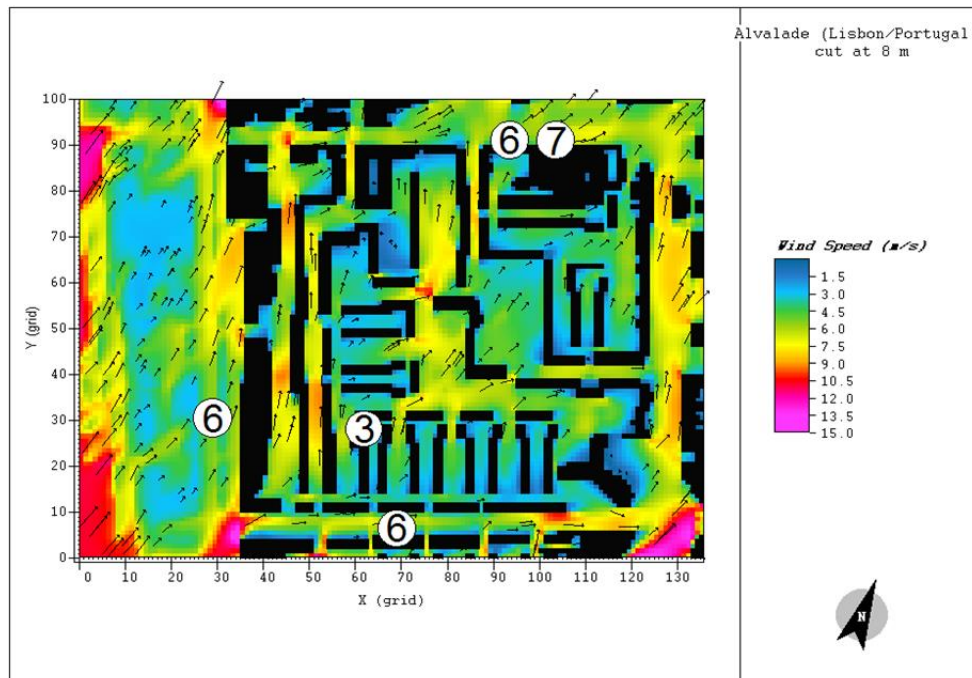


Figura 4. Simulación microclimática del área de velocidad del viento, con un corte a una altura de 8 m, donde el contacto entre el viento y el dosel es mayor (impulso de palanca), ya que los árboles en el modelo tenían un promedio de 10 m. En blanco, los cinco árboles caídos, con la velocidad del viento en m/s en cada punto (3, 6 o 7 m/s). Fuente: Los autores.

También hubo cambios en la dirección original del viento del tercer cuadrante, de rumbo sur/suroeste (200°), con desviación de al menos 30°, solo debido al diseño del área – verticalización (Figura 5), por las mismas razones que en la figura anterior. Sin embargo, para evitar su caída, los árboles crean mecanismos de compensación de fuerza, generando zonas más o menos densas dependiendo de su entorno (Mattheck y Breloer, 1997). Un estudio de la Universidad de São Paulo (USP), en Piracicaba (São Paulo), Brasil, utilizando la técnica de tomografía por impulso, mostró que la dirección predominante de los vientos en un área determinada interfiere directamente con el comportamiento de los árboles, haciendo que su conocimiento sea indispensable para la planificación urbana de la infraestructura verde (Mendes y Silva Filho, 2019).

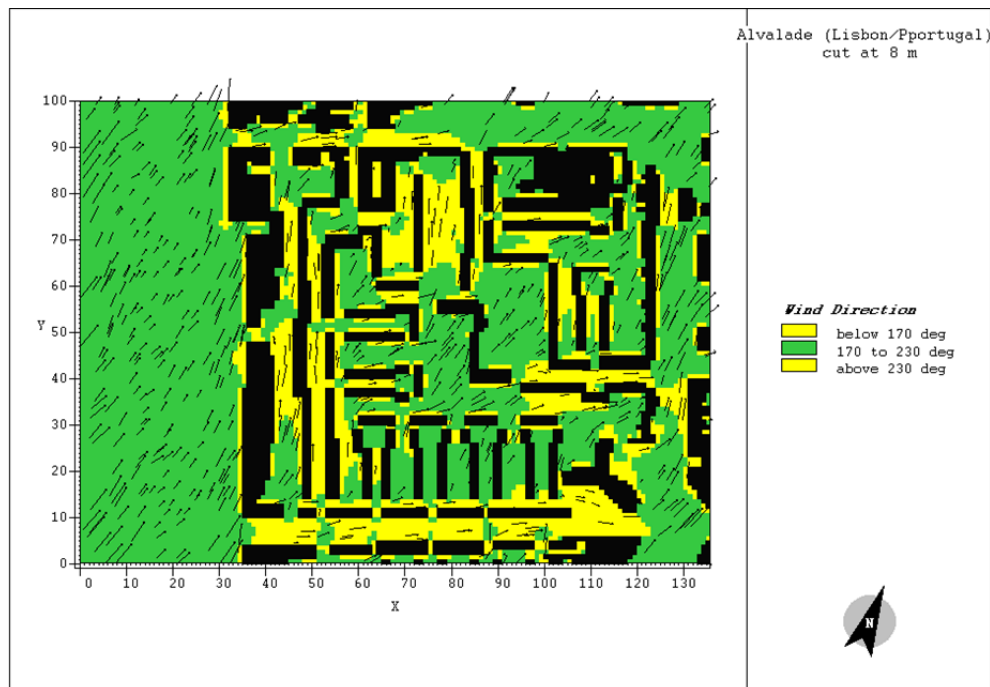


Figura 5. Cambios en la dirección del viento original de 200° (cuadrante 3). En amarillo, las áreas más influenciadas por la verticalización, con desviación de al menos 30°. Fuente: Los autores.

El modelo permite exportar una animación del flujo de viento, en extensión .avi, facilitando la didáctica. También se pueden estudiar otras variables climáticas con ENVI-met, como la temperatura del aire en diferentes perfiles verticales (Z), la humedad relativa del aire, la temperatura de la superficie, la concentración de contaminantes, etc., con un control de la red cada hora, pero limitado a una grilla (X; Y) de 250 x 250 cuadrículas, con un valor máximo de $dx = dy = 10$ m, o sea, 2500 m x 2500 m. Esto, sin contar el área del borde, lo cual es necesario para evitar que los resultados se vean influenciados por ella (el software en sí ayuda a este problema al sugerir un mínimo en cada borde). Toda la elaboración y visualización de mapas temáticos se realiza con Leonardo 3.75, un complemento que acompaña al instalador de ENVI-met 3.1, que analiza los archivos binarios de la extensión .EDI y .EDT (Bruse, 2009).

CONCLUSIONES

El diseño del área urbana es un factor clave en la creación de zonas con altas velocidades del viento, ya que los cañones urbanos pueden guiar la dirección de los vientos, canalizarlos y promover posibles caídas de árboles susceptibles, no solo en áreas urbanizadas, sino también en construcción (ya que las ciudades son mecanismos de crecimiento constante). Se sugiere prestar una atención especial al uso y ocupación de la tierra, con árboles con mayor fuerza biomecánica y raíces más profundas, para garantizar su apoyo, especialmente en los lugares más vulnerables.

A pesar de tener una limitación en el tamaño del área modelada (máximo 2,5 km x 2,5 km), el modelo ENVI-met demostró ser una herramienta importante en la planificación urbana, simulando escenarios pasados para comprender el presente. Por lo tanto, se puede utilizar para predecir escenarios futuros, y a partir de esto, ayudar en la gestión urbana actual, ya que comprender la rosa de los vientos de cualquier municipio es una característica indispensable en la geografía.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado en parte por la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Finanzas 001. Los autores también agradecen a Santander por la asistencia en investigación, y al Dr. Jefferson Lordello Polizel, Técnico del Laboratorio de Silvicultura Urbana de la Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” de la Universidade de São Paulo (ESALQ/USP) para soporte informático en Linux.

LISTA DE REFERENCIAS

- Ambrosini, D., Galli, G., Mancini, B., Nardi, I. y Sfarra, S. (2014). Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-Met® climate model. *Sustainability*, 6(10), 7013-7029. DOI: 10.3390/su6107013
- Área Metropolitana de Lisboa, AML. (2019). Municípios AML. Recuperado de <https://www.aml.pt/index.php>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. DOI: 10.1002/joc.859
- Bonan, G. (2002). *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bruse, M. (2009). ENVI-met 3.1 Manual. Recuperado de <http://www.envi-met.info/documents/onlinehelpv3/cnt.htm>
- Bruse, M. y Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3-4), 373-384. DOI: 10.1016/S1364-8152(98)00042-5
- Climate-Data. (2019). Clima Lisboa. Recuperado de <https://pt.climate-data.org/europa/portugal/lisboa/lisboa-3308/>
- ENVI-met. (2019). Buy now. Recuperado de <https://www.envi-met.com/buy-now/>
- Instituto Nacional de Estatística, INE. (2012). Censos 2011. Recuperado de https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=ine_main&xpid=INE
- Jung, W. S., Park, J. K., Lee, H. W., Kim, E. B. y Choi, H. J. (2009). Wind speed variation over the leeward region according to vegetation under the strong wind. En H. Mayer y D. Schindler (Eds.), *Proceedings of the 2ND International Conference Wind Effects On Trees* (pp. 255-261). Friburgo: Meteorological Institute, Albert-Ludwigs-University of Freiburg.
- Lopes, A. y Fragoso, M. (2009). Tree damages in Lisbon during southern windstorms. En H. Mayer y D. Schindler (Eds.), *Proceedings of the 2ND International Conference Wind Effects On Trees* (pp. 195-200). Friburgo: Meteorological Institute, Albert-Ludwigs-University of Freiburg.
- Lopes, A., Oliveira, S., Fragoso, M., Andrade, J. A. y Pedro, P. (2009). Wind risk assessment in urban environments: the case of falling trees during windstorm events in Lisbon. En K. Střelcová et al. (Eds.), *Bioclimatology and Natural Hazards* (pp. 55-74). Nueva York: Springer.
- Mattheck, C. y Breloer, H. (1997). *The body language of trees: a handbook for failure analysis*. Londres: The Stationery Office.
- Mendes, F. H. (2014). Tutorial para iniciantes: software ENVI-met versão 3.1. Recuperado de http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:projetos:envi-met31_tutorial_iniciantes.pdf
- Mendes, F. H. y Silva Filho, D. F. (2019). Frequency variation of mechanical waves of the impulse tomograph based on geographic north. *Scientia Forestalis*, 47(122), 353-358. DOI: 10.18671/scifor.v47n122.18
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A., Martin, C. y Guhathakurta, S. (2014). Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 122, 16-28. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.004
- Morakinyo, T. E., Lau, K. K., Ren, C. y Ng, E. (2018). Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving. *Building and Environment*, 137, 157-170. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.04.012
- Oke, T. R. (1978). *Boundary layer climates*. Londres: Methuen.
- _____ (1981). Canyon geometry and the

- nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *International Journal of climatology*, 1(3), 237-254. DOI: 10.1002/joc.3370010304
- Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M. y Van den Dobbelen, A. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 65-78. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.014
- Tsilini, V., Papantoniou, S., Kolokotsa, D. D., y Maria, E. A. (2015). Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 14, 323-333. DOI: 10.1016/j.scs.2014.08.006
- Vardoulakis, S., Fisher, B., Pericleous, K. y Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37(2), 155-182. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00857-9
- Zhou, W., Huang, G. y Cadenasso, M. (2011). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 102(1), 54-63. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2011.03.009