

MODELO ESPACIALMENTE EXPLÍCITO DE ESTIMACIÓN DE LAS TEMPERATURAS EXTREMAS DIARIAS EN LA CIUDAD DE SANTIAGO, CHILE, USANDO IMÁGENES MODIS E INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

Luis MORALES-SALINAS¹, Luz CARDENAS-JIRON², Daniel MONTANER-FERNANDEZ³, Guillermo FUENTES-JAQUE¹, Pedro MUÑOZ-AGUAYO³, José NEIRA-ROMAN¹

¹*Laboratorio de Investigación en Ciencias Ambientales (LARES), Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Av Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile.*

²*Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Av. Portugal 84, Santiago, Chile.*

³*Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Santiago, Chile.*

lmorales@uchile.cl, lcardena@uchilefau.cl

RESUMEN

En estudios relacionados para el monitoreo de la isla térmica en una ciudad es necesario el estimar la variabilidad espacial de la temperatura del aire. Este problema es muy importante cuando la densidad de estaciones meteorológicas presentes es de baja densidad, lo cual limita obtener campos térmicos confiables. El presente trabajo presenta un método para estimar las temperaturas extremas diarias a partir de datos de temperatura superficial diurna y nocturna obtenidos por el sensor MODIS (LST) a nivel de la Ciudad de Santiago de Chile. El método aplicado se basa en el uso de regresiones lineales espacialmente explícitas o regresiones ponderadas geográficamente (GWR), donde se estima la inestabilidad paramétrica a nivel de toda el área de estudio, donde las variables independientes usadas corresponden a la altitud y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Las regresiones fueron todas significativas, sin embargo, los mejores resultados del ajuste y evaluación de los modelos lineales para temperaturas máximas y mínimas se obtienen con datos de LST-MODIS día y noche en forma conjunta (mixtos) que por separado. Los resultados muestran que las regresiones espacialmente explícitas GWR presentan una buena precisión para la estimación de las temperaturas extremas diarias a partir de la temperatura superficial de noche y de día MODIS en comparación con OLS.

Palabras clave: Temperatura, Isla térmica, Modelo Espacialmente Explícito, MODIS, OLS.

ABSTRACT

In related studies for monitoring the thermal island in a city it is necessary to estimate the spatial variability of air temperature. This problem is very important when the density of meteorological stations present a low density, which limits to obtain reliable thermal fields. The present work shows a method to estimate the daily extreme

temperatures from daytime and night surface temperature data obtained by the MODIS sensor (LST) at the level of the City of Santiago de Chile. The applied method is based on the use of spatially explicit linear regressions or geographically weighted regressions (GWR), where parametric instability is estimated at the level of the entire study area, where the independent variables used correspond to the altitude and the vegetation index of normalized difference (NDVI). The regressions were all significant, however, the best results of the adjustment and evaluation of the linear models for maximum and minimum air temperatures are obtained with day and night LST-MODIS data jointly than separately. The results show that the spatially explicit GWR regressions present good accuracy for the estimation of daily extreme temperatures from the MODIS day and night surface temperature compared to OLS.

Key words: Temperature, Thermal Island, Spatially Explicit Model, MODIS, OLS.

1. INTRODUCCIÓN

El clima de una región se puede interpretar como una definición cualitativa en función de las condiciones atmosféricas promedio, donde se utilizan para ello la precipitación y temperatura para determinarlo. Esta definición del clima se basa en mediciones realizadas por instrumentos específicos por varios años (30 años) en forma sistemática, lo que permite contar con estadísticas robustas de las variables meteorológicas involucradas (Köppen, 1948; Thornthwaite, 1948). Dentro de estas variables, la temperatura del aire (T_a) se constituye como uno de los parámetros más relevantes en la estimación de diversas variables de interés ambiental, tales como radiación solar, balance de energía, evapotranspiración e inercia térmica, entre algunas (Geiger 1965; Rugege, 2002).

Tradicionalmente T_a es medida en estaciones meteorológicas por sensores ubicados a 2 m sobre la superficie del suelo, que no siempre poseen una densidad adecuada (Flores y Lillo, 2010). Esta deficiencia de datos espaciales de T_a se hace palpable en el caso que se desea contar con un mapa de temperaturas, que corresponde a una distribución espacial continua de la variable. No siempre es posible contar con un número suficiente de estaciones meteorológicas distribuidas, por lo que se recurre a información adicional de dimensión espacial para interpolar y extrapolar datos meteorológicos. Específicamente para interpolar la temperatura del aire T_a se utilizan datos provenientes de sensores remotos, como la temperatura radiométrica superficial LST (Land Surface Temperature), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) o modelos digitales de terreno que entregan la altura de un lugar del territorio estudiado con una resolución espacial específica (Sarricolea y Martín-Vide, 2014; Smith y Romero, 2016; Oke y Voogt, 1997).

El presente trabajo presenta un método simple para la estimación del campo térmico, correspondiente a las temperaturas extremas, máximas y mínimas, diarias a partir de datos de temperatura superficial diurna y nocturna obtenidos por el sensor MODIS (LST) y datos meteorológicos del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) y Red Agroclimática Nacional (RAN), a nivel de la Ciudad de Santiago

2. MÉTODOS

El presente estudio corresponde a un análisis de las temperaturas del aire de la ciudad de Santiago de Chile a nivel de mesoescala con el objetivo de estimar su distribución espacial en toda la ciudad. Para ello se contó con información meteorológica y bases de datos de temperatura superficial (LST) del satélite MODIS para la estación de verano.

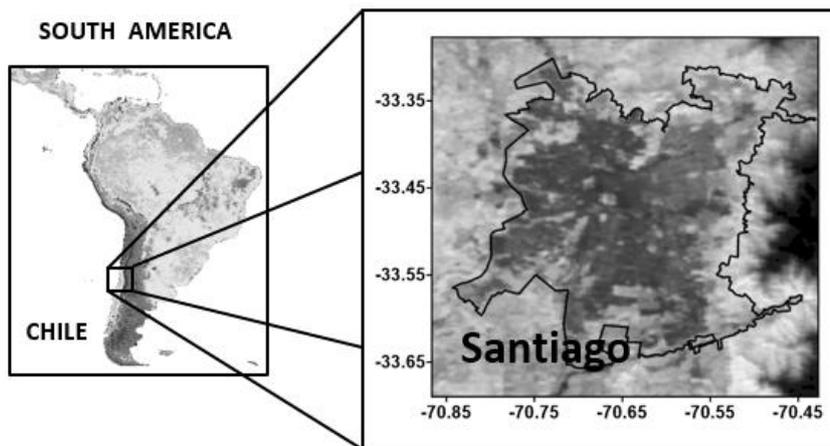


Figura 1: El área de estudio, correspondiente a la Ciudad de Santiago de Chile, ubicada en la Región Metropolitana de Santiago, Chile.

2.1 Área de estudio

El área de estudio comprende a la ciudad de Santiago de Chile, ubicada administrativamente en la Región de Metropolitana de Santiago, ubicadas aproximadamente entre los -33.45 y -70.67 grados de latitud sur y aproximadamente a 500 m sobre el nivel del mar (Figura 1). La ciudad se caracteriza por poseer un clima de tipo mediterráneo continental, que se caracteriza por contar con inviernos lluviosos y una estación seca prolongada. Desde el punto de vista de la clasificación climática de Köppen, esta corresponde a Csb que se describe como un clima templado con verano seco (Sarricolea y Martín-Vide, 2014; Smith y Romero, 2016). El régimen térmico de la Ciudad de Santiago se caracteriza principalmente por tener temperaturas que varían entre 28,2 °C de temperatura máxima del mes de enero y 14,4 °C en julio. Por otra parte 10,9 °C de temperatura mínima de enero y de 4,4 °C del mes de julio. Lo anterior influye en que la Ciudad cuente con 1621 Grados-Día, con una temperatura umbral térmica de 10 °C, y 1147 horas de frío, con una temperatura umbral de 7 °C. Cuenta, además con 231 días sin heladas, y un promedio de 11 heladas anuales. Finalmente se observa una precipitación media anual de 419 mm con un período seco de aproximadamente 8 meses (Santibañez y Uribe, 1990).

2.2 Información meteorológica

Los datos utilizados de referencia terrestre corresponden a la temperatura del aire medida por sensores ubicados en las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs)

pertenecientes al Ministerio de Medio Ambiente y compilados en la Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). Adicionalmente se utilizaron datos de temperatura del aire de la Red Agroclimática Nacional (RAN) para usarlas como información adicional en las interpolaciones espaciales. Estas EMAs se encuentran distribuidas en 9 comunas al interior de la Región Metropolitana de Santiago (RMS), para el mismo rango de fechas que las imágenes satelitales según disponibilidad (Tabla 1). A partir de datos de temperatura horarios (24 registros diarios), se consolidó una base de datos que permitiera verificar la variación térmica espaciotemporal existente entre todas las estaciones. Sin embargo, las inconsistencias y diferencias extremas entre estaciones, presumiblemente por falta de mantención o mal funcionamiento de las estaciones, hicieron necesario un proceso de revisión, depuración y validación de varias etapas (Guajardo et al., 2017; Esteves y Gavilán, 2006; Esteves et al., 2011).

Nombre estaciones	Coordenada este	Coordenada norte	Temporada de verano disponible
Parque O'Higgins	345673	6296019	2005-2017
Independencia	346488	6300681	2005-2017
EL Bosque	345313	6286825	2005-2017
La Florida	352504	6290304	2005-2017
Las Condes	358305	6305906	2005-2017
Cerro Navia	338984	6299360	2005-2017
Pudahuel	337311	6298809	2005-2017
Puente Alto	352049	6282013	2009-2017
Talagante	318945	6272298	2009-2017

Tabla 1: Estaciones meteorológicas automáticas usadas en el estudio, correspondientes a Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

2.3 Datos satelitales

Se utilizaron datos satelitales TERRA y AQUA, correspondientes a información espacial registrada por el sensor MODIS y existen cerca de 34 productos generados por la NASA a partir de los datos recolectados por el sensor MODIS. Los productos utilizados en este estudio fueron el MOD11A1 que corresponde a datos de temperatura superficial de la tierra (LST), obtenidos diariamente con 1km de resolución espacial y presentan un procesamiento nivel 3, versión 6, y el producto MOD13Q1 que corresponde al índice de vegetación de diferencia normalizada versión 6. Se descargaron y procesaron 1068 imágenes de día y noche correspondientes a las LST diarias para los meses de diciembre, enero y febrero, de los 12 años considerados en este estudio (2005-2017). El tiempo de adquisición de las imágenes de LST del área de estudio abarca pixeles con hasta 3 horas diferentes de día y tres horas diferentes de noche. Los datos de LST obtenidos fueron almacenados en °C utilizando el factor de corrección recomendado de 0,02 para pasarlos a Kelvin y restando 273,15 (Wan, 2007). Toda la información fue llevada a WGS84.

2.4 Regresiones espacialmente explícitas

La integración de los datos de las estaciones y las imágenes satelitales, permiten a través del ajuste de modelos estadísticos, calibrar el registro de temperatura de superficie a temperatura del aire, para posteriormente mediante modelos espacialmente explícitos extender la estimación a toda el área de estudio. A partir de la temperatura superficial satelital (LST) MODIS registrada sobre los píxeles que cubren cada estación, y la temperatura del aire registrada en igual sitio y tiempo, se generó una base de datos que contiene alineados los píxeles LST y las temperaturas de aire medidas a cada hora de visita en sus respectivas estaciones.

Con el fin de conocer la relación que existe entre la temperatura superficial (LST) y la temperatura del aire medida en cada una de las estaciones, se realizó el ajuste de modelos lineales (eq.1) para los datos satelitales diurnos, nocturnos y mixtos, con los datos de temperatura de cada una de las estaciones.

$$T_a(x, y) = a_0(x, y) + a_1(x, y) \cdot LST(x, y) + \varepsilon(x, y) \quad (1)$$

Como resultado de este proceso, cualesquiera sean los datos incluidos en los modelos, se obtiene una ecuación que permiten predecir la temperatura local del aire a partir del valor del pixel LST registrado por el satélite sobre la estación modelada (Gutiérrez et al., 2012; Brunson et al., 2009).

Los modelos de regresión ponderada geográficamente (Geographic Weighted Regression), son modelos locales que crean una ecuación para cada elemento del conjunto de datos de la variable dependiente (Fotheringham et al., 2000). En este caso los coeficientes (a_0 , a_1) de las nueve ecuaciones fueron modelados usando dos variables independientes como son el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la altitud, por sus conocidas relaciones con la temperatura (Karnieli et al., 2010). La ecuación 2 muestra el modelo lineal ponderado geográficamente, donde los datos para la variable altitud se obtienen directamente desde el producto de la NASA GTOPO30 (U.S. Geological Survey's. 1996), de una resolución espacial de 30 arco-segundos (aproximadamente 1km). Los datos de NDVI se obtienen de un producto MOD13Q1, con un período de cálculo de 16 días. Esta ecuación da cuenta de la variabilidad espacial de los coeficientes de la regresión lineal entre T_a y LST (eq.1).

$$a_j = \beta_{0j} + \beta_{1j} \cdot altitud + \beta_{2j} \cdot NDVI \quad (2)$$

Posterior al ajuste de los coeficientes ponderados geográficamente, se emplea un modelo de interpolación geoestadística que corresponde a un cokriging ordinario (Goovaerts, 1997; 2000).

Los modelos resultantes fueron evaluados según su error medio cuadrático (RMSE), coeficiente de determinación (R^2) y significancia estadística (p-value).

3. RESULTADOS

En el proceso de validación de los datos de temperatura se eliminaron 4.535 datos (2% del total de datos esperados) los que se suman a 11.604 datos faltantes (5,1% del total de datos esperados). Existen periodos donde no se registraron datos en ninguna

estación en horas particulares, principalmente entre el 15 de diciembre 2015 y 18 febrero de 2016. A su vez todas las estaciones presentan periodos sin datos por horas o incluso días.

Los mejores resultados del ajuste y evaluación de los modelos lineales diurnos, nocturnos y mixtos, se obtienen con datos de día y noche en forma conjunta (mixtos). Para el día, los modelos tuvieron un coeficiente de determinación entre 0,23 y 0,59, en cambio los nocturnos estuvieron entre 0,04 y 0,32. Sin embargo, cuando el modelo consta de datos diurnos y nocturnos simultáneamente, los valores mejoran, lo cual se muestra en la Tabla 2, que corresponde a un resumen de los modelos mixtos (Día y Noche).

estación	a_0	a_1	R^2	p.value	RMSE
Cerro Navia	11.8035	0.3709	0.66	0.000	3.159
EL Bosque	12.2912	0.3490	0.78	0.000	2.175
Independencia	14.1418	0.3136	0.72	0.000	2.152
La Florida	12.7507	0.3359	0.74	0.000	2.212
Las Condes	10.7222	0.3989	0.77	0.000	2.047
P O'Higgins	11.6696	0.3576	0.78	0.000	2.192
Pudahuel	14.3956	0.2745	0.72	0.000	2.128
Talagante	5.9368	0.5409	0.86	0.000	2.165

Tabla 2: Coeficientes de la ecuación 1 para cada estación meteorológica utilizada y sus estadígrafos.

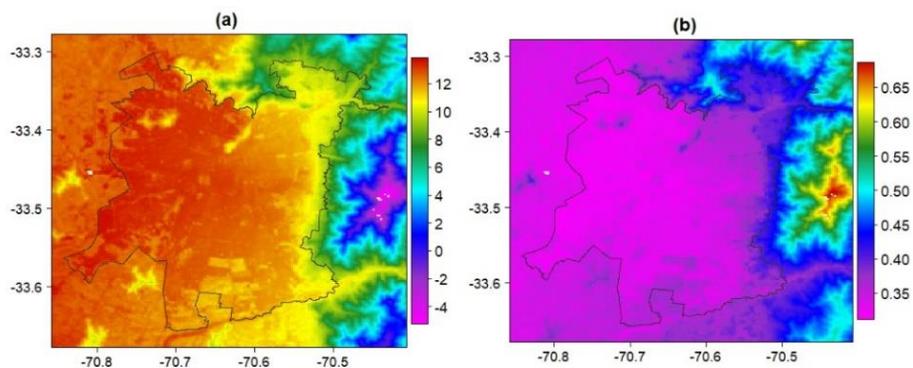


Figura 2: Distribución espacial de los coeficientes de la ecuación 1, intercepto(a) y pendiente (b),

Los coeficientes a_0 y a_1 se espacializaron en toda el área de estudio a partir de la regresión GWR, dada por la ecuación 2, donde se usaron las variables independientes de altura y NDVI. En intercepto promedio fue de $11.76 \pm 7.01\%$, en cambio la pendiente tomo un valor de $0.36 \pm 6.18\%$, donde el coeficiente de determinación (R^2) de ambos casos superan el 88% y presentan un error medio estándar bajo y un nivel de significancia, p-value, menor a 0.001. La figura 2 muestra la distribución espacial en el área de estudio del intercepto (Fig. 2a) y pendiente (fig. 2b) de la ecuación 1,

que relaciona T_a con LST. En esta figura es posible apreciar patrones claros de distribución espacial, asociados principalmente al gradiente altitudinal y al uso del suelo (Smith y Romero, 2016). A partir de los coeficientes mostrados en la figura 2, fue posible calcular la temperatura del aire para cada día, específicamente las temperaturas extremas diarias, esto es la temperatura máxima y la mínima (Bustos y Meza, 2015). En general se observan buenos patrones de ajuste, con un error medio cuadrático entre 2 y 3 °C en la estimación de la temperatura del aire a nivel espacial en el área de estudio. La figura 3 muestra un gráfico de dispersión de los valores medidos (MEASURED) y modelados (ESTIMATED) por el modelo lineal, lo que da un ajuste aceptable, dado por su coeficiente de determinación de 0,77 y una relación estadísticamente significativa.

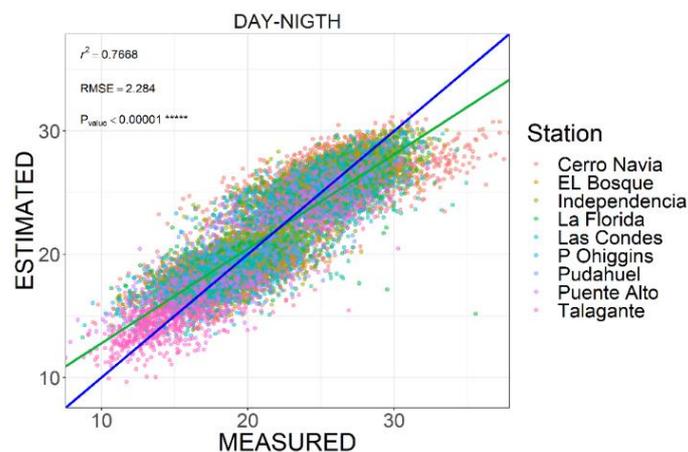


Figura 3: Relación lineal entre los valores estimados (*ESTIMATED*) y observados (*MEASURED*) para las temperaturas diurnas y nocturnas.

Con el modelo lineal espacialmente explícito es posible calcular la distribución espacial de la temperatura del aire promedio de verano a partir de la temperatura superficial de MODIS, tanto para el día como la noche en la Ciudad de Santiago de Chile. La figura 4 muestra la distribución espacial de la temperatura promedio de verano superficial MODIS de día (a) y noche (b) con la temperatura del aire de día (c) y noche (d).

En la figura 4 se observa el comportamiento promedio de la temperatura superficial y del aire para cada pixel, correspondiente a todos los días de diciembre, enero y febrero para todos los años de estudio. Se observa claramente que las mayores temperaturas diurnas medias en la isla de calor se concentran en la zona norponiente de Santiago. Analizando toda la serie de tiempo de imágenes, la isla de calor aumenta su extensión en los meses de enero y febrero, llegando a cubrir cerca de la mitad de área urbana durante febrero, con incrementos de hasta 4°C. En el caso de la noche, se observa un fenómeno contrario a lo que ocurre durante el día, las temperaturas promedio de la isla urbana de calor presentan extensiones similares durante los tres meses de verano, al igual que sus magnitudes, las que alcanzan a los 5°C. La extensión de la isla cubre

la totalidad del área urbana a diferencia de la isla durante el día donde existen zonas precordilleranas cuyas temperaturas son menores a las de referencia.

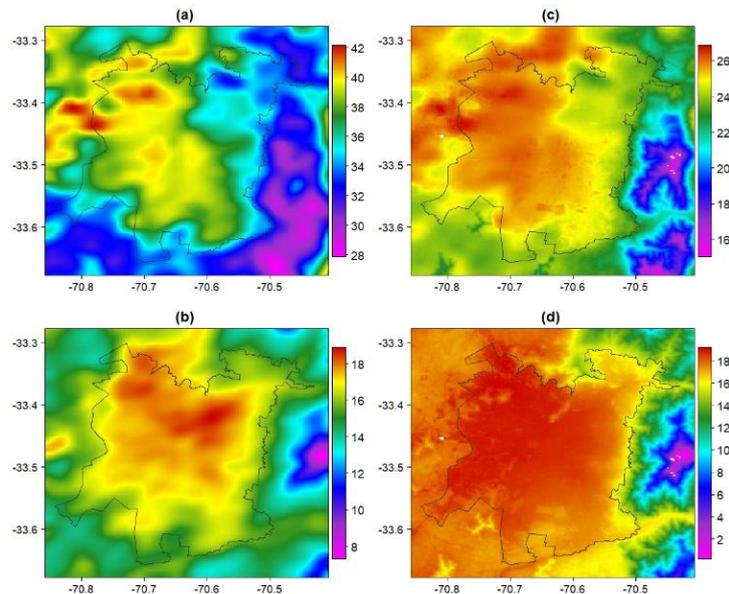


Figura 4: Distribución espacial de la temperatura promedio superficial MODIS de verano, para el día (a) y la noche (b) con la temperatura del aire de día (c) y noche (d) para la Ciudad de Santiago de Chile obtenida del modelo de regresión espacialmente explícita.

4. DISCUSIÓN

La isla de calor urbana (ICU) de la ciudad de Santiago presenta comportamiento diferente durante el día y la noche. Por la mañana el campo térmico tiene un marcado incremento en el sector norponiente de la ciudad que, a pesar de ser un área menos urbanizada, por la condición geológica de sus suelos logra reflejar, absorber y emitir de manera más rápida la energía solar incidente (Romero y Molina, 2008). El área urbana, por el contrario, durante la mañana puede registrar temperaturas menores a las existentes en áreas naturales, lo que se revierte durante la noche debido a la inversión térmica. Morales (2006), menciona que el enfriamiento nocturno radiativo de la superficie genera un incremento típico de 3°C en los primeros 20 metros sobre el suelo, los que se acoplan a la inversión térmica de subsidencia presente también en la cuenca. No se observan variaciones considerables en los valores de temperatura nocturnos que hagan presumir una marcada tendencia de aumento en las magnitudes de la temperatura del aire. Para los datos diurnos, los resultados muestran variaciones tanto en extensión como en magnitud: a partir de diciembre de 2013 hasta la actualidad, la isla térmica aumenta su extensión de forma abrupta, ocupando toda el área urbana.

Dado el corto periodo de estudio (12 temporadas de verano) no fue posible interpretar o asociar los resultados a efectos de orden climático. Sin embargo, el desarrollo metodológico en fechas posteriores y nuevos datos satelitales permitirán complementar este análisis.

La disponibilidad de imágenes MODIS diarias (diurnas y nocturnas) de mediana resolución gratuitas, favorecen estudios e investigaciones a escala regional e incluso mundial. En este estudio se comprueba la existencia de una relación que permite modelar la temperatura del aire a partir de imágenes satelitales de temperatura superficial (LST) de moderada resolución. De igual manera, que las variables altitud y NDVI mejoran los resultados en modelos de regresión espacialmente explícitas, logrando buenos ajustes y niveles de significancia.

Para mejorar la modelación temporal y las variaciones térmicas durante el día y la noche, se requeriría contar con datos de estaciones meteorológicas validadas, que incluyan algún sistema de control y mantenimiento de los equipos, además de un mayor número distribuidas en la ciudad.

El estudio del campo térmico mediante imágenes satelitales sumado a otros estudios puede ser un insumo valioso en relación con la toma de decisiones en la planificación urbana y definición de política pública.

Finalmente, aun cuando la limitación temporal de este estudio no permita asumir una variabilidad climática, la extensión y magnitud de la isla de calor registrada durante la noche en los últimos veranos (hasta 9°C), hace presumir un impacto directo sobre toda el área urbana de la ciudad de Santiago de Chile y su población.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), por medio del proyecto FONDECYT 1161809.

REFERENCIAS

- Brunsdon, C.; Fotheringham, S.; Charlton, M. 2009. Geographically Weighted Regression. *J. R. Stat. Soc. Ser.*, 47, 431–443, doi:10.1111/1467-9884.00145.
- Estévez J., P. Gavilán and J.V. Giráldez. 2011. Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. *Journal of Hydrology* vol. 402, p. 144–154.
- Estévez, J., Gavilán, P., 2006. Quality control procedures in the Agroclimatic Stations Network of Andalusia. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Experiences with Automated Weather Stations, 24–26 May 2006*. Lisbon, Portugal.
- Fabián, Z. 2014. Method of the Geographically Weighted Regression and an Example for its Application. *Reg. Stat.*, vol. 4, p. 61–75, doi:10.15196/RS04105.
- Flores Fabiola y Mario Lillo. 2010. Simple air temperature estimation method from MODIS satellite images on a regional scale. *Chilean Journal of Agricultural Research*, vol. 70(3):436-445.

- Fotheringham, A., Brundson, C. y Charlton, M. 2000. *Quantitative Geography*. London. SAGE Publications. 270 pp.
- Geiger R. 1965. *The climate near the ground*. Mass, Cambridge, 611 p.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York: Oxford University Press. 496p.
- Goovaerts, P. 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, vol. 228, p.113-129.
- Guajardo R., Guadalupe Granados, Ignacio Sánchez, Gabriel Díaz y Finlandia Barbosa. 2017. Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 8, N° 5, p. 157-177.
- Gutiérrez-Puebla, J.; Daniel-Cardozo, O.; García-Palomares, J. C. 2012. Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) y estimación de la demanda de las estaciones del Metro de Madrid. XV Congr. Nac. Tecnol. la Inf. Geográfica, Madrid, AGE-CSIC, 19–21.
- Karnieli, A.; Agam, N.; Pinker, R. T.; Anderson, M.; Imhoff, M. L.; Gutman, G. G.; Panov, N.; Goldberg, A. 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *J. Clim.*, vol. 23, p. 618–633, doi:10.1175/2009JCLI2900.1.
- Köppen, W. 1948. *Climatología*. México. Fondo de cultura económica. 478 p.
- Morales, R. G. E. 2006. *Contaminación atmosférica urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*; Editorial Universitaria; ISBN 9561118351.
- Oke, T. The distinction between canopy and boundary layer urban heat island. *Atmosphere*, 2010, Vol. 14, N° 4, p. 266-277.
- Oke, T. & Voogt, J. 1997. Complete urban surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 9, N° 36, p. 1117-1132.
- Romero, H.; Molina, M. 2008. Relación espacial entre tipos de usos y coberturas de suelos e islas de calor en Santiago de Chile. *Landsc. Urban Plan.*
- Rugege, D. 2002. Regional analysis of maize-based land use systems for early warning applications. 118 p. Ph.D. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Wageningen University, Enschede, The Netherlands.
- Santibáñez, F. y Uribe, J. M. 1990. *Atlas Agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Departamento de Ingeniería y Suelos, Laboratorio de Agroclimatología. Santiago, Chile. 65 p.
- Sarricolea P. y Javier Martín-Vide. 2014. El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57: 123-141.
- Smith P. y Hugo Romero. 2016. Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63: 45-62.
- Thornthwaite, C. 1948. An approach toward a rational clasification of the climate. *The Geographical Review*. 38(1): 55-94.

- U.S. Geological Survey's. 1996. Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30).
<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>.
- Wan, Z. 2007. Collection-5. MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide. Santa Bárbara: ICESS. Disponible en internet:
http://www.icesb.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/MODIS_LST_products_Users_guide_C5.pdf.