

Análisis espacio temporal de la Isla de Calor Urbana mediante imágenes satelitales: capitales de Andalucía

David Hidalgo García ¹ | Julián Arco Díaz ²

Recibido: 22-02-2021 | Versión final: 15-03-2022

Resumen

La búsqueda de nuevas técnicas que permitan determinar de forma económica y precisa el fenómeno de alteración de clima urbano denominado Isla de Calor Urbana (ICU) se ha convertido en uno de los grandes retos de la sociedad. Su conocimiento sobre las urbes permitiría la implantación de medidas de mitigación y resiliencia que tiendan a minimizar sus efectos y el coste económico que conlleva. En esta investigación, se ha determinado la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) y la ICU mediante imágenes satelitales Séntinel 3 de las ocho capitales de Andalucía (España) durante el año 2020. Estas se ubican en una zona calificada como de alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático lo que unido al empleo de zonas climáticas locales (ZCL) permite que los resultados puedan ser extrapolados a otras ciudades con iguales tipologías de zonas climáticas. Los resultados obtenidos indican que durante la mañana se produce en las ciudades estudiadas una isla de enfriamiento urbano de temperatura media $-0,76$ °C y durante la noche una ICU de temperatura media $1,29$ °C. Ambas presentan mayores intensidades en las ZCL compactas de media y baja densidad en contraposición con las ZCL abiertas e industriales. La variabilidad estacional de la ICU diurna se intensifica durante el verano y el invierno y la nocturna durante el invierno y el otoño. Se comprueba la existencia de relaciones diurnas negativas significativas al 99% ($p < 0,01$) entre la ICU y la contaminación ambiental y de relaciones nocturnas, en iguales condiciones, entre la ICU y la TST, fracción vegetal (Pv) y la contaminación.

Palabras clave: Isla de Calor Urbana; temperatura superficie terrestre; Séntinel 3; zonas climáticas locales

Citación

Hidalgo, D. y Arco, J. (2022). Análisis espacio temporal de la Isla de Calor Urbana mediante imágenes satelitales: capitales de Andalucía. *ACE: Architecture, City and Environment*, 17(49), 10374. DOI: <http://dx.doi.org/10.5821/ace.17.49.10374>

Spatial-Temporal Analysis of the Urban Heat Island Using Satellite Images: Capitals of Andalusia

Abstract

The search for new techniques that make it possible to determine economically and precisely the phenomenon of urban climate alteration called Urban Heat Island (ICU) has become one of the great challenges of society. Their knowledge of cities would allow the implementation of mitigation and resilience measures that tend to minimize their effects and the economic cost that they entail. In this research, the Terrestrial Surface Temperature (TST) and the ICU have been determined through Sentinel 3 satellite images of the eight capitals of Andalusia (Spain) during the year 2020. These are located in an area classified as highly vulnerable to the effects of climate change, which, together with the use of local climate zones (ZCL), allows the results to be extrapolated to other cities with the same types of climate zones. The results obtained indicate that during the morning there is an urban cooling island with an average temperature of -0.76 °C and during the night an ICU with an average temperature of 1.29 °C. Both present higher intensities in compact ZCL of medium and low density in contrast to open and industrial ZCL. The seasonal variability of the diurnal ICU is intensified during the summer and winter and the nocturnal one during the winter and autumn. The existence of negative diurnal relationships significant at 99% ($p < 0.01$) between the ICU and environmental contamination and of nocturnal relationships in the same conditions between the ICU and the TST, plant fraction (Pv) and contamination are verified.

Keywords: Urban Heat Island; land surface temperature; Sentinel 3; local climate zones

¹ Dr. Arquitecto Técnico e Ingeniero Civil, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería. Universidad de Granada (ORCID: [0000-0002-4039-8709](https://orcid.org/0000-0002-4039-8709)), ² Dr. Arquitecto Técnico, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería. Universidad de Granada (ORCID: [0000-0002-6894-6084](https://orcid.org/0000-0002-6894-6084)). Correo de contacto: dhidalgo@ugr.es

1. Introducción

En las últimas décadas, el calentamiento global y los eventos climáticos extremos se han convertido en los desafíos más importantes y urgentes a los que se enfrenta la humanidad (Kovats *et al.*, 2005; Song *et al.*, 2020). Uno de los procesos que más contribuyen al cambio climático es la modificación del paisaje mediante la expansión de las áreas urbanizadas motivado por el alto crecimiento de la población (Li *et al.*, 2011). Según un informe reciente de Naciones Unidas (ONU) se estima que actualmente el 50% de la población actual es urbana y la previsión es que en el año 2050 aumente hasta el 70% (ONU, 2018). Estos datos significan 2.500 millones de habitantes urbanos adicionales en los próximos 30 años (Mukherjee & Singh, 2020) lo que se traducirá en un aumento de la cobertura urbana mundial de aproximadamente 1.527.000 Km² (Schneider *et al.*, 2010).

La urbanización es el principal impulsor de la expansión de la industria, el transporte y el crecimiento económico y urbano, pero altera el clima urbano local mediante el aumento de la temperatura de la superficie terrestre (TST) (Scolozzi & Geneletti, 2012; Salvati *et al.*, 2016; Song *et al.*, 2020). En los últimos años, numerosas investigaciones han observado la correlación positiva entre la TST y las zonas urbanas de tal forma que, estas presentan temperaturas más altas en comparación con las zonas verdes o zonas rurales (Hua *et al.*, 2020; Tsou *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2020b). Las primeras sufren los mayores aumentos de temperatura debido principalmente al fenómeno de alteración de clima urbano denominado Isla de Calor Urbano (ICU) cuya intensidad se ve incrementada por las múltiples actividades humanas (Santamouris, 2020). Estudios recientes indican que una ciudad grande con una población de más de 1 millón de habitantes presenta una temperatura promedio anual de aproximadamente 1 y 3 °C más alta que las áreas no urbanas circundantes (Khamchiangta, & Dhakal 2019).

Se encuentra demostrado que la ICU genera una serie de problemas ambientales, climáticos y socioeconómicos que afectan a la calidad de vida de las personas que habitan en las zonas urbanas (Dwivedi & Mohan, 2018; Macintyre *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2020a). Entre ellos, destacar la degradación de la calidad del agua y del aire (Feizizadeh & Blaschke 2013), la reducción de la biodiversidad (Čeplová *et al.*, 2017), cambios en el balance energético (Arnfield, 2003), la degradación de la calidad del agua y del aire (Feizizadeh & Blaschke, 2013), efecto perjudicial sobre el clima regional (Sarrat *et al.*, 2006), aumento del costo de la energía (Santamouris, 2020) e incluso aumento de la mortalidad (Arbuthnott & Hajat, 2017). Por tanto, este fenómeno es un problema cada vez más importante al que se enfrenta la población urbana. La caracterización y el conocimiento exhaustivo de sus propiedades, factores que lo intensifican y su flujo de funcionamiento son cruciales para el establecimiento de medidas adecuadas y mitigadoras de planificación urbana que tiendan a minimizar sus efectos.

Cuando se realiza el estudio de la ICU es importante aclarar que esta puede calificarse como ambiental o de superficie. La primera es aquella que se determina mediante las temperaturas ambientales mientras que para la segunda se requiere la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST). Ambas temperaturas son distintas, pero se encuentran completamente relacionadas. Existen distintas metodologías habitualmente empleadas para determinar la ICU según sea atmosférica o de superficie. Los métodos habituales para determinar la primera son: transeptos móviles, sondas fijas de temperatura y comparación entre estaciones meteorológicas. Los dos primeros son costosos ya que requieren de instrumentación adecuada y certificada para las mediciones e implican un tiempo prolongado para la obtención de los datos. La comparación entre estaciones meteorológicas reduce los inconvenientes de los dos primeros procedimientos ya que permite la adquisición de los datos de periodos anteriores y no requiere inversión en instrumentación. No obstante, el principal inconveniente es que estas son limitadas o inexistentes en algunas ciudades y/ o municipios de España por lo que el proceso de obtención de ICU es incompleto o limitado. Por el contrario, para la obtención de la ICU de superficie habitualmente se emplean métodos de teledetección. Estos, y

desde la década de los años 90, ha permitido la posibilidad de realizar estudios urbanos de TST e ICU a gran escala (Song *et al.*, 2018) mediante imágenes satelitales con sensores infrarrojos térmicos (TIRS). Los estudios de estos sistemas se han convertido en un importante campo de investigación y prueba de ello es la amplia literatura existente sobre la materia (Guo *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2020; Shafizadeh-Moghadam *et al.*, 2020; Wang & Ouyang, 2017; Yang *et al.*, 2020a; Yao *et al.*, 2018).

En la actualidad, son numerosos los satélites que permiten obtener imágenes térmicas de la superficie terrestre: Goes (1978), Modis (1999), NOAA AVHRR (1999), Landsat 8 (2013), Séntinel 3 (2018) y Ecostress (2018). De todos estos, los tres últimos son considerados los más novedosos debido a que fueron puestos en órbita en fechas recientes e incluyen nuevos sensores térmicos (TIRS) de alta resolución. Landsat 8 permite obtener estimaciones de TST cada 16 días y a una resolución de 100 metros gracias a sus bandas térmicas 10 y 11. Mediante este sistema se ha determinado la ICU de múltiples ciudades entre las que destacan: Bangladesh (India) (Roy *et al.*, 2020), Changchun (China) (Yang *et al.*, 2020a), Barcelona, (España) (Lemus *et al.*, 2020; Arellano & Roca, 2021), Shanghai (China) (Li *et al.*, 2011), área olímpica de Beijing (China) (Hu *et al.*, 2020), Xiamen city (China) (Hua *et al.*, 2020), Fuzhou (China) (Du *et al.*, 2020), Lyon (Francia) (Diallo *et al.*, 2015) o Cracovia (Polonia) (Walawender *et al.*, 2014). El sensor térmico Ecostress se encuentra instalado en la Estación Espacial Internacional y cuenta con seis bandas espectrales de infrarrojo térmico con una resolución de 60 metros que permite obtener estimaciones de temperatura cada 4 días. Su uso para la determinación de la TST se encuentra documentado mediante los estudios de ciudades de Estados Unidos (Xue *et al.*, 2020; Coleman *et al.*, 2020). El último producto es la constelación Séntinel 3, compuesto por los satélites 3A, 3B y 3C. Los dos primeros fueron lanzados en febrero de 2016 y abril de 2018 respectivamente, mientras que el Séntinel 3C no dispone aún de fecha de lanzamiento. Todos los Séntinel dispone de 3 canales TIRS, bandas 7, 8 y 9 que proporcionan estimaciones de TST cada día y a una resolución de 1000 metros. Su uso se encuentra documentado en la literatura mediante los estudios de la ICU sobre las ciudades de Daman (India) y Huazhaizi (China) (Yang *et al.*, 2020b), Oklahoma city (EE. UU) y Dabra (Senegal) (Sobrinho *et al.*, 2016). Aunque el uso de los Séntinel 3 para determinar la TST y la ICU no es tan habitual como Landsat 8 y ECOSTRESS su utilización supone una importante ventaja en este tipo de estudios. Mientras que estos últimos orbitan una sola vez por cada punto del planeta cada 16 y 4 días respectivamente, Séntinel 3 lo hace dos veces al día, una en horario diurno y otra en horario nocturno. Los estudios existentes de Landsat 8 y ECOSTRESS utilizan esos valores puntuales para extrapolar a periodos amplios y obtener resultados globales de ICU. Esta es una premisa errónea ya que algunas investigaciones (Anjos *et al.*, 2020; Emmanuel & Krüger, 2012) alertan de la existencia de una elevada variabilidad de la ICU, tanto a lo largo del tiempo como a lo largo del día. Otra ventaja del uso de Séntinel es que la determinación de la TST se realiza de forma directa mediante la descarga de productos satelitales de nivel 2. Por el contrario, la TST mediante Landsat 8 y ECOSTRESS requiere del empleo de algoritmos de ventana dividida que transforman la radiancia espectral atmosférica en temperatura de brillo. Para ello, es necesario conocer de forma precisa la emisividad del suelo y la humedad de la atmósfera. Aunque estos algoritmos se encuentran ampliamente estudiados su empleo pueden resultar en un proceso engorroso u otorgar resultados erróneos o incorrectos.

Recientes estimaciones afirman que la temperatura media del aire será de 1 a 3 °C más alta en un futuro próximo (respecto a 1961-1990), de 3 a 5 °C a mediados de siglo (2040-2069) y de aproximadamente 3,5 a 7 °C a finales de siglo (2070-2100) (Founda *et al.*, 2015; Founda & Santamouris, 2017) presentando mayor significancia sobre la cuenca del mar Mediterráneo (Cramer *et al.*, 2018; Ward *et al.*, 2016). La temperatura en esta zona se está incrementando a un ritmo más rápido que en el resto del planeta por lo que está considerada como una zona de alta vulnerabilidad por el cambio climático. Por tanto, es fundamental investigar sobre nuevas metodologías y sistemas que permitan conocer de una manera rápida, pero a la vez precisa la variabilidad espacio temporal del fenómeno de ICU de las zonas urbanas mediterráneas.

Stewart & Oke (2009) introdujeron el uso de las Zonas Climáticas Locales (ZCL) al objeto de clasificar las características del paisaje y así realizar una adecuada observación de los estudios de clima urbano. Éstas se definen como regiones de cobertura, estructura y actividad humana uniformes que se extienden una superficie variable. Por tanto, cada una de ellas presenta un régimen de temperaturas específico a sus propiedades (Steward & Oke, 2012) que persisten a lo largo del tiempo ya que están asociados con los entornos y ecosistemas homogéneos de las ciudades. Las ZCL se reconocen en la literatura como un elemento importante que permiten caracterizar la cobertura del suelo con imágenes satelitales (Qiu et al., 2018). A día de hoy son numerosos los autores que han llevado a cabo estudios de TST e ICU mediante una clasificación de ZCL con buenos resultados (Brousse *et al.*, 2019; Khamchiangta & Dhakal, 2019; Wang & Ouyang, 2017). Las ZCL se clasifican desde los puntos de vista de la cobertura del tipo de construcción, la cubierta de la superficie del terreno y el material de construcción utilizado (Stewart, 2011; Stewart & Oke 2012).

El objetivo de esta investigación es el de proporcionar un nuevo enfoque que permita monitorear las variaciones espacio temporales de la ICU en las zonas urbanas. Esta se encuentra aplicada sobre las capitales de Andalucía y se han tenido en cuenta las variables físicas, ambientales y climáticas mediante el uso de cinco ZCL distintas: Compacta y abierta de densidad media, compacta y abierta de densidad baja e industrial. Su uso como enfoque para caracterizar el paisaje y la estructura física permitirá extrapolar los datos obtenidos a otras ZCL iguales ubicadas en otras ciudades. Con la ayuda del análisis estadístico, se ha determinado la correlación entre los datos obtenidos y las relaciones entre variables dando validez a los resultados obtenidos. La técnica de análisis denominada Panel de Datos se presenta como un elemento novedoso con respecto a los métodos habitualmente empleados en las investigaciones sobre ICU existentes en la literatura ya que permite la incorporación de un mayor número de datos y variables al admitir la inclusión de los efectos individuales de una determinada zona para obtener los resultados globales. También, permite incluir los valores residuales espaciales de los resultados y eliminar el problema de colinealidad tan habitual entre variables. Estos elementos son habitualmente descuidados por los métodos tradicionales y permiten obtener unos resultados más precisos y completos. Hasta donde sabemos, nuestra investigación es el primer estudio dedicado a las estimaciones de la TST e ICU utilizando imágenes satelitales del área objeto de estudio y uno de los primeros realizados sobre una ciudad española, tras los estudios de Barcelona (Arellano *et al.*, 2018; Lemus *et al.*, 2020) y Madrid (Rasilla *et al.*, 2019).

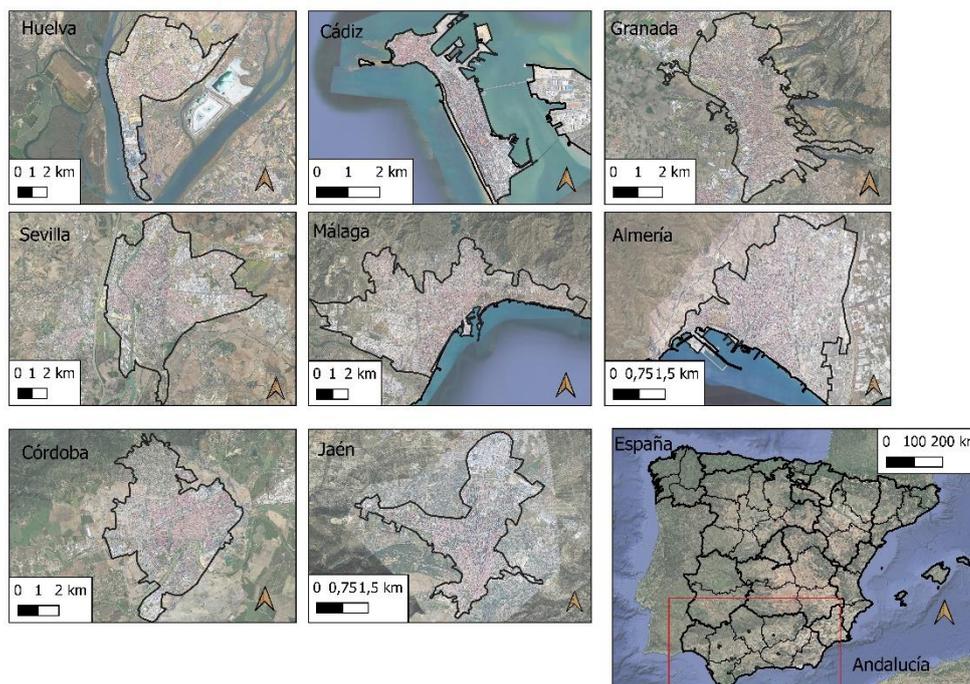
El progreso que presta esta investigación es el de proporcionar un nuevo enfoque de bajo costo, rápido y preciso que permita monitorear las variaciones de la ICU en las zonas urbanas teniendo en cuenta las variables físicas, ambientales y climáticas. Esto permitirá una mejora considerable en la toma de decisiones futuras por parte de los planificadores urbanísticos y administraciones públicas sobre las nuevas zonas de crecimiento de las urbes. Estas podrán incluir medidas de mitigación de los efectos de la ICU convirtiendo estas nuevas zonas en entornos resilientes al cambio climático.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio y fuente de datos

El área objeto de estudio son las ocho capitales de provincia de la región de Andalucía (Figura 1). Sus características de población, superficie, clima, pluviometría, altitud y coordenadas UTM se encuentran en la Tabla 1. Según el Instituto Nacional de Estadística de España (INE), Andalucía cuenta con una superficie de 87.268 km² y una población de 8.427.325 habitantes, siendo la segunda región más extensa y la más poblada de España.

Figura 1. Situación ciudades objeto de estudio



Fuente: Elaboración propia sobre Google Maps.

En la región se desarrollan diferentes climas de fondo local; así y de acuerdo con la clasificación climática de köppen-geiger, las ciudades de Cádiz y Huelva experimentan un clima Mediterráneo Oceánico (Csb), las ciudades de Sevilla, Málaga, Córdoba y Jaén un clima Mediterráneo (Csa) y Granada y Almería un clima Semiárido frío (Bsk).

Tabla 1. Características ciudades de Andalucía

Datos	Sevilla	Córdoba	Jaén	Granada	Huelva	Cádiz	Málaga	Almería
Localización UTM	37.375N, - 6.025W	37.891N, - 4.819W	37.780N, - 3.831W	37.111N, - 3.362W	37.270N, - 6.974W	36.516N, - 6.317W	36.765N, - 4.564W	36.841N, - 2.492W
Ubicación	Interior	Interior	Interior	Interior	Costera	Costera	Costera	Costera
Zona Climática	Csa	Csa	Csa	Csa y Bsk	Csb	Csb	Csa	Bsk
T. media anual (°C)	18,6	17,8	16,9	15,5	17,8	17,9	18,4	17,9
Pluviometría media anual (mm)	576	612	552	450	467	597	520	228
Superficie municipio (km²)	140,8	1253	424	88,8	151,3	13,3	398	296,2
Superficie área urbana (km²)	68,69	31,35	9,43	21,78	14,87	7,34	58,6	14,95
Población en 2019 (Hab)	688.592	325.701	1.129.99	232.462	143.663	116.027	574.654	198.533
Altitud (msnm)	11	106	570	680	24	13	8	16

Fuente: Elaboración propia con datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Instituto Nacional de Estadística (INE) y Catastro.

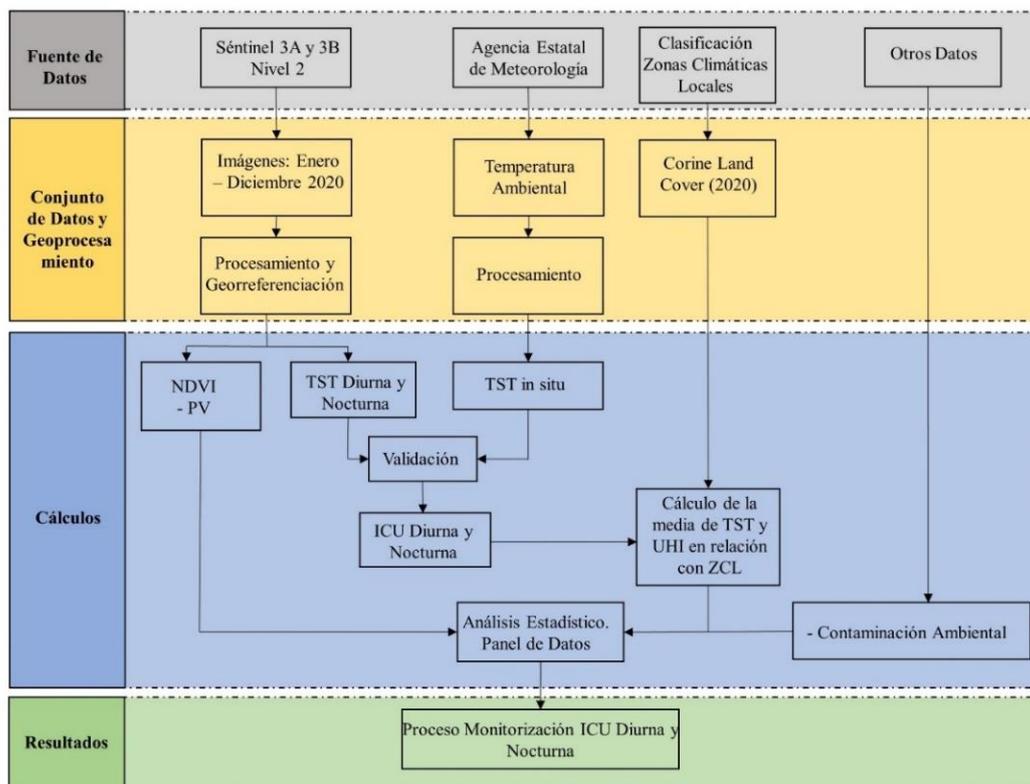
El primero presenta veranos secos con temperaturas suaves e inviernos lluviosos. El clima Csa dispone de veranos secos y calurosos e inviernos húmedos y lluviosos. El clima Bsk está considerado una transición entre el clima mediterráneo y el desértico. Presenta temperaturas más cálidas que los

anteriores con veranos e inviernos secos y cálidos (De Castro *et al.*, 2007). La región se encuentra bordeada de montañas en dirección norte mientras que al sur es adyacente con el mar Mediterráneo y el océano Atlántico. Esta circunstancia permite que la brisa del mar y la tierra impacten fuertemente en las ciudades costeras debido a su ubicación geográfica. El clima de temperaturas suaves y altas precipitaciones de las ciudades de Cádiz y Huelva viene motivado por su cercanía al océano Atlántico. Este presenta una temperatura del agua baja lo que hace que disminuyan las temperaturas ambientales de estas ciudades cuando reciben los vientos dominantes del oeste. La entrada de frentes por el Atlántico permite unos elevados valores de pluviometría en estas zonas. Conforme estos vientos discurren por la depresión del Guadalquivir incrementan su temperatura generando un clima con temperaturas más cálidas en las ciudades de Sevilla y Córdoba. Por el contrario, el mar Mediterráneo presenta aguas muy cálidas en comparación con el océano Atlántico por lo que el papel suavizador de las temperaturas ambientales es menor en las ciudades de Málaga y Almería. Por último, el clima de las ciudades de Jaén y Granada se encuentra fuertemente condicionado por su cercanía a los grandes sistemas montañosos de Andalucía. La altitud media es de 503 metros sobre el nivel del mar y la temperatura promedio anual fluctúa entre los 11 °C del mes de enero y los 26,5 °C del mes de julio con mínimas en invierno de -3 °C y extremas en verano de 44 °C. El número aproximado de horas de sol al año oscila entre las 2800 y 3200 horas dando una media de entre 7,67 y 8,76 horas de sol al día dependiendo de la zona de la región.

2.2 Metodología

La metodología llevada a cabo para el desarrollo de este trabajo de investigación se encuentra descrita en la Figura 2.

Figura 2. Metodología



Fuente: Elaboración propia.

Las imágenes de TST para el año 2020 y de las ciudades objeto de estudio han sido adquiridas a través del Copernicus Open Acces Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA) para el nivel 2 utilizando el software de código abierto QGIS. A continuación, y mediante el plano de coberturas del Corine Land Cover, se han catalogadas según el sistema de ZCL. Las temperaturas satelitales han sido validadas mediante las temperaturas ambientales obtenidas de la Agencia Estatal de Meteorología. Se ha determinado la ICU diurna y nocturna utilizando la herramienta calculadora Ráster del software indicado. El análisis de los datos obtenidos se ha realizado de manera estadística con la ayuda del software especializado para la ciencia de datos, STATA, versión 16.

2.3 Imágenes Séntinel 3

Los satélites Séntinel 3 disponen de un instrumento de barrido de alta resolución denominado radiómetro de la temperatura de la superficie terrestre con el que se pueden obtener las temperaturas de la superficie terrestre. Las imágenes constan de 6 bandas espectrales con resolución de 500 metros (bandas S1 a S6) y tres bandas térmicas (TIRS) que permiten determinar la TST, (bandas S7, S8 y S9) con resolución de 1000 metros.

Los productos térmicos Séntinel 3 presentan 3 niveles de procesamiento, (nivel 0, nivel 1 y nivel 2) aunque solo los dos últimos se encuentran disponibles para la descarga. Los de nivel 1 presentan radiancias y temperaturas de brillo que requieren de algoritmos de ventana dividida para la obtención de la TST. Los productos de nivel 2 incluyen de forma directa y automática la temperatura de la superficie terrestre (TST) junto a otros parámetros asociados como el índice de vegetación normalizada (NDVI), tipo de vegetación (Bioma), fracción vegetal (PV) y el índice de diferencia normalizada (NDBI).

Tabla 2. Imágenes Séntinel 3A empleadas y adquiridas por el servicio Copernicus Open Access Hub

Número	Fecha (yyyymmdd)	Horario UTC (hhmm)	Cobertura cielo (%)	Nombre fichero Sentinel 3A
1	20200107	10:15	0	S3A_SL_2_LST_20200107T101505_LN2_003.SEN3
2	20200120	10:22	5	S3A_SL_2_LST_20200120T102215_LN2_003.SEN3
3	20200215	10:08	6	S3A_SL_2_LST_20200215T100824_LN2_003.SEN3
4	20200226	10:43	11	S3A_SL_2_LST_20200226T104324_LN2_003.SEN3
5	20200310	10:13	6	S3A_SL_2_LST_20200310T101328_LN2_003.SEN3
6	20200327	10:20	12	S3A_SL_2_LST_20200327T102045_LN2_003.SEN3
7	20200408	10:24	0	S3A_SL_2_LST_20200408T102447_LN2_003.SEN3
8	20200429	10:09	1	S3A_SL_2_LST_20200429T100949_LN2_003.SEN3
9	20200507	10:26	13	S3A_SL_2_LST_20200507T102612_LN2_003.SEN3
10	20200520	11:05	5	S3A_SL_2_LST_20200520T110550_LN2_003.SEN3
11	20200608	10:35	3	S3A_SL_2_LST_20200608T103559_LN2_003.SEN3
12	20200624	10:21	1	S3A_SL_2_LST_20200624T102102_LN2_003.SEN3
13	20200706	10:13	1	S3A_SL_2_LST_20200706T101315_LN2_003.SEN3
14	20200718	10:21	0	S3A_SL_2_LST_20200718T102145_LN2_003.SEN3
15	20200810	10:09	0	S3A_SL_2_LST_20200810T100906_LN2_003.SEN3
16	20200823	10:34	0	S3A_SL_2_LST_20200823T103421_LN2_003.SEN3
17	20200909	10:43	0	S3A_SL_2_LST_20200909T104345_LN2_003.SEN3
18	20200927	10:12	4	S3A_SL_2_LST_20200927T101214_LN2_003.SEN3
19	20201002	10:25	6	S3A_SL_2_LST_20201002T102527_LN2_003.SEN3
20	20201025	10:17	8	S3A_SL_2_LST_20201025T101751_LN2_003.SEN3
21	20201103	10:34	3	S3A_SL_2_LST_20200311T103419_LN2_003.SEN3
22	20201128	10:45	5	S3A_SL_2_LST_20201128T104534_LN2_003.SEN3
23	20201206	10:02	4	S3A_SL_2_LST_20201206T100231_LN2_003.SEN3
24	20201227	10:23	9	S3A_SL_2_LST_20201227T102304_LN2_003.SEN3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Imágenes Séntinel 3B empleadas y adquiridas por el servicio Copernicus Open Access Hub

Número	Fecha (yyyymmdd)	Horario UTC (hhmm)	Cobertura cielo (%)	Nombre fichero Sentinel 3B
1	20200107	20:25	0	S3B_SL_2_LST_20200107T202505_LN2_003.SEN3
2	20200120	20:32	5	S3B_SL_2_LST_20200120T203215_LN2_003.SEN3
3	20200215	20:18	6	S3B_SL_2_LST_20200215T201824_LN2_003.SEN3
4	20200226	20:43	11	S3B_SL_2_LST_20200226T204324_LN2_003.SEN3
5	20200310	20:22	6	S3B_SL_2_LST_20200310T202228_LN2_003.SEN3
6	20200327	20:25	12	S3B_SL_2_LST_20200327T202545_LN2_003.SEN3
7	20200408	20:27	0	S3B_SL_2_LST_20200408T202747_LN2_003.SEN3
8	20200429	20:19	1	S3B_SL_2_LST_20200429T201949_LN2_003.SEN3
9	20200507	20:36	13	S3B_SL_2_LST_20200507T203612_LN2_003.SEN3
10	20200520	21:15	5	S3B_SL_2_LST_20200520T211550_LN2_003.SEN3
11	20200608	20:45	3	S3B_SL_2_LST_20200608T204559_LN2_003.SEN3
12	20200624	20:11	1	S3B_SL_2_LST_20200624T201102_LN2_003.SEN3
13	20200706	20:18	2	S3B_SL_2_LST_20200706T201815_LN2_003.SEN3
14	20200718	20:43	0	S3B_SL_2_LST_20200718T204345_LN2_003.SEN3
15	20200810	20:22	0	S3B_SL_2_LST_20200810T202206_LN2_003.SEN3
16	20200823	20:19	0	S3B_SL_2_LST_20200823T201921_LN2_003.SEN3
17	20200909	20:36	0	S3B_SL_2_LST_20200909T203645_LN2_003.SEN3
18	20200927	21:15	3	S3B_SL_2_LST_20200927T211514_LN2_003.SEN3
19	20201002	20:45	5	S3B_SL_2_LST_20201002T204527_LN2_003.SEN3
20	20201025	20:21	6	S3B_SL_2_LST_20201025T202151_LN2_003.SEN3
21	20201103	20:23	9	S3B_SL_2_LST_20200311T202319_LN2_003.SEN3
22	20201128	20:56	8	S3B_SL_2_LST_20201128T205634_LN2_003.SEN3
23	20201206	20:05	4	S3B_SL_2_LST_20201206T200531_LN2_003.SEN3
24	20201227	20:12	9	S3B_SL_2_LST_20201227T201204_LN2_003.SEN3

Fuente: Elaboración propia.

Andalucía se encuentra bajo la ruta de los satélites Séntinel 3A y 3B. El horario habitual de paso del primero sobre la comunidad es entre las 10:00 y las 11:00 horas mientras que el horario del segundo es entre las 20:00 y las 21:00 horas. Las imágenes elegidas para el estudio se corresponden con veinticuatro días distribuidos de forma homogénea entre los meses de enero y diciembre del año 2020. A lo largo de este intervalo de tiempo se han empleado un total de 48 imágenes, 24 correspondientes al Séntinel 3A y 24 al Séntinel 3B (Tablas 2 y 3). Todas ellas disponen de un índice de nubosidad inferior al 15 % al objeto de aumentar la exactitud en la obtención de la TST y el posterior cálculo de la ICU. Las imágenes empleadas han sido adquiridas a través del Copernicus Open Access Hub de la ESA para el nivel 2.

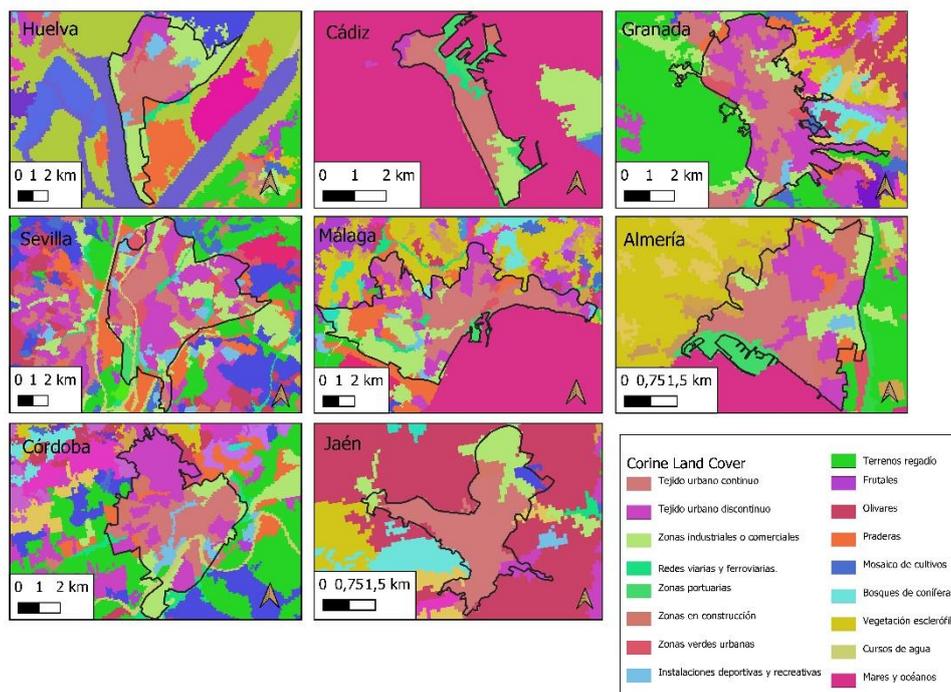
Tras la descarga de las imágenes, la resolución espacial de las bandas 8 y 9 se reclasificaron a una resolución de 100 metros y se georreferenciaron utilizando el sistema de proyección ETRS89/UTM Zona 30N. Tanto la reclasificación como la corrección atmosférica en bandas se efectuó mediante el Toolbox (S3TBX) bajo el entorno de software de código abierto Séntinel Application Platform (SNAP), versión 7.0.0.

2.4 Mapeado de zonas climáticas locales

Las pautas para el mapeo y clasificación de las ZCL seguidas en esta investigación se basaron en el inventario de cobertura de suelo Corine Land Cover (CLC) del año 2020 (Figura 3) siguiendo la propuesta de clasificación de ZCL de los autores Steward & Oke (2012). Tras identificar las zonas del CLC identificadas como tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo y zona industrial, se delimitaron en su interior 5 tipologías de ZCL: Compacta de media densidad (Mezcla densa de edificios de entre 3 y 9 plantas. Pocos o ningún árbol. Cobertura terrestre en su mayoría pavimentada con asfalto, piedra y materiales de construcción), compacta de baja densidad (Mezcla densa de edificios

de entre 1 y 3 plantas. Pocos o ningún árbol. Cobertura terrestre en su mayoría pavimentada con asfalto, piedra y materiales de construcción), abierta de media densidad (Edificios de mediana altura (3 y 9 plantas). Abundancia de cobertura suelo permeable y zonas verdes con alternancia de cobertura pavimentada), abierta de baja densidad (Edificios de baja altura (1 y 3 plantas). Abundancia de cobertura suelo permeable y zonas verdes con alternancia de cobertura pavimentada) e industrial (Estructuras industriales de baja y media altura con pocas o ninguna zona verde. Predominio de cobertura impermeables con pavimentos).

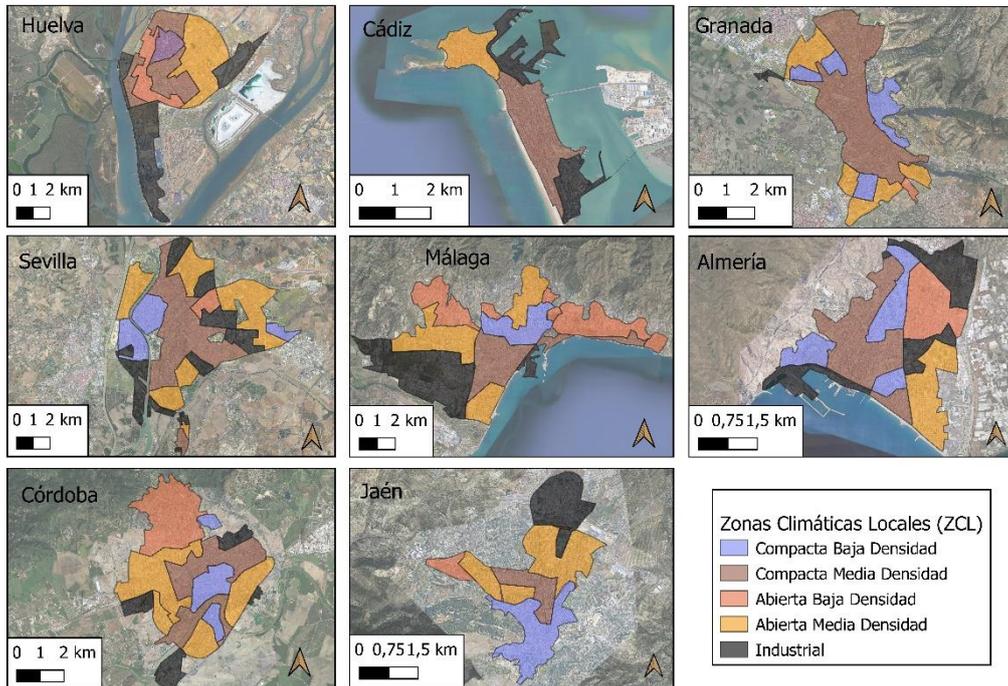
Figura 3. Zonificación Zonas Climáticas Locales según Corine Land Cover



Fuente: Elaboración propia sobre documentación Corine Land Cover.

Los pasos llevados a cabo en esta investigación para la elección de las ZCL son los siguientes: (1): Recopilación de los metadatos de la ciudad empleando como base el CLC y las coberturas reales mediante imágenes de alta resolución de Google Street View (Yang *et al.*, 2019) y satelitales Séntinel 2. (2): Definición del área de fuente térmica teniendo en cuenta los parámetros de orientación, radiación solar, climatología y viento. (3): Comparación visual del mapa ZCL del CLC con las imágenes de alta resolución. (4): Selección de la ZCL. Según los datos obtenidos en los puntos 1, 2 y 3 se han catalogado las ZCL teniendo en cuenta la mayor coincidencia, no necesariamente exacta, de los sitios con las clases de ZCL. Los valores medios de las propiedades de cada ZCL se compararon con los rangos de valores estándar proporcionados por Steward & Oke (2012). Una comparación cualitativa y cuantitativa de la cobertura del suelo sobre 25 puntos de referencia elegidos al azar sobre cada ciudad donde se incluían superficies impermeables, permeables y naturales de acuerdo con el inventario CLC y la cobertura actualizada de Google Street View (Yang *et al.*, 2019) e imágenes satelitales Séntinel 2 mostró que tan solo un 5% no coincidía con el inventario CLC. Esto supone una coincidencia con el inventario del 95%. No obstante, este porcentaje de error fue aplicado de las correcciones adecuadas de cobertura e incluido en la ZCL correspondiente. En líneas generales, las ZCL de nuestra investigación (Figura 4) se adecuan a las imágenes satelitales y de Google Street View y presentan valores que se encuentran ubicados dentro de los límites establecidos por los autores citados.

Figura 4. Clasificación zonas climáticas locales ciudades objeto de estudio



Fuente: Elaboración propia sobre Google Maps.

2.5 Estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre

Los productos Séntinel 3 con nivel de procesamiento 1 requieren del empleo de algoritmos de ventana dividida para la recuperación de la TST. Estos se basan en el concepto de absorción diferencial (McMillin, 1975) en el que mediante la diferencia entre las dos bandas TIRS en sus longitudes de onda permiten corregir los efectos atmosféricos producidos sobre la señal. Estos dependen de la emisividad de la superficie terrestre que se puede obtener de múltiples formas (Ruescas *et al.*, 2016). El algoritmo empleado de forma interna por el producto oficial de Séntinel 3A y 3B nivel 2 es el siguiente (Remedios & Emsley, 2012):

$$TST = a_{f,i,pw} + b_{f,i} (T_{11} - T_{12})^{\frac{1}{\cos(\frac{\theta}{m})}} + (b_{f,i} + c_{f,i}) T_{12}, \tag{1}$$

donde TST es la temperatura de la superficie en K, a, b y c son coeficientes dependientes de la cubierta vegetal y el bioma, T_{11} y T_{12} son las temperaturas de brillo de las bandas 8 y 9 de Séntinel 3, respectivamente. θ es el ángulo de visión cenital del satélite y m es una variable dependiente de θ (Remedios & Emsley, 2012; Yang *et al.*, 2020b).

En nuestra investigación se han empleado los productos Séntinel 3 con nivel de procesamiento 2. Estos permiten determinar la TST de forma directa ya que la aplicación del algoritmo (1) lo realiza internamente. Por tanto, la TST puede ser obtenida de forma directa con la ayuda del software de código abierto Séntinel Application Platform (SNAP) versión 7.0.0. Las imágenes satelitales indicadas en las tablas 1 y 2 del anexo se ha determinado de forma directa la TST sobre las capitales de Andalucía. Posteriormente, estas imágenes fueron exportadas en formato Geotiff al software de código abierto QGIS, versión 3.22.6 al objeto de determinar la variabilidad espacio temporal del fenómeno de ICU sobre las ciudades descritas.

2.6 Temperaturas ambientales

Las TST obtenidas mediante imágenes satelitales requieren de un proceso de verificación que permita validar los resultados obtenidos. En las últimas décadas, el método de comparación con las temperaturas ambientales está tomando importancia como sistema de validación de los datos obtenidos mediante imágenes TST (Avdan & Jovanovska, 2016; Gallo *et al.*, 2011; Liu & Zhang, 2011; Mukherjee & Singh, 2020; Rongali *et al.*, 2018). Este consiste en comparar la TST recuperada con la temperatura ambiental obtenida de estaciones meteorológicas o sondas de temperatura ubicadas cerca del suelo (1-2 metros). En nuestra investigación, y al objeto de validar las TST obtenidas mediante imágenes satelitales Séntinel 3, se han adquirido los valores de temperatura ambiental de las estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) durante las horas de paso de los satélites. Esta dispone de unas 800 estaciones de medición repartidas a lo largo de todo el territorio. Las mediciones de temperatura ambiental se realizan a una altura de 1,5 metros con respecto al suelo. Al objeto de minimizar el impacto del entorno rural en el posterior cálculo de la ICU se han seleccionado para cada ciudad estudiada aquellas que se encuentran ubicadas en zonas rurales y, por tanto, rodeadas de tierras de cultivo y con escasas superficies impermeables. Este criterio de selección ha reportado impactos estadísticamente significativos en investigaciones similares llevadas a cabo por otros autores (Jiang *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2017).

Las estaciones rurales de esta investigación se han seleccionado teniendo en cuenta las siguientes consideraciones (Wang *et al.*, 2017): 1- El % de superficies impermeables alrededor de la estación debe ser inferior al 30% y el % de tierra de cultivo mayor a 65. 2- Las diferencias de elevación superficial entre las estaciones y las ciudades deben ser inferior a 30 m. 3- Las estaciones rurales deben estar fuera de las principales áreas urbanas. En este sentido y siguiendo las indicaciones establecidas se ha seleccionado una estación meteorológica rural en cada ciudad cuyas características y ubicación se pueden consultar en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de las estaciones meteorológicas de las ciudades

Datos	Sevilla	Córdoba	Jaén	Granada	Huelva	Cádiz	Málaga	Almería
Nombre de la Estación	Aeropuerto		Ciudad de Jaén	Aeropuerto	Ciudad Huelva	Base Naval Rota	Aeropuerto	
Distancia estación - centro de la ciudad (Km)	8.2	10.8	3	16	4	8.5	7	12
Superficie Impermeable Cercana (%)	16	12	15	10	23	20	15	3
Altitud (m)	34	90	580	567	19	2	5	21
UTM	37.25N, -5.52W	37.50N, -4.50w	37.46N, -3.48W	37.11N, -3.47W	37.16N, -6.54W	36.38N, -6.19W	36.39N, -4.28W	36.50N, -2.21W

Fuente: Elaboración propia.

2.7 Estimación de la Isla de Calor Urbana

Según la literatura existente sobre el fenómeno de ICU, esta se define como la diferencia de temperaturas entre las mediciones dentro del área urbana y las áreas rurales ubicadas en las zonas exteriores de la ciudad tomadas al mismo tiempo (Oke, 1987). Por tanto, la ICU puede determinarse según la ecuación 2:

$$ICU = Turban - Trural \quad (2)$$

Con las imágenes de las TST de Séntinel 3A y 3B exportadas al software QGIS y con la ayuda del comando calculadora ráster se procedió a la determinación de la ICU de las urbes investigadas empleando la ecuación 2. Los valores TST urbanos se corresponden con los valores de los píxeles ubicados dentro del área urbana. Estos fueron reclasificados según lo indicado en el punto 2.3 a una resolución de 100 metros. Las zonas rurales elegidas para derivar la ICU a través de las diferencias de temperaturas con las zonas urbanas se corresponden a las zonas indicadas en la Tabla 4 que se corresponden con los puntos donde la AEMET tiene una estación meteorológica de ámbito rural.

2.8 NDVI y PV

Al igual que la TST, los valores del Índice Normalizado de Vegetación Normalizada (NDVI) y Porción Vegetal (PV) han sido obtenidos mediante los algoritmos de cálculo desarrollados y aplicados por la Agencia Espacial Europea (AEE) sobre los productos oficiales de nivel 2. No se ha podido obtener el NDVI en horario nocturno ya que la disminución de la luz solar durante el atardecer no permite la obtención de este valor. Los valores obtenidos fueron preprocesados utilizando la caja de herramientas de SNAP Séntinel 3 y exportados al software QGIS.

2.9 Contaminación

Los datos de contaminación ambiental diaria han sido obtenidos de la red de vigilancia ambiental de la Junta de Andalucía. Esta dispone en cada ciudad de entre dos y cuatro estaciones ambientales siendo el valor medio de estas el tomado para nuestra investigación.

2.10 Estrategia de análisis

El objetivo del análisis estadístico es el de recopilar e interpretar los datos obtenidos al objeto de descubrir patrones, tendencias y dar validez a los resultados obtenidos. El análisis de los datos obtenidos en este estudio se ha realizado de manera estadística con la ayuda del software especializado para la ciencia de datos, STATA, versión 15 mediante la técnica del Panel de Datos. Este es un método de uso habitual en la literatura que incluye modelos de relación multivariantes (Alcock *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2011; Fang & Tian, 2020) incluyendo un mayor número de datos en el análisis lo que incrementa los grados de libertad mientras que reduce el inconveniente de la colinealidad entre las variables (Smith & Hsiao, 1988).

Al tener en cuenta los efectos individuales de cada individuo permite que la función final obtenida para el conjunto de individuos sea totalmente distinta a la que se hubiera obtenido mediante la utilización de otras técnicas de análisis estadístico (Labra, 2014). Se encuentra especialmente indicado para estudios de series temporales con múltiples individuos y variables cuantitativas donde existe la posibilidad de que cambien las variables explicativas en las relaciones entre individuos (Seto & Kaufmann, 2003). Esta circunstancia hace que este sistema de análisis se adapte por completo con los datos obtenidos en nuestro estudio de investigación.

La implantación de este método de análisis estadístico en nuestro modelo ha conllevado dos fases (Chen *et al.*, 2011): En primer lugar, y mediante la prueba de Hausman, se determinarán si los efectos del análisis son fijos o aleatorios. A continuación, se procederá a la estimación del modelo en base a los resultados obtenidos en los Test de Wooldridge y Wald. Existen tres métodos de cálculo: método de cuadrados ordinarios (MCO), mínimos cuadrados generalizados (MCG) y método de estimadores intragrupos (Labra, 2014).

El primero, y aunque ha sido utilizado años atrás de forma amplia, no permite el estudio de los efectos de cada individuo con el paso del tiempo por lo que los resultados pueden otorgar estimadores sesgados.

El segundo, es considerado como una extensión más eficiente del primero donde se asume que los efectos individuales no se encuentran correlacionados con las variables explicativas del modelo. En este caso, los efectos individuales se suman al termino de error, siendo la expresión de cálculo la siguiente:

$$Y_{it} = \beta X_{it} + (\alpha_i + \mu_{it}), \quad (3)$$

donde, α_i son los efectos individuales, μ_{it} es el error del modelo, X son las variables explicativas, i =individual y t =tiempo.

El último método asume que los efectos individuales se encuentran correlacionados con las variables explicativas por lo que trata el efecto individual de forma separada al termino de error, siendo la expresión de cálculo la siguiente:

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta X_{it} + \mu_{it}, \quad (4)$$

donde, α_i son los efectos individuales, μ_{it} es el error del modelo, X son las variables explicativas, i =individual y t =tiempo.

3. Resultados

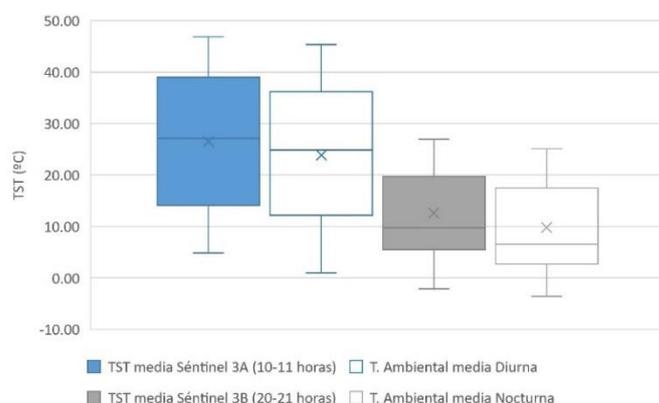
3.1 *Temperatura superficie terrestre y temperaturas ambientales*

Los estadísticos de la TST obtenida mediante los productos Séntinel 3A y 3B en todas las ciudades investigadas y la temperatura ambiental obtenida mediante las estaciones rurales seleccionadas se encuentran reflejados en la Figura 5. En líneas generales, los productos Séntinel 3A y 3B presentan valores medios anuales más altos que las temperaturas ambientales. En concreto, por la mañana los valores medios más altos de TST se obtienen mediante el producto oficial Séntinel 3A (26,48 °C) mientras que la temperatura media ambiental ha sido más baja (23,82 °C). Por la noche, los valores medios más altos de TST vuelven a obtenerse mediante el producto oficial Séntinel 3B (12,61 °C) mientras que la temperatura ambiental media ha sido más baja (9,78 °C).

Con respecto a las diferencias medias obtenidas entre las temperaturas han sido de 2.66 °C para Séntinel 3A y de 2.83 °C para Séntinel 3B. No obstante, en la Figura 5 se puede observar como los datos de TST diurnos presentan una asimetría positiva concentrándose los valores en el tercer cuartil. Por el contrario, los datos de TST nocturnos presentan una asimetría negativa concentrándose los valores en el primer cuartil.

Tanto los datos diurnos como nocturnos presentan una mayor variabilidad de los datos en el 25% de los valores bajos, siendo mayor esta diferencia en los valores nocturnos. Los valores de desviación estándar para Séntinel 3A y 3B han sido de 12,18 °C y 8,26 °C, respectivamente. El error medio cuadrático (RMSE) y el sesgo medio del error (MBE) ha sido de 2,82 °C y -0,1127 °C para Séntinel 3A y de 3,11 °C y 0,284 °C para Séntinel 3B.

Figura 5. Estadísticos TST media Séntinel 3A y 3B – Temperaturas ambientales de todas las ciudades



Fuente: Elaboración propia.

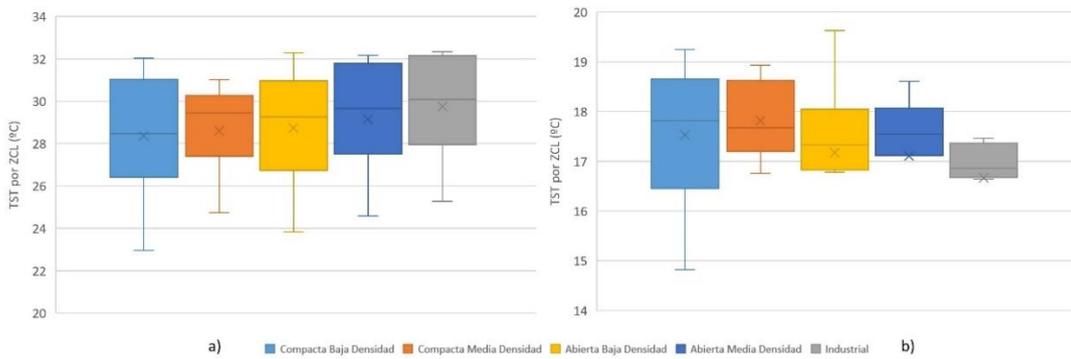
3.2 Temperaturas Superficie Terrestre en Zonas Climáticas Locales.

Los estadísticos de la TST por cada ZCL obtenidos mediante el uso de los productos Séntinel se encuentran reflejados en la Figura 3a (Séntinel 3A) y 3b (Séntinel 3B). En la Figura 6 (a) se observa que las TST diurnas medias anuales obtenidas por cada ZCL presentan valores muy similares, aunque con algunas diferencias: compacta baja densidad (28,36 °C), compacta media densidad (28,61 °C), abierta baja densidad (28,73 °C), abierta media densidad (29,14 °C) e industrial (29,74 °C). Se observa como las zonas industriales presentan las TST medias anuales más altas de las urbes seguidas de las zonas abiertas y dentro de estas, las de media densidad. Por el contrario, con menor TST se presentan las zonas compactas y dentro de estas, las de baja densidad. La diferencia media anual entre las zonas compactas y abiertas ha sido de 0,45 °C mientras que la diferencia media anual obtenida entre las zonas de mayor y menor temperatura ha sido de 1,38 °C correspondiéndose entre las zonas industriales y las zonas compactas de baja densidad. Los valores de TST diurnos presentan una asimetría positiva en todas las ZCL concentrándose los valores en el tercer cuartil.

En la Figura 6 (b) se encuentran representadas las TST nocturnas medias anuales obtenidas por cada ZCL también presentan valores muy similares, aunque con algunas diferencias: compacta baja densidad (17,53 °C), compacta media densidad (17,81 °C), abierta baja densidad (17,17 °C), abierta media densidad (17,20 °C) e industrial (16,66 °C). Se observa como las zonas compactas presentan las TST medias anuales más altas y dentro de estas, las de media densidad. Por el contrario, con menor TST se presentan las zonas industriales y las zonas abiertas y dentro de estas últimas, las de baja densidad. La diferencia media anual entre las zonas compactas y abiertas ha sido de 0,49 °C mientras que la diferencia media anual obtenida entre las zonas de mayor y menor temperatura ha sido de 1,15 °C correspondiéndose entre las zonas compactas de media densidad y las zonas industriales. Los valores de TST nocturnos presentan una asimetría positiva en todas las ZCL, salvo en las compactas de media densidad, concentrándose los valores en el tercer cuartil. En esta zona se produce una asimetría negativa, concentrándose los valores en el primer cuartil.

En la figura 6 se observa cómo tanto los datos de TST de Séntinel 3A y 3B para las LCZ presentan una mayor variabilidad de los datos en el 25% de los valores bajos, siendo mayor esta diferencia en los TST diurnos. Esta circunstancia se refleja en la diferencia de temperaturas obtenidas entre la zona climática local más cálida y más fría que llega a ser mayor durante el día.

Figura 6. TST Séntinel 3A (10-11 horas) y 3B (20-21 horas) por zona climática local

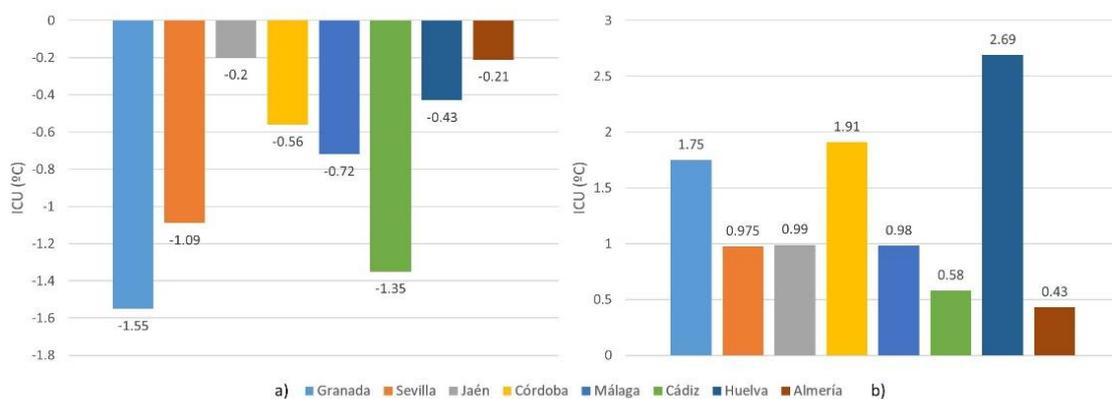


Fuente: Elaboración propia.

3.3 Isla de calor urbana por ciudades

Los estadísticos medios anuales de la ICU obtenida mediante imágenes Séntinel se encuentran reflejados en la Figura 7a para Séntinel 3A y 7b para Séntinel 3B. Resulta necesario recordar que las TST obtenidas de forma satelital son lecturas puntuales (Séntinel 3A: entre las 10-11 horas y Séntinel 3B: entre las 20-21 horas) no siendo representativas de todas las horas de la mañana y de la tarde. En la Figura 4a se encuentran representadas las intensidades medias de ICU obtenidas durante el periodo de estudio para cada ciudad mediante imágenes Séntinel 3A. Las intensidades medias diurnas de los valores obtenidos de ICU de todas las urbes presentan valores negativos, obteniendo un valor medio de $-0,76\text{ }^{\circ}\text{C}$. No obstante, las ciudades de interior presentan una intensidad media anual ($-0,85\text{ }^{\circ}\text{C}$) superior a las ciudades costeras ($-0,67\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esta situación revela que durante las mañanas las ciudades analizadas se encuentran a temperaturas menores que las zonas rurales circundantes. Esta situación ha sido estudiada anteriormente por otros autores llegando a identificarla como isla de enfriamiento urbano (Saaroni *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020a). Durante las primeras horas de la mañana la radiación solar es mayor en estas zonas en contraposición a las del interior de la ciudad debido a las sombras que generan los edificios y árboles, al sistema heterogéneo de paramentos impermeables y gran absorción térmica y a las tasas de enfriamiento que experimentan las zonas con vegetación y las tasas de calentamiento de las zonas con escasez de vegetación y suelos desnudos.

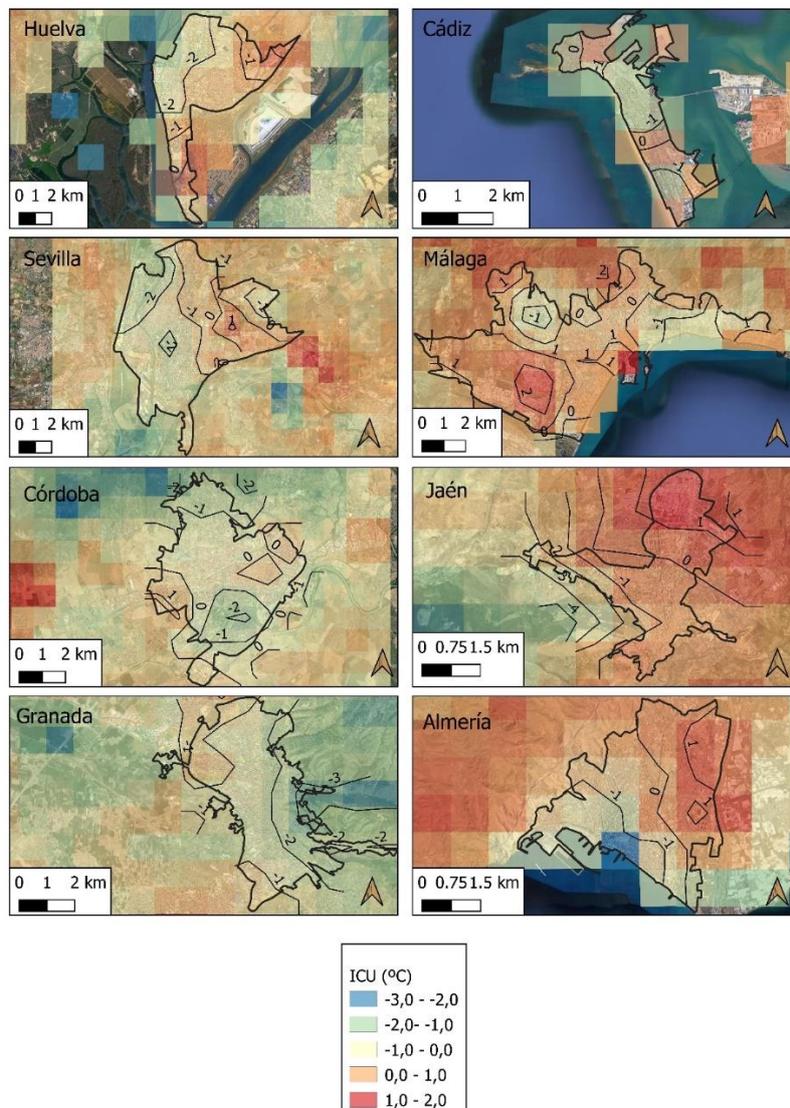
Figura 7. ICU Séntinel 3A (a) (10-11 horas) y 3B (b) (20-21 horas) por ciudades



Fuente: Elaboración propia.

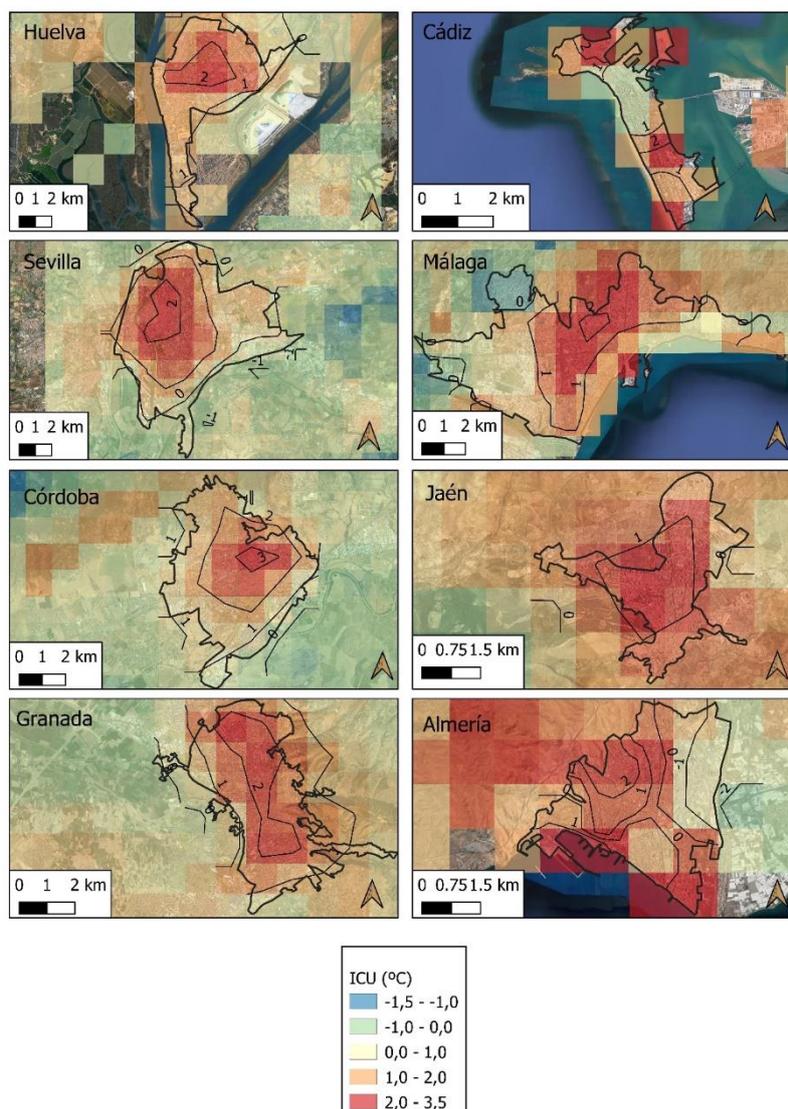
En la Figura 7b se encuentran representadas las intensidades medias de ICU obtenidas durante el periodo de estudio para cada ciudad mediante imágenes Séntinel 3B. Las intensidades medias nocturnas de los valores obtenidos de ICU de todas las urbes presentan valores positivos, obteniendo un valor medio de +1,29 °C. No obstante, las ciudades de interior presentan una intensidad media anual (+1,41 °C) superior a las ciudades costeras (+1,02 °C). Esta situación revela que durante las noches las ciudades analizadas se encuentran a temperaturas mayores que las zonas rurales circundantes. Esto es debido a que una vez que se oculta el sol, las zonas rurales tienden a enfriarse rápidamente mientras que en las zonas urbanas el calor se conserva. El empleo de materiales de construcción impermeables de alta absorción térmica en el interior de las urbes hace que estas, tras ocultarse el sol, desprendan el calor absorbido durante el día. Esta situación ha sido estudiada anteriormente por otros autores llegando a identificarla como isla de calor urbano (Saaroni *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020a). En las Figuras 8 y 9 de la documentación complementaria se encuentran representadas las ICU medias anuales diurnas y nocturnas por cada ciudad estudiada.

Figura 8. ICU diurna media anual ciudades



Fuente: Elaboración propia sobre QGIS.

Figura 9. ICU nocturna media anual ciudades



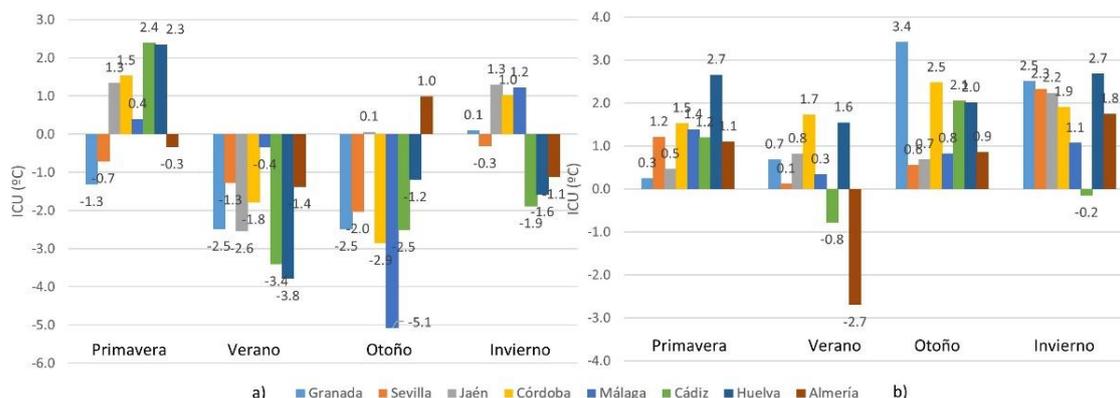
Fuente: Elaboración propia sobre QGIS.

3.4 Estacionalidad de la Isla de Calor Urbana

Numerosos autores alertan de la variabilidad estacional en la intensidad de la ICU de una ciudad durante las distintas estaciones del año (Zhou *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2020; Fu & Weng, 2018). Los resultados obtenidos en esta investigación también reportan esta variabilidad entre estaciones tanto para los datos diurnos obtenidos con Séntinel 3A como para los datos nocturnos obtenidos con Séntinel 3B. Así, en la Figura 10 se presentan los resultados de las ICU de las urbes investigadas obtenidas mediante Séntinel 3A (10a) y Séntinel 3B (10b). Se puede observar como a lo largo del año se produce una variabilidad importante con respecto a la intensidad de la ICU. Con respecto a las ICU medias diurnas de las ciudades se observa como las intensidades máximas se producen en las estaciones de verano y otoño mientras que las intensidades menores se producen durante las estaciones de primavera e invierno. Esto podría ser debido a que durante estas últimas las ciudades

reciben menor radiación solar calentando menos los paramentos impermeables y minimizando el efecto de ICU. Por el contrario, y durante las estaciones de verano y otoño la radiación solar en las ciudades del sur de España es mayor, produciendo un mayor calentamiento de los materiales impermeables que producen posteriormente un desprendimiento de calor a la atmósfera. Los valores medios diurnos de ICU de las ocho ciudades obtenidos por cada estación han sido de: primavera (0,68 °C), verano (2,15 °C), otoño (1,91 °C) e invierno (-0,16 °C).

Figura 10. Estacionalidad de la ICU diurna (a) (10-11 horas) y nocturna (b) (20-21 horas)



Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a las ICU medias nocturnas de las ciudades se observa como las intensidades máximas se producen en las estaciones invierno y otoño mientras que las intensidades menores se producen durante las estaciones de verano y primavera. Esto podría ser debido a que el calor antropogénico proveniente de los sistemas de calefacción, transporte, contaminación e industria son mayores durante los periodos de temperaturas más bajas, es decir, durante los meses incluidos en las estaciones de invierno y otoño. Por otro lado, es importante indicar que durante el invierno y con situaciones anticiclónicas es habitual que se produzca el fenómeno identificado como inversión térmica. Esta mantiene las concentraciones de contaminación atmosférica y favorece los desarrollos de ICU en las zonas urbanas.

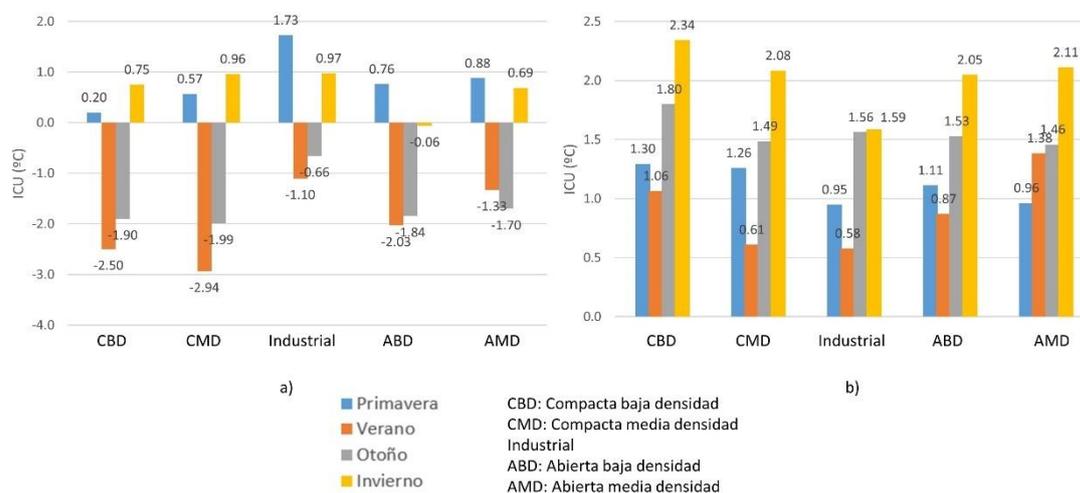
Los valores medios nocturnos de ICU de las ocho ciudades obtenidos por cada estación han sido de: primavera (1,23 °C), verano (0,21 °C), otoño (1,63 °C) e invierno (1,79 °C). En la figura 3b se puede observar como las ciudades costeras de Almería y Cádiz presentan valores medios negativos de ICU durante el verano y positivos durante el resto del año. Los cambios en la velocidad y dirección del viento sobre todo en las ciudades costeras presentan fuertes impactos en las temperaturas ambientales y en la variabilidad de la ICU de las urbes.

3.5 Isla de calor urbana por zonas climáticas locales

Los estadísticos medios anuales de la ICU obtenida mediante imágenes Séntinel se encuentran reflejados en la figura 11a para Séntinel 3A y 11b para Séntinel 3B. En la figura 11a se encuentran representadas las intensidades medias de ICU por estaciones y para cada ZCL obtenidas mediante imágenes Séntinel 3A. Durante la primavera las mayores intensidades se producen en las zonas industriales (1,73 °C) y en las zonas abiertas (0,82 °C), en contraposición con las zonas compactas que presentan menor intensidad (0,39 °C). Durante el verano y el otoño son las zonas compactas las que presentan mayor intensidad de ICU (-2,72 °C) y (-1,95 °C), respectivamente, en contraposición con las zonas abiertas, (-1,68 °C) y (-1,77 °C). Dentro las zonas compactas, las zonas de media densidad son

las que presentan mayores intensidades de ICU, (-2,94 °C) y (-1,99 °C), respectivamente. Durante el invierno, las mayores intensidades de ICU se vuelven a producir en las zonas industriales (0,97 °C) y en las zonas compactas (0,86 °C) en contraposición con las zonas abiertas (0,32 °C). Dentro de las zonas compactas, las de media densidad presentan una intensidad mayor (0,96 °C).

Figura 11. ICU Séntinel 3A y 3B por zonas climáticas locales



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11b se encuentran representadas las intensidades medias de ICU por estaciones y para cada ZCL obtenidas mediante imágenes Séntinel 3B. Durante la primavera las mayores intensidades de ICU se producen en las zonas compactas (1,28 °C), en contraposición con las zonas abiertas que presentan menor intensidad (1,04 °C) y las zonas industriales (0,95 °C). Durante el verano son las zonas abiertas las que presentan mayor intensidad de ICU (1,13 °C), respectivamente, en contraposición con las zonas compactas (0,84 °C) y las zonas industriales (0,58 °C).

Dentro las zonas abiertas, las zonas de media densidad son las que presentan mayores intensidades de ICU, (1,38 °C), en contraposición con las zonas de baja densidad (0,87 °C). Durante el otoño y el invierno, las mayores intensidades de ICU se producen en las zonas compactas (1,65 °C) y (2,21 °C), respectivamente. Dentro de estas, son las zonas de baja densidad las que presentan mayor intensidad (1,80 °C) y (2,34 °C). En contraposición, las zonas industriales presentan una ICU de 1,56 °C en otoño y 1,59 °C en invierno. Las zonas abiertas presentan una ICU de 1,50 °C en otoño y 2,06 °C en invierno.

3.6 Análisis Estadístico

En primer lugar y al objeto de validar los datos obtenidos, se ha procedido a determinar los coeficientes de ajuste lineal R^2 entre la TST obtenida mediante imágenes Séntinel 3A y 3B y las temperaturas ambientales adquiridas en la AEMET. Los resultados alcanzados se consideran adecuados ya que presentan valores por encima de 0.97, (Séntinel 3A: $R^2=0.994$ y Séntinel 3B: $R^2=0.975$). Los valores de desviación estándar (SD), sesgo medio del error (MBE) y el error medio cuadrático (RMSE) obtenidos para el conjunto de datos de Séntinel 3A ha sido de: $SD=12.18$ °C; $MBE=-0,1127$ °C y $RMSE=2,82$ °C; mientras que para los datos de Séntinel 3B los valores obtenidos ha sido de: $SD=8.26$ °C; $MBE=-0,284$ °C y $RMSE=3,11$ °C. Estos valores indican una buena concordancia entre los valores analizados y se consideran estadísticamente significativos por encima del 97%.

A continuación, se procede a realizar el análisis estadístico de los factores que pueden influir en la ICU diurna y nocturna utilizando el método del Panel de Datos. En primer lugar, es necesario determinar si el procedimiento de cálculo debe realizarse mediante efectos fijos o aleatorios. Para ello, se ha implementado la prueba de Hausman obteniendo que es necesario utilizar el panel de datos de efectos aleatorios robustos para los datos obtenidos tanto en la primera fase como en la segunda fase del análisis. Para el desarrollo del Panel de Datos se utilizó el método de Mínimos Cuadrados Generalizados (MCG) mediante la ecuación 3. Los resultados del análisis de los datos de ICU diurna y nocturna obtenidos mediante Séntinel 3A y 3B, respectivamente se indican en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados Panel de Datos Séntinel 3A y 3B

Datos	Séntinel 3A			Séntinel 3B		
	β	p	sd	β	p	sd
TST	-0,0050	0,021*	0,2183	-0,0568	0,006**	0,02054
NDVI	-1,5587	0,065	5,2086			
PV	5,4243	0,411	6,6017	-7,3379	0,003**	2,4859
Co ₂	-0,0031	0,001**	0,0009	-0,0010	0,044*	0,0005

Fuente: Elaboración propia. Notas: B: Coeficiente; sd: Desviación estándar; Errores estándar robustos: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ y *** $p < 0,001$

Los resultados del análisis estadístico de los datos de ICU obtenidos mediante imágenes Séntinel 3A indican que se produce una relación estadísticamente significativa y negativa al 99% con la variable Co₂ y estadísticamente significativa del 95% con la variable TST. Los resultados del análisis estadístico de los datos de ICU obtenidos mediante imágenes Séntinel 3B indican que se produce una relación estadísticamente significativa y negativa al 99% con las variables independientes TST y la porción vegetal (PV) y estadísticamente significativa al 95% con la variable Co₂. Los valores obtenidos de R², el estadístico F de los datos y la Prob>Chi² obtenidos para la ICU mediante Séntinel 3A han sido: R²=0,65; F=14,64 y Prob>Chi²=0,005. Los mismos datos para Séntinel 3B han sido: R²=0,64; F=12,49; Prob>Chi²=0,005. Se observa que estos datos indican una buena concordancia entre la variable dependiente y las independientes elegida mediante el método empleado con un nivel de ajuste elevado al 95% de significancia ya que Prob>chi²=0,005. Esta situación refleja una buena concordancia entre los valores de ICU y los valores de TST y Co₂ durante el intervalo de paso del Séntinel 3A y entre los valores de ICU, TST, P_v y Co₂ durante el intervalo de paso del Séntinel 3B.

4. Discusión

Los resultados presentados sobre los productos de nivel 2 de Séntinel 3A y 3B para la obtención de la variabilidad espacio temporal de la TST y la ICU en las capitales de Andalucía durante el periodo objeto de investigación presentan unos rendimientos adecuados que son consistentes entre sí y similares a los aportados por otras investigaciones similares (Hu *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2011; Prikaziuk & van der Tol 2019; Sobrino *et al.*, 2016; Tan & Li, 2015; Yang *et al.* 2020b).

En líneas generales, las TST medias obtenidas con los productos Séntinel 3 son mayores a las temperaturas ambientales obtenidas a través de las estaciones meteorológicas de la AEMET. Así, y según los datos de Séntinel 3A, la TST media diurna se ha situado en 2,66 °C por encima de la temperatura ambiental mientras que la diferencia se ha incrementado hasta los 2,83 °C para el caso de Séntinel 3B. Los coeficientes de determinación R² se encuentran por encima de 0,97 lo que denota una buena concordancia de los valores y un rendimiento general adecuado. Estos datos se encuentran en concordancia con otras investigaciones similares llevadas a cabo por otros autores en otras ciudades o territorios (Coppo *et al.*, 2010; Prikaziuk & van der Tol, 2019; Ruescas *et al.*, 2016; Sobrino *et al.*, 2016; Yang *et al.* 2020b) otorgando validez a los resultados obtenidos en esta

investigación. Estos estudios reportaron diferencias entre temperaturas de la superficie del suelo y ambientales de entre 1 y 4 °C, incluyéndose nuestros valores dentro del intervalo reportado. Los datos de TST obtenidos mediante Séntinel 3A han revelado que, durante las mañanas, las zonas industriales y las zonas abiertas presentan temperaturas mayores que las ZCL compactas. Por el contrario, los datos de TST nocturnos obtenidos mediante Séntinel 3B han revelado que las ZCL de mayor temperatura son las zonas compactas en contraposición con las zonas abiertas e industriales que presentan menores temperaturas. Durante las primeras horas de la mañana la radiación solar es mayor en estas zonas en contraposición a las del interior de la ciudad debido a las sombras que generan los edificios y árboles, al sistema heterogéneo de paramentos impermeables y gran absorción térmica y a las tasas de enfriamiento que experimentan las zonas con vegetación y las tasas de calentamiento de las zonas con escasez de vegetación y suelos desnudos. De esta forma, las sombras que generan los edificios y árboles de la ciudad impiden que la radiación solar caliente los paramentos impermeables de las zonas urbanas y, por tanto, que desprendan altas dosis de calor y alteren la TST de la zona (Lemus *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020a; Li & Meng, 2018).

A su vez, son numerosos los estudios mediante imágenes satelitales que han demostrado que la vegetación tiene un efecto de enfriamiento en las áreas urbanas (Du *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2017) que oscila entre 1 y 3 °C (Lin *et al.*, 2015) y de calentamiento en las zonas con escasez de vegetación y/o suelos desnudos. Estos efectos se producen no solo al influir en los procesos de sombra y evapotranspiración sino también en las tasas de enfriamiento y calentamiento por convección y transpiración que alteraría la TST de las zonas y explican el comportamiento diurno y nocturno de la ICU. Los autores Feizizadeh & Blaschke (2013) detectaron en la ciudad de Tabriz altos valores de TST en las zonas industriales y residenciales de alta densidad en contraposición con las zonas verdes que presentan las TST más bajas. Por, el contrario, durante las noches, las zonas industriales y abiertas se enfrían rápidamente en contraposición con las zonas compactas cuyo mayor volumen de materiales de construcción de alta absorción térmica desprenden más calor que las primeras. En esta línea, los autores Keramitsoglou *et al.* (2011) reportaron que las zonas compactas con mayor densidad de población de la ciudad de Atenas presentaban una TST mayor (entre 3 y 6°C) que las zonas abiertas y con menor densidad. Estas cifras se encuentran por encima de los valores obtenidos en esta investigación, pero pueden considerarse como adecuados teniendo en cuenta que la población de Atenas es superior a cualquiera de las urbes investigadas. Por tanto, son numerosos los estudios académicos que corroboran las situaciones aquí descritas y revelan que un aumento de la superficie urbanizada, de la densidad edificatoria y de las zonas impermeables del suelo causa un aumento en la TST de las zonas urbanas (Lemus *et al.*, 2020; Li & Meng 2018; Mallick *et al.*, 2013; Tsou *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2020b) validando los datos obtenidos en esta investigación. Resulta importante indicar que los autores Pérez & Roca (2018), trasladaron que los pavimentos drenantes empleados en algunas zonas urbanas al objeto de minimizar el efecto de la ICU no reportan la eliminación del problema tan solo lo minimiza ya que el propio pavimento dispone de ciertas zonas impermeables que otorgan sustento y resistencia.

El valor medio anual de la ICU obtenido mediante imágenes Séntinel 3A para las urbes ha obtenido valores negativos revelando que las ciudades se encuentran a temperaturas menores que las zonas rurales. Esta situación ha sido estudiada anteriormente por otros autores llegando a identificarla con el término isla de enfriamiento urbano (IEU) (Saaroni *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020b). Por el contrario, los datos medios anuales de ICU obtenidos mediante Séntinel 3B para las urbes han obtenido valores positivos revelando que las ciudades presentan temperaturas más elevadas que las zonas rurales. Algunos autores (Keramitsoglou *et al.*, 2011; Li & Meng, 2018; Emmanuel & Krüger, 2012) indican que esta situación de alternancia entre isla de enfriamiento urbano e isla de calor urbano es habitual en las ciudades ubicadas en latitudes medias y climas templados. No obstante, otros estudios existentes (Equere *et al.*, 2020; Dos Santos & De Costa, 2018) reportan que la morfología urbana es un factor que afecta en gran medida en la alternancia indicada. En el análisis estadístico

realizado mediante la técnica del Panel de Datos se observa que tanto por la mañana como por la noche la variable TST y CO_2 son estadísticamente significativas de forma negativa. Por tanto, a mayor TST y/ o CO_2 mayor intensidad de ICU y viceversa. Esta circunstancia ha sido estudiada en investigaciones anteriores (Ramamurthy & Bou-Zeid, 2017; Zhao *et al.*, 2018) y son numerosos los estudios que relacionan de forma positiva las temperaturas y la isla de calor urbana con altas concentraciones de contaminación (Bereitschaft, & Debbage, 2013; Liu *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2015). La variable PV es estadísticamente significativa de forma negativa solo por la noche. Esta circunstancia nos indica que, a mayor PV menor intensidad de ICU. El estudio de los efectos minimizadores que generan las zonas verdes sobre las temperaturas ambientales y la ICU han sido objeto de estudio en múltiples estudios mediante imágenes satelitales (Gaur *et al.*, 2018; Hua *et al.*, 2020; Shafizadeh *et al.*, 2020). Estos han demostrado que la vegetación tiene un efecto de enfriamiento en las áreas urbanas (Du *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2017) que oscila entre 1 y 3 °C (Lin *et al.*, 2015) y de calentamiento en las zonas con escasez de vegetación y/o suelos desnudos.

Con respecto a la variabilidad estacional de la ICU, nuestros resultados reportan que durante las mañanas con Séntinel 3A se obtiene una mayor intensidad durante el verano y el otoño en contraposición con la menor intensidad que se produce en primavera e invierno. Las diferencias medias obtenidas entre las estaciones con mayor y menor ICU han sido de hasta 2 °C. Esto podría estar motivado a que las ciudades investigadas reciben mayor radiación solar durante estas estaciones. Esta aumentaría la temperatura de los paramentos impermeables incrementando el posterior efecto de ICU.

Por el contrario, los resultados obtenidos durante las noches con Séntinel 3B reportan que se produce una mayor intensidad de ICU durante el invierno y el otoño en contraposición con la menor intensidad que se produce en primavera y verano con diferencias que llegan hasta los 1,8 °C. Esta circunstancia podría estar motivada en que el calor antropogénico proveniente de los sistemas de calefacción, transporte, contaminación e industria son mayores durante los periodos de temperaturas más bajas. Estos valores y circunstancias se encuentran en consonancia con otros estudios ya realizados sobre la variabilidad estacional de la ICU (Fu & Weng, 2018; Yang *et al.*, 2020a; Rui *et al.*, 2018) otorgando validez a los resultados obtenidos en esta investigación. Por otro lado, es importante indicar que son numerosos los estudios que indican que los cambios en la velocidad y dirección del viento presentan fuertes impactos en las temperaturas ambientales y en la ICU de las urbes (Arnfield, 2003; Gaur *et al.*, 2018; van Hove *et al.*, 2015). Esta circunstancia podría justificar la variabilidad positiva o negativa de la ICU producida por la estacionalidad en las ciudades investigadas.

Estos resultados pueden ser considerados de gran importancia en futuros estudios sobre consumo energético y confort térmico de las viviendas de las zonas urbanas ya que pueden suponer un alto ahorro energético y de reducción de la contaminación ambiental.

Con respecto a las intensidades de ICU en las distintas ZCL, indicar que durante las mañanas se reportan mayores intensidades en las zonas compactas en contraposición con las zonas industriales y abiertas. No obstante, se detecta una variabilidad estacional mayor en las estaciones de verano e invierno en comparación con las estaciones de primavera y otoño. Resulta significativo que durante estas últimas estaciones los valores de ICU de todas las ZCL son positivos. Por el contrario, y durante las estaciones de mayor intensidad, los valores de ICU son negativos. Con respecto a las intensidades nocturnas de ICU en las distintas ZCL, indicar que también se reportan mayores intensidades en las zonas compactas en contraposición con las zonas abiertas o industriales. Se detecta una variabilidad estacional mayor en todas las ZCL durante las estaciones de invierno y otoño en contraposición, con las estaciones de primavera y verano con menor intensidad.

Durante la noche, todos los valores de ICU determinados presentan valores positivos, denotando una ICU en las zonas urbanas. Son numerosos los estudios académicos que corroboran esta situación y revelan que las ZCL compactas y debido al aumento de la superficie urbanizada, zonas impermeables del suelo y densidad de población presentan mayores incrementos de ICU en comparación con las zonas abiertas (Feizizadeh & Blaschke, 2013; Keramitsoglou *et al.*, 2011; Lemus *et al.*, 2020; Li & Meng, 2018; Mallick *et al.*, 2013; Tsou *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2020a; Yang *et al.*, 2020b) validando los datos obtenidos en esta investigación.

5. Conclusiones

En las últimas décadas, el estudio de la TST y la ICU en las zonas urbanas mediante teledetección se ha convertido en un campo de investigación de gran importancia motivado por la necesidad de conocer nuevos procesos de determinación y los factores que influyen en la alteración del clima urbano. Esto permitía establecer medidas de mitigación y resiliencia de la ICU en las futuras propuestas de planificación urbanística. En esta investigación se ha estudiado y analizado la TST y la ICU de las capitales de Andalucía mediante imágenes Séntinel 3A y 3B. Todas las urbes han sido catalogadas en base a cinco ZCL que previamente fueron definidas según el Corine Land Cover del año 2020. El objetivo de esta clasificación ha sido el de determinar los parámetros que afectan a la ICU en base a las características del paisaje lo que nos ha permitido obtener unos resultados más precisos y adecuados. Las ventajas del uso de los Séntinel nos han permitido determinar, en primer lugar, la TST y a continuación, la ICU tanto en horario diurno como nocturno rompiendo con los tradicionales estudios que trabajan con una sola imagen satelital por día.

Se puede concluir que los productos oficiales de Séntinel 3 presentan TST más altas que las obtenidas mediante las estaciones meteorológicas. No obstante, han demostrado una alta precisión y baja sensibilidad funcionando bien a escala global. Por tanto, pueden ser considerados adecuados para estimar la TST y la ICU de zonas urbanas. Sin embargo, y aun considerando que este sistema de teledetección puede ser ampliamente utilizado para el estudio de la estimación de TST e ICU de las zonas urbanas se recomienda la realización de nuevas investigaciones aplicadas que validen la precisión de estos productos.

Nuestros resultados detectan que las TST medias obtenidas por la mañana son mayores en las zonas industriales y zonas abiertas de las ciudades mientras que en las zonas compactas se han obtenido menores temperaturas. En las lecturas nocturnas, las TST más altas se han obtenido en las zonas compactas mientras que las zonas abiertas e industriales han experimentado menores temperaturas. La ICU media obtenida con Séntinel 3A durante todo el periodo de estudio de las capitales de Andalucía presenta valores negativos mientras que la ICU media obtenida con Séntinel 3B presenta valores positivos. Esta circunstancia nos sugiere que durante la mañana la urbe se encuentra a temperaturas más bajas que las zonas rurales colindantes produciéndose el fenómeno conocido como isla de enfriamiento urbano. Por el contrario, y durante el atardecer, la urbe se encuentra a temperaturas más altas que las zonas rurales anexas produciéndose una isla de calor urbano. Los resultados obtenidos nos confirman una relación estadísticamente significativa entre la ICU y la TST, PV y Co₂. Se ha corroborado la existencia de una variabilidad estacional de la ICU a lo largo del año. La mayor intensidad obtenida con Séntinel 3A se ha producido en verano y otoño y con Séntinel 3B en otoño e invierno.

Dentro del ámbito de las ZCL hemos detectado diferentes intensidades de ICU diurnas y nocturnas y factores que las condicionan. Así, tanto en la ICU diurna y nocturna, las mayores intensidades negativas se producen en las zonas compactas mientras que las zonas abiertas e industriales se presentan intensidades negativas menores. Estos resultados, y al objeto de minimizar los efectos de

la ICU, nos reportan la preferencia en la elección de zonas climáticas abiertas en contraposición con las zonas climáticas compactas en los futuros desarrollos urbanísticos.

En el ámbito de la práctica, nuestros hallazgos proporcionan un nuevo enfoque de bajo costo, rápido y preciso que permita monitorear las variaciones de la ICU en cualquier ciudad del planeta. Este proceso permitirá a los planificadores urbanísticos y administraciones públicas encargadas de gestionar las remodelaciones de las zonas actuales y las futuras zonas de crecimiento tomar decisiones sobre las medidas de mitigación más adecuadas para minimizar los efectos de la ICU en base a los factores que la fomentan y las ZCL. Estas medidas, tras los estudios previos pertinentes, podrían ser extrapolables a otras ciudades teniendo en cuenta que el empleo de imágenes satelitales Séntinel 3 se encuentra al alcance de toda la comunidad científica y su uso para la determinación de la ICU resulta sencillo. Las contribuciones del presente artículo tienen que ser analizadas de acuerdo con la siguiente limitación que justifica el desarrollo de investigaciones futuras. Se establece como elemento prioritario, la posibilidad de realizar mediciones de mayor duración y con mayor número de imágenes, al objeto de establecer valores medios anuales más precisos y posibles oscilaciones de ICU en las distintas estaciones del año. Esta circunstancia podría mejorar la eficacia de la implantación de medidas que mitiguen este fenómeno de alteración del clima urbano.

Autoría

La publicación se ha realizado de forma conjunta y equitativa entre los dos autores. Los diferentes conocimientos y experiencias han contribuido al desarrollo del artículo. La elaboración del texto, figuras y revisión del texto ha sido una tarea conjunta de todos los autores.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Bibliografía

Alcock, I., White, M. P., Lovell, R., Higgins, S. L., Osborne, N. J., Husk, K., & Wheeler, B. W. (2015). What accounts for “England’s green and pleasant land”? A panel data analysis of mental health and land cover types in rural England. *Landscape and Urban Planning*, 142, 38-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.05.008>

Anjos, M., Targino, A. C., Krecl, P., Oukawa, G. Y., & Braga, R. F. (2020). Analysis of the urban heat island under different synoptic patterns using local climate zones. *Building and Environment*, 185(September). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107268>

Arbuthnott, K. G., & Hajat, S. (2017). The health effects of hotter summers and heat waves in the population of the United Kingdom: A review of the evidence. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 16(Suppl 1), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0322-5>

Arellano, B., García, A., & Roca, J. (2019). *Definición espacial del efecto de enfriamiento de los espacios verdes urbanos mediante teledetección: Estudios de caso en el Área Metropolitana de Barcelona*. International Conference Virtual City and Territory, (13), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.5821/ctv.8956>

Arellano, B., & Roca, J. (2021). Urban-CLIMPLAN. La isla de calor urbana en la región metropolitana de Barcelona. Estudio de la intensidad de la UHI diurna y nocturna a partir de diversos sensores. *ACE: Architecture, City and Environment*, 15(45), 10381. DOI: <https://doi.org/10.5821/ace.15.45.10381>

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: <https://doi.org/10.1002/joc.859>

Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>

Bereitschaft, B., & Debbage, K. (2013). Urban form, air pollution, and CO2 emissions in large U.S. metropolitan areas. *Professional Geographer*, 65(4), 612-635. DOI: <https://doi.org/10.1080/00330124.2013.799991>

Brousse, O., Georganos, S., Demuzere, M., Vanhuyse, S., Wouters, H., Wolff, E., Linard, C., van Lipzig, N. P. M., & Dujardin, S. (2019). Using Local Climate Zones in Sub-Saharan Africa to tackle urban health issues. *Urban Climate*, 27, 227-242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.004>

Čeplová, N., Kalusová, V., & Lososová, Z. (2017). Effects of settlement size, urban heat island and habitat type on urban plant biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 159, 15-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.11.004>

Chen, Y., Li, X., Zheng, Y., Guan, Y., & Liu, X. (2011). Estimating the relationship between urban forms and energy consumption: A case study in the Pearl River Delta, 2005-2008. *Landscape and Urban Planning*, 102(1), 33-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.007>

Coleman, R. W., Stavros, N., Hulley, G., & Parazoo, N. (2020). Comparison of thermal infrared-derived maps of irrigated and non-irrigated vegetation in urban and non-urban areas of southern California. *Remote Sensing*, 12(24), 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12244102>

Coppo, P., Ricciarelli, B., Brandani, F., Delderfield, J., Ferlet, M., Mutlow, C., Munro, G., Nightingale, T., Smith, D., Bianchi, S., Nicol, P., Kirschstein, S., Hennig, T., Engel, W., Frerick, J., & Nieke, J. (2010). SLSTR: A high accuracy dual scan temperature radiometer for sea and land surface monitoring from space. *Journal of Modern Optics*, 57(18), 1815-1830. DOI: <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.503010>

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8(11), 972-980. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>

De Castro, M., Gallardo, C., Jylha, K., & Tuomenvirta, H. (2007). The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. *Climatic Change*, 81(SUPPL. 1), 329-341. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9224-1>

Diallo, J., Lacaze, B., & Comby, J. (2015). Land surface temperature in the urban area of Lyon metropolis: A comparative study of remote sensing data and MesoNH model simulation. *Joint Urban Remote Sensing Event*, 2-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/JURSE.2015.7120528>

Dos Santos, R. & De Costa, T. (2018). Urban heat Island analysis using the 'local climate zone' scheme in presidente prudente, Brazil. *Investigaciones geográficas*, 69, 107-118. DOI: <https://doi.org/10.14198/INGEO2018.69.07>

Du, J., Xiang, X., Zhao, B., & Zhou, H. (2020). Impact of urban expansion on land surface temperature in Fuzhou, China using Landsat imagery. *Sustainable Cities and Society*, 61(June), 102346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102346>

Dwivedi, A., & Mohan, B. K. (2018). Impact of green roof on micro climate to reduce Urban Heat Island. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10, 56-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.01.003>

Emmanuel, R., & Krüger, E. (2012). Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Building and Environment*, 53, 137-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.020>

Equere, V., Mirzaei, P. & Riffat, S. (2020). Definition of a new morphological parameter to improve prediction of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 56, 102021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102021>

Fang, L., & Tian, C. (2020). Construction land quotas as a tool for managing urban expansion. *Landscape and Urban Planning*, 195, 103727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103727>

Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2013). Examining Urban heat Island relations to land use and air pollution: Multiple endmember spectral mixture analysis for thermal remote sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3), 1749-1756. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2263425>

Founda, D., Pierros, F., Petrakis, M., & Zerefos, C. (2015). Interdecadal variations and trends of the Urban Heat Island in Athens (Greece) and its response to heat waves. *Atmospheric Research*, 161-162, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.03.016>

Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 7(1), 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>

Fu, P., & Weng, Q. (2018). Variability in annual temperature cycle in the urban areas of the United States as revealed by MODIS imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 65-73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.003>

Gallo, K., Hale, R., Tarpley, D., & Yu, Y. (2011). Evaluation of the relationship between air and land surface temperature under clear- and cloudy-sky conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(3), 767-775. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2460.1>

Gaur, A., Eichenbaum, M. K., & Simonovic, S. P. (2018). Analysis and modelling of surface Urban Heat Island in 20 Canadian cities under climate and land-cover change. *Journal of Environmental Management*, 206, 145-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.002>

Guo, A., Yang, J., Xiao, X., Xia, C., Jin, C., & Li, X. (2020). Influences of urban spatial form on urban heat island effects at the community level in China. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101972>

Hu, Y., Dai, Z., & Guldmann, J. M. (2020). Modeling the impact of 2D/3D urban indicators on the urban heat island over different seasons: A boosted regression tree approach. *Journal of Environmental Management*, 266(11), 110424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110424>

Hua, L., Zhang, X., Nie, Q., Sun, F., & Tang, L. (2020). The impacts of the expansion of urban impervious surfaces on urban heat islands in a coastal city in China. *Sustainability*, 12(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/su12020475>

Jiang, S., Lee, X., Wang, J., & Wang, K. (2019). Amplified Urban Heat Islands during Heat Wave Periods. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14), 7797-7812. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JD030230>

Keramitsoglou, I., Kiranoudis, C. T., Ceriola, G., Weng, Q., & Rajasekar, U. (2011). Identification and analysis of urban surface temperature patterns in Greater Athens, Greece, using MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3080-3090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.014>

Khamchiangta, D., & Dhakal, S. (2019). Physical and non-physical factors driving urban heat island: Case of Bangkok Metropolitan Administration, Thailand. *Journal of Environmental Management*, 248(July), 109285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109285>

Kovats, R. S., Campbell-Lendrum, D., & Matthies, F. (2005). Climate change and human health: Estimating avoidable deaths and disease. *Risk Analysis*, 25(6), 1409-1418. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00688.x>

Labra, R. (2014). Zero panel data guide. (Cátedra UA). Recuperado de file:///U:/Maguilera/Documentos/Personales/MAGUILERA/Master_M3F/Trabajo_Fin_M3F/Revisi3n_para_paper/Referencias/Stata/16_Guia_CERO_para_datos_de_panel_Un_enfoque_practico.pdf

Lemus, M., Martin, J., Moreno, M. C., & Lopez, J. A. (2020). Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature. *Science of the Total Environment*, 699, 134307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134307>

Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X., & Wu, J. (2011). Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3249–3263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.008>

Li, T., & Meng, Q. (2018). A mixture emissivity analysis method for urban land surface temperature retrieval from Landsat 8 data. *Landscape and Urban Planning*, 179(July), 63–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.07.010>

Lin, W., Yu, T., Chang, X., Wu, W., & Zhang, Y. (2015). Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: Method and test. *Landscape and Urban Planning*, 134, 66–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.012>

Liu, L., & Zhang, Y. (2011). Urban heat island analysis using the landsat TM data and ASTER Data: A case study in Hong Kong. *Remote Sensing*, 3(7), 1535–1552. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs3071535>

Liu, Y., Yu, Y., Yu, P., Göttsche, F. M., & Trigo, I. F. (2015). Quality assessment of S-NPP VIIRS land surface temperature product. *Remote Sensing*, 7(9), 12215–12241. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70912215>

Macintyre, H. L., Heaviside, C., Taylor, J., Picetti, R., Symonds, P., Cai, X. M., & Vardoulakis, S. (2018). Assessing urban population vulnerability and environmental risks across an urban area during heatwaves – Implications for health protection. *Science of the Total Environment*, 610–611, 678–690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.062>

Mallick, J., Rahman, A., & Singh, C. K. (2013). Modeling urban heat islands in heterogeneous land surface and its correlation with impervious surface area by using night-time ASTER satellite data in highly urbanizing city, Delhi-India. *Advances in Space Research*, 52(4), 639–655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.025>

McMillin, L. M. (1975). Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of Geophysical Research*, 80(36), 5113–5117. DOI: <https://doi.org/10.1029/jc080i036p05113>

Mukherjee, F., & Singh, D. (2020). Assessing Land Use–Land Cover Change and Its Impact on Land Surface Temperature Using LANDSAT Data: A Comparison of Two Urban Areas in India. *Earth Systems and Environment*, 4(2), 385–407. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00155-9>

Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (Routledge).

ONU. (2018). 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN. <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>

Pérez Cambra, M., & Roca J. (2018). WSUDs (Water Sensitive Urban Design Systems) thermal behavior. En: Libro de proceedings, CTV 2018. *XII Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual. "Ciudades y Territorios Inteligentes"*. UNCuyo, Mendoza, 5-7 septiembre 2018. Barcelona: CPSV, p. 401-416. DOI: <https://doi.org/10.5821/ctv.8254>

Prikaziuk, E., & van der Tol, C. (2019). Global sensitivity analysis of the SCOPE model in Sentinel-3 Bands: Thermal domain focus. *Remote Sensing*, 11(20). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11202424>

Qiu, C., Schmitt, M., Mou, L., Ghamisi, P., & Zhu, X.X., (2018). Feature Importance Analysis for Local Climate Zone Classification Using a Residual Convolutional Neural Network with Multi-Source Datasets. *Remote Sensing*, 10, 1572. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10101572>

Ramamurthy, P., & Bou-Zeid, E. (2017). Heatwaves and urban heat islands: A comparative analysis of multiple cities. *Journal of Geophysical Research*, 122(1), 168-178. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JD025357>

Rasilla, D., Allende, F., Martilli, A., & Fernández, F. (2019). Heat waves and human well-being in Madrid (Spain). *Atmosphere*, 10(5), 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10050288>

Remedios, J., Emsley, S. (2012). Sentinel-3 Optical Products and Algorithm Definition Land Surface Temperature. 24.

Rongali, G., Keshari, A. K., Gosain, A. K., & Khosa, R. (2018). A mono-window algorithm for land surface temperature estimation from landsat 8 thermal infrared sensor data: A case study of the beas river basin, India. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 26(2), 829-840.

Roy, S., Pandit, S., Eva, E. A., Bagmar, M. S. H., Papia, M., Banik, L., Dube, T., Rahman, F., & Razi, M. A. (2020). Examining the nexus between land surface temperature and urban growth in Chattogram Metropolitan Area of Bangladesh using long term Landsat series data. *Urban Climate*, 32(January), 100593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100593>

Ruescas, A. B., Danne, O., Fomferra, N., & Brockmann, C. (2016). The land surface temperature synergistic processor in beam: A prototype towards sentinel-3. *Data*, 1(3), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/data1030018>

Rui, Y., Wang, L., Huang, X., Zhang, W., Li, J., & Niu, Z., (2018). Interannual variations in surface urban heat island and associated drivers in China. *Journal of Environmental Management*, 222, 86-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.024>

Saaroni, H., Amorim, J. H., Hiemstra, J. A., & Pearlmutter, D. (2018). Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Climate*, 24, 94-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.001>

Salvati, A., Coch, H, CEcere, C. (2016). Urban heat island prediction in the Mediterranean context: an evaluation of the urban weather generator model. *ACE: Architecture, city and Environment*, vol 11, nº32, pp: 135-156. DOI: <https://doi.org/10.5821/ace.11.32.4836>

Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>

- Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V., & Guedalia, D. (2006). Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, 40(10), 1743-1758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.037>
- Schneider, A., Friedl, M. A., & Potere, D. (2010). Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on "urban ecoregions. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1733-1746. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.003>
- Scolozzi, R., & Geneletti, D. (2012). A multi-scale qualitative approach to assess the impact of urbanization on natural habitats and their connectivity. *Environmental Impact Assessment Review*, 36, 9-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.03.001>
- Seto, K. C., & Kaufmann, R. K. (2003). Modeling the drivers of urban land use change in the Pearl River Delta, China: Integrating remote sensing with socioeconomic data. *Land Economics*, 79(1), 106-121. DOI: <https://doi.org/10.2307/3147108>
- Shafizadeh-Moghadam, H., Weng, Q., Liu, H., & Valavi, R. (2020). Modeling the spatial variation of urban land surface temperature in relation to environmental and anthropogenic factors: a case study of Tehran, Iran. *GIScience and Remote Sensing*, 57(4), 483-496. DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1736857>
- Smith, R. J., & Hsiao, C. (1988). Analysis of Panel Data. *Económica*, 55(218), 284. DOI: <https://doi.org/10.2307/2554479>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Ruescas, A. B., Danne, O., Brockmann, C., Ghent, D., Remedios, J., North, P., Merchant, C., Berger, M., Mathieu, P. P., & Göttsche, F. M. (2016). Synergistic use of MERIS and AATSR as a proxy for estimating Land Surface Temperature from Sentinel-3 data. *Remote Sensing of Environment*, 179, 149-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.035>
- Song, J., Chen, W., Zhang, J., Huang, K., Hou, B., & Prishchepov, A. V. (2020). Effects of building density on land surface temperature in China: Spatial patterns and determinants. *Landscape and Urban Planning*, 198(March), 103794. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103794>
- Song, J., Lin, T., Li, X., & Prishchepov, A. V. (2018). Mapping urban functional zones by integrating very high spatial resolution remote sensing imagery and points of interest: A case study of Xiamen, China. *Remote Sensing*, 10(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10111737>
- Stewart, I. D., & Oke, T., (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200-217. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Stewart, I., & Oke, T., (2009). *Classifying urban climate field sites by "local climate zones": the case of nagano, japan*. The Seventh International Conference on Urban Climate, July, 1-5.
- Tan, M., & Li, X., (2015). Quantifying the effects of settlement size on urban heat islands in fairly uniform geographic areas. *Habitat International*, 49, 100-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.05.013>
- Tsou, J., Zhuang, J., Li, Y., & Zhang, Y. (2017). Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. *Urban Science*, 1(1), 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/urbansci1010010>
- van Hove, L.W.A., Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Elbers, J.A., Van Driel, B.L., Holtslag, A.A.M., (2015). Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Building and Environment*, 83, 91-103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.029>

- Walawender, J. P., Szymanowski, M., Hajto, M. J., & Bokwa, A. (2014). Land Surface Temperature Patterns in the Urban Agglomeration of Krakow (Poland) Derived from Landsat-7/ETM+ Data. *Pure and Applied Geophysics*, 171(6), 913-940. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0685-7>
- Wang, J., & Ouyang, W. (2017). Attenuating the surface Urban Heat Island within the Local Thermal Zones through land surface modification. *Journal of Environmental Management*, 187, 239-252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.059>
- Wang, M., Madden, M., & Liu, X. (2017). Exploring the relationship between urban forms and CO2 emissions in 104 Chinese cities. *Journal of Urban Planning and Development*, 143(4), 1-8. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000400](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000400)
- Ward, K., Lauf, S., Kleinschmit, B., & Endlicher, W. (2016). Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *Science of the Total Environment*, 569-570, 527-539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.119>
- Wu, C., Li, J., Wang, C., Song, C., Chen, Y., Finka, M., & La Rosa, D. (2019). Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133742>
- Xue, J., Anderson, M. C., Gao, F., Hain, C., Sun, L., Yang, Y., Knipper, K. R., Kustas, W. P., Torres-Rua, A., & Schull, M. (2020). Sharpening ECOSTRESS and VIIRS land surface temperature using harmonized Landsat-Sentinel surface reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112055>
- Yang, C., Wang, R., Zhang, S., Ji, C., & Fu, X. (2019). Characterizing the hourly variation of urban heat islands in a snowy climate city during summer. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(14). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16142467>
- Yang, C., Yan, F., & Zhang, S. (2020a). Comparison of land surface and air temperatures for quantifying summer and winter urban heat island in a snow climate city. *Journal of Environmental Management*, 265, 110563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110563>
- Yang, J., Zhou, J., Göttsche, F.-M., Long, Z., Ma, J., & Luo, R. (2020b). Investigation and validation of algorithms for estimating land surface temperature from Sentinel-3 SLSTR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102136>
- Yao, R., Wang, L., Huang, X., Zhang, W., Li, J., & Niu, Z. (2018). Interannual variations in surface urban heat island intensity and associated drivers in China. *Journal of Environmental Management*, 222(April), 86-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.024>
- Yu, Y., Liu, Y., Yu, P., Liu, Y., & Yu, P. (2017). Land surface temperature product development for JPSS and GOES-R missions. *Comprehensive Remote Sensing*, 1-9, 284-303. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10522-6>
- Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., Guan, K., & Liu, X. (2018). Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13(3). DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
- Zhou, D., Zhao, S., Liu, S., Zhang, L., & Zhu, C. (2014). Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 152, 51-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.017>
- Zhou, D., Zhao, S., Zhang, L., Sun, G., & Liu, Y. (2015). The footprint of urban heat island effect in China. *Scientific Reports*, 5, 2-12. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep11160>