

Análisis de sinergias entre Isla de Calor Urbana y Olas de Calor mediante imágenes Sentinel-3 sobre la ciudad de Granada

David Hidalgo-García*, Julián Arco-Díaz

Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, Universidad de Granada, E. T. S. Ingeniería de Edificación, Campus de Fuentenueva, Granada, España.

Resumen: Comprender las sinergias existentes entre el fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU) y uno de los eventos climáticos extremos como son las olas de calor se ha convertido en uno de los grandes retos de la sociedad que persigue la mejora de la calidad de vida. En esta investigación, se ha determinado la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) y la Isla de Calor Urbana de Superficie (ICUS) mediante imágenes Sentinel-3 de la ciudad de Granada (España) durante los meses de julio y agosto de los años 2019 y 2020. El objetivo es el de determinar las posibles sinergias entre ambos fenómenos en una zona calificada como de alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático. Mediante el método de análisis estadístico Datos de Panel se han obtenido las relaciones multivariantes durante los periodos de ola de calor. Los resultados obtenidos en esta investigación y en línea con estudios anteriores, indican que los valores medios de TST y de ICUS se intensifican bajo condiciones de ola de calor en comparación con los periodos sin ola de calor (Diurnas: $\Delta TST=2,2$ °C y $\Delta ICUS=0,2$ °C; Nocturnas: $\Delta TST=4,4$ °C y $\Delta ICUS= 0,3$ °C). Se reportan relaciones entre la ICUS y la radiación solar y la dirección del viento que se intensifican en periodos de ola de calor.

Palabras clave: isla de calor urbana de superficie, olas de calor, Sentinel-3, temperatura de la superficie terrestre, resiliencia urbana, teledetección.

Analysis of synergies between Urban Heat Island and Heat Waves using Sentinel-3 images over the city of Granada

Abstract: Understanding the synergies between the Urban Heat Island (ICU) phenomenon and one of the extreme climatic events such as heat waves has become one of the great challenges of society that seeks to improve the quality of life. In this research, the Terrestrial Surface Temperature (TST) and the Urban Surface Heat Island (ICUS) have been determined using Sentinel-3 images of the city of Granada (Spain) during the months of July and August of the years 2019 and 2020. The purpose is to determine the possible synergies between both phenomena in an area classified as highly vulnerable to the effects of climate change. Using the Data Panel statistical analysis method, multivariate relationships were obtained during the heat wave periods. The results obtained, in line with previous research, indicate that TST and ICUS are intensified under heat wave conditions (Daytime: $TST=2.2$ °C and $ICUS=0.2$ °C; Nighttime: $TST=4.4$ °C and $ICUS= 0.3$ °C) and there are relationships between ICUS and wind direction and solar radiation that intensify in periods of heat wave.

Palabras clave: surface urban heat island, heat waves, Sentinel-3, land surface temperature, urban resilience, remote sensing.

To cite this article: Hidalgo-García, D., Arco-Díaz, J. 2022. Analysis of synergies between Urban Heat Island and Heat Waves using Sentinel-3 images over the city of Granada. *Revista de Teledetección*, 60, 1-15. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.17128>

* Corresponding author: dhidalgo@ugr.es

1. Introducción

En las últimas décadas numerosos estudios están alertando que la transformación del paisaje generado por la expansión de las zonas urbanas constituye uno de los procesos con mayor contribución al cambio climático (Carvalho et al., 2017; Jiang et al., 2019; Yang et al., 2019; Fang y Tian, 2020; Song et al., 2020). Los cambios en la cobertura del suelo reducen la evapotranspiración (Stewart y Oke, 2012) y aumentan las superficies de materiales impermeables, tales como asfalto y hormigón. Estos materiales almacenan el calor recibido de la radiación solar y posteriormente lo liberan a la atmósfera (Arnfield, 2003; Zhou et al., 2015; An et al., 2020). Los mayores incrementos de temperaturas se están produciendo en las ciudades debido principalmente al fenómeno de alteración de clima urbano (Li et al., 2011; Luo y Lau, 2018; Anjos et al., 2020) denominado Isla de Calor Urbana (ICU) cuya intensidad se ve incrementada por las múltiples actividades humanas (Lai et al., 2018; Santamouris, 2020) y por los eventos climáticos extremos tales como, sequías, olas de calor, etc. La interacción positiva entre la ICU y las olas de calor ha sido documentada en algunas ciudades: Baltimore y Maryland (Li y Bou-Zeid, 2013), Beijing (Li et al., 2015; Jiang et al., 2019), Nueva York (Ramamurthy y Bou-Zeid, 2017), Shanghái y Guangzhou (Jiang et al., 2019) o Atenas (Founda y Santamouris, 2017). Recientes investigaciones han demostrado que las olas de calor se están volviendo más intensas, tienen una duración mayor, ocurren con mayor frecuencia y a finales del siglo XXI afectarán a mayores superficies terrestres (Meehl y Tebaldi, 2004). Estos episodios de aumento de calor se encuentran identificados como uno de los fenómenos naturales con mayor impacto social, económico y ambiental (An et al., 2020). Así, posibilitan el incremento del consumo de electricidad y agua en las viviendas (Valor et al., 2001) y aumentos de la morbilidad y mortalidad (Semenza et al., 1996; Poumadère et al., 2005; An et al., 2020; Jiang et al., 2021). Prueba de ello, fue la ola de calor ocurrida en Chicago en el año 1995 que causó la muerte de 800 personas (Semenza et al., 1996), la del verano del año 2003 en Europa donde fallecieron 70 000 personas (Robine et al., 2008), la ocurrida en Rusia durante el verano de 2010 (Grumm, 2011), la del este de China en el

año 2013 (Xia et al., 2016) o la del Noroeste de EE.UU. y Oeste de Canadá (Lytton) en el verano de 2021 donde las temperaturas alcanzaron más de 47 °C y fallecieron en torno a 500 personas (ONU, 2021). No obstante, y aunque se ha demostrado una interacción positiva entre la ICU y la ola de calor, se ha determinado que el tipo de clima, las condiciones climáticas (velocidad y dirección del viento y radiación solar) y los factores geomorfológicos de las ciudades pueden alterar en gran medida esta interacción (Zhao et al., 2014; Jiang et al., 2019; An et al., 2020). Así, los estudios sobre las ciudades de Oklahoma (Basara et al., 2010), varias ciudades europeas (Founda et al., 2015), Londres (MCGregor et al., 2007) o Beijing y Guangzhou (Jiang et al., 2019) observaron que el aumento de la ICU era más fuerte durante la noche. Por el contrario, los estudios sobre las ciudades de Atenas, Parma (House y Santamouris, 2011) y Shanghái (Ao et al., 2019; Jiang et al., 2019) advirtieron que el aumento de la ICU era más fuerte durante el día. No obstante, algunos estudios han evidenciado que no se produjo una amplificación de la ICU (Ramamurthy y Bou-Zeid, 2017; Zhao et al., 2018; Cotlier y Jiménez, 2021) durante los periodos de olas de calor en las ciudades o zonas urbanas investigadas.

Entre las distintas metodologías usadas para la determinación de este fenómeno destacan la teledetección térmica que ha permitido la posibilidad de realizar estudios urbanos sobre las Temperaturas de la Superficie Terrestre (TST) y la Isla de Calor Urbana de Superficie (ICUS) a gran escala mediante imágenes satelitales obtenidas con satélites que cuentan con sensores térmicos. Un producto de implantación relativamente reciente pero de gran precisión es mediante imágenes Sentinel-3. Su utilización para este tipo de investigaciones presenta una importante ventaja con respecto a otros satélites tales como Landsat o NOAA y radica en que orbita dos veces al día sobre un mismo punto del planeta: una en horario diurno y otra en horario nocturno. No es el único, así el satélite MODIS también orbita dos veces al día cualquier punto pero su puesta en orbita es anterior al Sentinel-3. Estas circunstancias nos permiten determinar la TST y la ICUS en horario diurno y nocturno estableciendo un proceso de cálculo más completo y ajustado a la realidad en contraposición con los satélites que

solo orbitan una vez al día sobre un punto. El uso de Sentinel-3 se encuentra ampliamente documentado en la literatura mediante los estudios de la ICUS sobre las ciudades de Daman (India) y Huazhaizi (China) (Yang et al., 2020b), Oklahoma city (EE.UU.) y Dahra (Senegal) (Sobrino et al., 2016) o el estudio sobre 71 ciudades alrededor del mundo (Sobrino e Irakulis, 2020).

Esta investigación se llevó a cabo con el objetivo de caracterizar y cuantificar la variabilidad de las TST y las ICUS diurnas y nocturnas sobre la ciudad de Granada (España) mediante imágenes Sentinel-3 a lo largo de los meses de julio y agosto de los años 2019 y 2020 en las que se produjeron cinco olas de calor. Todo ello con el objetivo de estudiar y analizar las posibles sinergias entre ambos fenómenos y los factores ambientales que los condicionan.

2. Fuentes y metodología

2.1. Área de estudio y fuente de datos

El área objeto de estudio es la ciudad de Granada ubicada al sur de España (Figura 1). Según el Instituto Nacional de Estadística de España (INE), Granada cuenta con una superficie de 88,02 km² y una población de 232208 habitantes, siendo la penúltima región más extensa y la cuarta más poblada de Andalucía. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen-Geiger, Granada cuenta con un clima semiárido frío (Bsk) lo que conlleva inviernos húmedos y suaves y veranos cálidos y secos (de Castro et al., 2007). La altitud

media es de 738 metros sobre el nivel del mar y la temperatura promedio mensual fluctúa entre los 6°C del mes de enero y los 28°C del mes de julio con mínimas en invierno de -3°C y máximas 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.

2.2. Metodología

La metodología llevada a cabo para el desarrollo de este trabajo de investigación se encuentra descrita en la Figura 2. Ha sido necesario descargar las imágenes satelitales Sentinel-3 con la TST de la ciudad en los diferentes periodos analizados: con ola de calor y sin ola de calor. A continuación, se han obtenido las ICUS diurnas y nocturnas tomando como zona rural el área donde se ubica la estación meteorológica (AEMET) cercana al aeropuerto de Granada. Siguiendo el procedimiento de comparación de las TST obtenidas llevado a cabo en otros estudios de investigación (Gallo et al., 2011; Avdan y Jovanovska, 2016; Rongali et al., 2018), se ha procedido a comparar las temperaturas ambientales de la estación meteorológica con los valores de TST obtenidos en esa zona. Ambas temperaturas son diferentes pero los estudios que se acaban de referenciar han reportado altas correlaciones entre ellas. Para el análisis de los datos obtenidos se empleó el método estadístico del Datos de Panel que permite combinar datos de dimensión temporal con otros transversales.

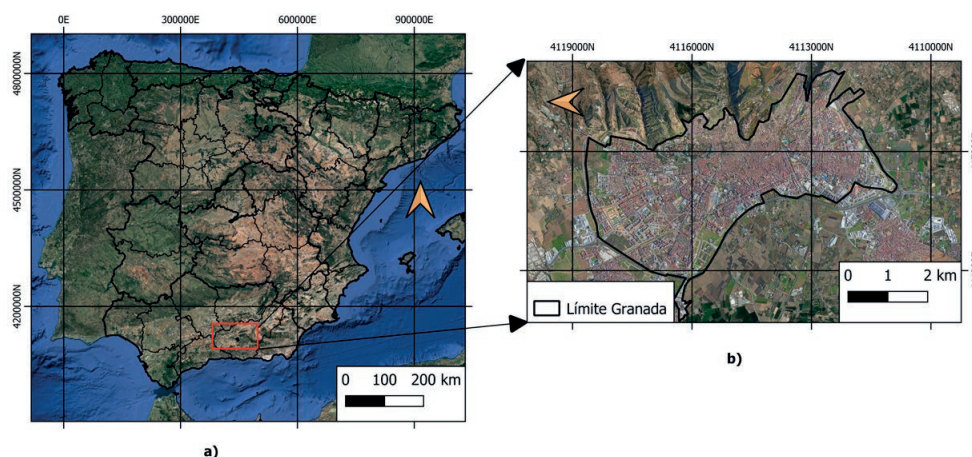


Figura. 1. Área de Estudio. a) Situación Granada. b) Delimitación zona urbana.

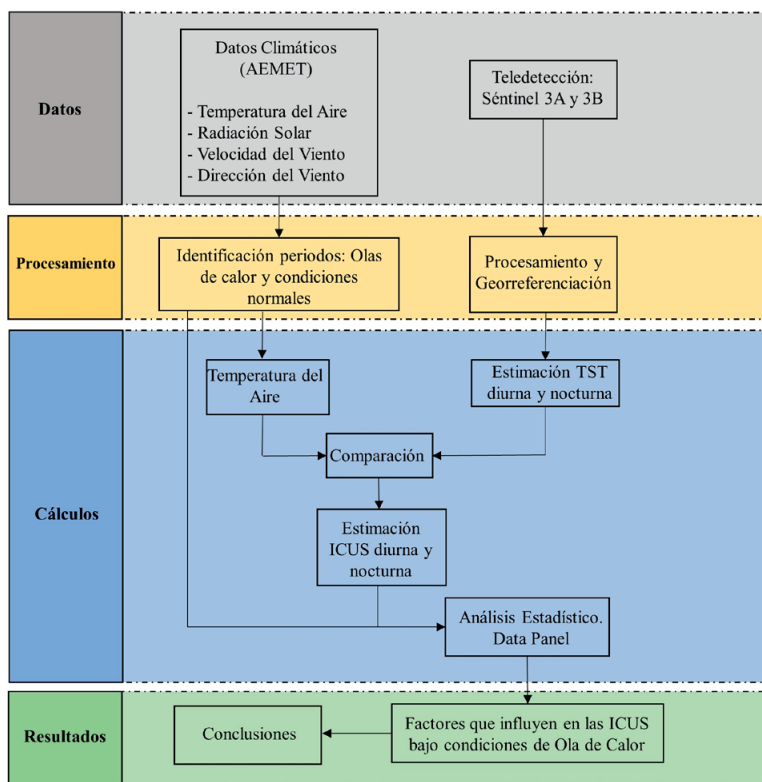


Figura 2. Metodología.

2.3. Estación y datos meteorológicos

La AEMET dispone en España de múltiples estaciones de observación que recogen cada hora los parámetros ambientales del lugar donde se ubican. Al objeto de obtener los valores de temperatura ambiental, velocidad y dirección del viento y radiación solar de la ciudad de Granada, se seleccionó la estación rural ubicada cerca del aeropuerto. Esta se encuentra a las afueras de la urbe, rodeada 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 (Wang et al., 2017; Jiang et al., 2019).

2.4. Identificación de las olas de calor

La AEMET considera una ola de calor al episodio de al menos tres días consecutivos, en que como mínimo el 10% de las estaciones consideradas registran máximas por encima del percentil del 95%

de su serie de temperaturas máximas diarias de los meses de julio y agosto del periodo 1971-2000. Según sus datos, durante el año 2019 se produjeron en Andalucía tres episodios catalogados como ola de calor mientras que en el año 2020 se redujeron a dos. Las fechas de inicio, finalización, duración y la anomalía térmica que produjeron en la temperatura ambiente junto con la temperatura máxima marcada se encuentran reflejadas en la Tabla 1.

2.5. Imágenes Sentinel-3

Los satélites Sentinel-3 disponen del instrumento de barrido de alta resolución Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) con el que se puede obtener la TST. Las imágenes constan de 6 bandas espectrales con resolución de 500 metros (bandas S1 a S6) y tres bandas térmicas que permiten determinar la TST, (bandas S7, S8 y S9) con resolución de 1000 metros. Los productos térmicos Sentinel-3 presentan 3 niveles de procesamiento, (nivel 0, nivel 1 y nivel 2) aunque solo

Tabla 1. Características de las Olas de Calor estudiadas en Granada.

Olas de Calor	2019			2020	
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Día Inicio	26/06/2019	20/07/2019	06/08/2019	30/07/2020	05/08/2020
Día Finalización	01/07/2019	25/07/2019	10/08/2019	01/08/2020	08/08/2020
Duración (días)	6	6	5	3	4
Anomalía Térmica (°C)	4	2	3,3	4	5
Temperatura Máxima (°C)	38,8	36,8	37,9	38,5	39,4

Fuente: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Estaciones: Aeropuerto de Granada y Base aérea de Armilla (Granada).

los dos últimos se encuentran disponibles para la descarga. Los de nivel 1 presentan radiancias y temperaturas de brillo que requieren de algoritmos bicanal para la obtención de la TST. Los productos de nivel 2 incluyen de forma directa y automática la 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). Las imágenes empleadas en esta investigación han sido adquiridas a través del Copernicus Open Acces Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA) para el nivel 2 (<https://scihub.copernicus.eu/>). La ventaja de estas imágenes es que se pueden descargar directamente con el proceso de corrección atmosférica realizada por la Agencia Espacial Europea (ESA) y por tanto, pueden ser usadas directamente. El horario habitual de paso diurno de uno de los dos Sentinel-3 (A o B) sobre la ciudad de Granada es entre las 10:00 y las 11:00 horas mientras que el horario habitual de paso nocturno es entre las 20:00 y las 21:00 horas. Las imágenes elegidas para el estudio se corresponden con sesenta y cuatro días distribuidos entre los meses de julio y agosto de los años 2019 y 2020. A lo largo de este intervalo de tiempo se procesaron un total de 128 imágenes, 64 correspondientes al satélite Sentinel-3A y 64 correspondientes al Sentinel-3B. Todas ellas disponen de un índice de nubosidad inferior al 15 % con la finalidad de aumentar la exactitud en la obtención de la TST y el posterior cálculo de la ICUS.

2.6. Comparación de TST y temperaturas del aire

Los valores obtenidos mediante imágenes satelitales requieren de un proceso que permita comparar los resultados obtenidos con otra variable. En las últimas décadas, y en relación a los

valores de TST, el método de comparación con las temperaturas del aire ha tomado importancia como sistema de comparación (Gallo et al., 2011; Avdan y Jovanovska, 2016; Rongali et al., 2018; Mukherjee y Singh, 2020). Este consiste en comparar la TST recuperada con la temperaturas del aire obtenida de estaciones meteorológicas ubicadas cerca del suelo (1-2 metros). En nuestra investigación, y al objeto de comparar las TST obtenidas mediante imágenes satelitales Sentinel-3, se han adquirido los valores de la temperatura del aire de la estación de la AEMET ubicada en el aeropuerto de Granada durante las horas de paso de los satélites.

2.7. Estimación de la intensidad de la isla de calor urbana de superficie (ICUS)

Según la literatura existente sobre el fenómeno de ICUS, 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). Las mediciones deben realizarse en situaciones atmosféricas estables y sin nubosidad. Por tanto, la ICUS puede determinarse según la Ecuación 1:

$$ICUS = TST \text{ urbana} - TST \text{ rural} \quad (1)$$

Como área urbana se tomaron los 37 píxeles de 1000×1000 metros incluidos dentro del contorno de estudio reseñado en la Figura 1 y como área rural se tomó el píxel de igual dimensiones que los anteriores donde se ubica la estación meteorológica de la AEMET cercana al aeropuerto de Granada y que dista 16 km del centro de la Urbe. Esta metodología ya ha sido empleada por otros autores (Oliveira et al., 2020; Yang et al., 2020a; Masoudi et al., 2021) en el estudio de la SUHI mediante teledetección sobre otras ciudades o zonas

urbanas. Con las imágenes de TST de Sentinel-3A y 3B exportadas al software QGIS, versión 3.10.5, se procedió a la determinación de la ICUS diurna y nocturna de la urbe empleando la Ecuación 1.

2.8. Estrategia de análisis

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 Datos de Panel. Se encuentra especialmente indicado para estudios de series temporales con datos transversales donde existe la posibilidad de que cambien las variables explicativas en las relaciones (Alcock et al., 2015; Fang y Tian, 2020). Este método y en comparación con los métodos tradicionales de análisis permite incluir una mayor cantidad de datos en el análisis, aumenta el grado de libertad de las variables y reduce la incómoda colinealidad entre las variables. 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. En base a los resultados de estas pruebas, se establecen tres métodos de cálculo: método de cuadrados ordinarios (MCO), mínimos cuadrados generalizados (MCG) y método de estimadores intragrupos (Labra, 2014). En base a los resultados de las pruebas citadas sobre los datos del análisis han reportado que el mismo se realice mediante el método MCG con efectos aleatorios empleando la ecuación 2:

$$Y_{it} = \beta X_{it} + (\alpha_i + \mu_{it}) \quad (2)$$

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

3. Resultados

3.1. TST amplificado bajo olas de calor

Los datos medios de la TST diurna y nocturna obtenida mediante los productos Sentinel-3A y 3B para la ciudad de Granada y durante los periodos objeto de estudio aparecen reflejados en la Figura 3. Las TST diurnas y nocturnas de

Sentinel-3 son superiores durante los periodos de ola de calor tanto en las zonas urbanas como en las zonas rurales. La TST media diurna de la ciudad de Granada para el periodo objeto de estudio en condiciones normales se estima en 41,1 °C para zonas urbanas y de 42,2 °C para zonas rurales. La TST media diurna de la urbe durante los periodos de Ola de Calor es de 43,1 °C para las zonas urbanas y de 44,5 °C para las zonas rurales.

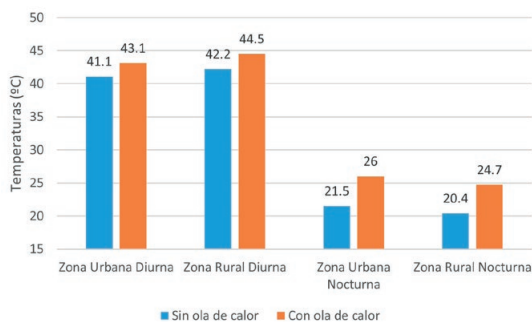


Figura 3. TST Sentinel-3A (a) y 3B (b) por zonas y condiciones ambientales.

Estos valores evidencian que las temperaturas rurales se encuentran por encima de las temperaturas urbanas con valores que oscilan entre los 1,1 °C en condiciones normales y de 1,4 °C en condiciones de ola de calor. Los incrementos de temperaturas evidenciados por la situación de ola de calor para las zonas urbanas han sido de 2,0 °C y de 2,3 °C para las zonas rurales. La TST media nocturna de la ciudad de Granada para el periodo objeto de estudio en condiciones normales se estima en 21,5 °C para zonas urbanas y de 20,4 °C para zonas rurales. La TST media nocturna de la urbe durante los periodos de Ola de Calor es de 26 °C para las zonas urbanas y de 24,7 °C para las zonas rurales. Estos valores evidencian que las temperaturas urbanas se encuentran por encima de las temperaturas rurales con valores que oscilan entre los 1,1 °C en condiciones normales y de 1,3 °C en condiciones de ola de calor. Los incrementos de temperaturas evidenciados por la situación de ola de calor para las zonas urbanas han sido de 4,5 °C y de 4,3 °C para las zonas rurales. En la tabla 2 se pueden observar los valores de desviación estándar de las TST diurnas y nocturnas en los diferentes periodos investigados.

Tabla 2. Valores desviación estándar TST diurnas y nocturnas por periodos estudiados.

	Zona urbana Diurna (°C)	Zona rural diurna (°C)	Zona urbana nocturna (°C)	Zona rural nocturna (°C)
Periodos sin ola de calor	3.0	2.6	3.0	3.8
Periodos con ola de calor	1.8	1.3	2.0	2.9

SD: Desviación Estándar.

En la Figura 4 se presentan las diferencias medias de TST diurnas y nocturnas de la ciudad de Granada entre los periodos con condiciones de ola de calor y los periodos sin ola de calor. Se puede observar como estas diferencias presentan valores positivos tanto por la mañana como por la noche. Esta circunstancia queda remarcada por las tonalidades rojizas de la urbe. No obstante, esos valores positivos presentan una importante variabilidad espacio temporal. Así, y con respecto a la variabilidad espacial, las diferencias de TST son mayores en las zonas urbanas que en las zonas rurales incrementándose significativamente en las zonas centrales de la urbe. Con respecto a la

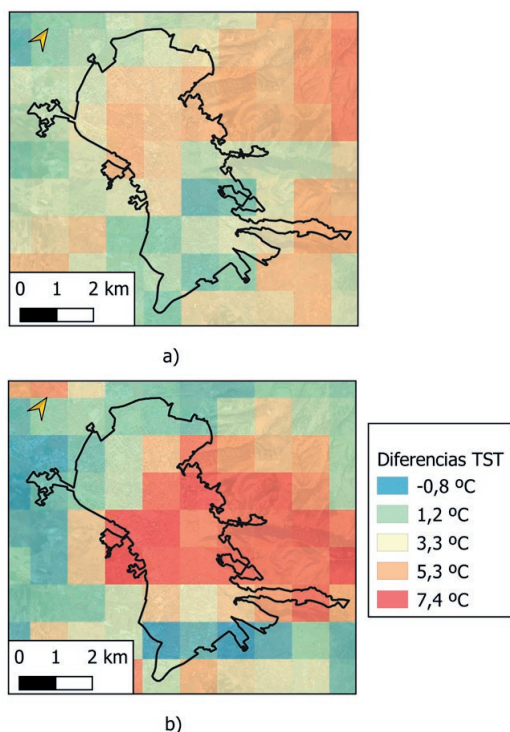


Figura 4. Diferencias medias TST diurna (a) y nocturna (b) con Sentinel-3A y 3B entre periodos de ola de calor y periodos sin ola de calor.

variabilidad temporal, indicar que las diferencias son mayores durante las lecturas nocturnas que durante las lecturas diurnas.

3.2. ICUS amplificado bajo olas de calor

Los valores medios de las ICUS diurnas y nocturnas obtenidas para la ciudad de Granada y durante los periodos de ola de calor y sin ola de calor aparecen reflejados en la Figura 5. La ICU diurna presenta valores medios negativos y se intensifican bajo condiciones de ola de calor. Por el contrario, los valores de ICUS nocturnos presenta valores medios positivos y también se intensifican bajo condiciones de ola de calor. La ICUS media diurna de la urbe para el periodo objeto de estudio en condiciones ambientales normales se estima en $-1,2^{\circ}\text{C}$. Este valor aumenta hasta los $-2,2^{\circ}\text{C}$ durante los periodos de ola de calor. Estos datos implican un aumento en la intensidad de la ICUS diurna de $1,0^{\circ}\text{C}$. La ICUS media nocturna de la urbe para el periodo objeto de estudio en condiciones ambientales normales se estima en $0,7^{\circ}\text{C}$. Este valor aumenta hasta los $1,5^{\circ}\text{C}$ durante los periodos de ola de calor. Estos datos implican un aumento en la intensidad de la ICUS nocturna de $0,8^{\circ}\text{C}$.

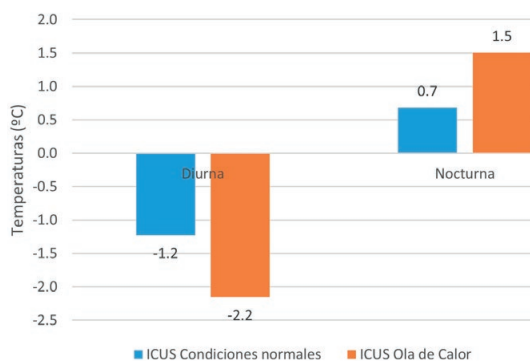


Figura 5. ICUS Sentinel-3A (a) y 3B (b) por condiciones ambientales.

En la Tabla 3 se pueden observar los valores de desviación estándar de las ICUS diurnas y nocturnas en los diferentes periodos investigados.

Tabla 3. Valores desviación estándar TST diurnas y nocturnas por periodos estudiados.

	Diurna (°C)	Nocturna (°C)
Periodos sin ola de calor	0,7	0,2
Periodos con ola de calor	0,8	0,3

SD: Desviación Estándar.

En la Figura 6 se presentan las diferencias medias de las ICUS diurnas y nocturnas obtenidas entre los distintos periodos investigados: periodos de ola de calor y periodos sin olas de calor. Durante los periodos de ola de calor se produce un incremento en las ICUS diurna y nocturna relacionados con los incrementos de las TST anteriormente indicados. No obstante, ese incremento presenta una importante variabilidad espacio temporal de tal forma que es mayor durante las noches que durante las mañanas y en las zonas urbanas que en las zonas rurales.

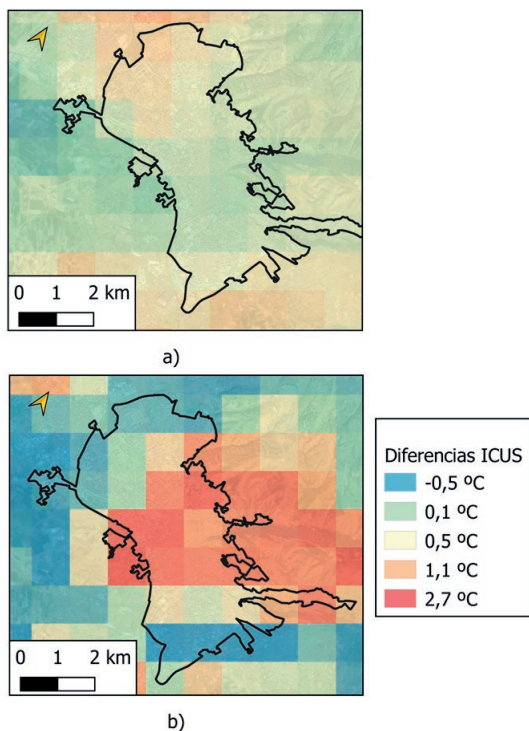


Figura 6. Diferencias medias ICUS diurna (a) y nocturna (b) entre periodos de ola de calor y periodos sin ola de calor.

3.3. Contribuciones de Radiación solar

La AEMET dispone de puntos homologados y certificados de medición de radiación solar directa y difusa en las estaciones meteorológicas rurales. La primera se obtiene mediante un Pirheliómetro Kipp-Zonen mientras que la segunda con un Piranómetro Kipp-Zonen calibrados periódicamente frente a patrones internacionales. Los datos obtenidos reflejan que la radiación total diaria en Granada ha sido de aproximadamente 1,2 veces mayor durante los periodos de ola de calor que bajo condiciones normales. Esta proporción se reduce a 1,05 veces en el horario de la toma de datos de TST e ICUS mediante Sentinel-3A y a 1,08 veces mayor en el horario de la toma de datos de TST e ICUS mediante Sentinel-3B. A su vez, la presión atmosférica durante los periodos de ola de calor fue de 1,3 veces mayor a los periodos de condiciones normales.

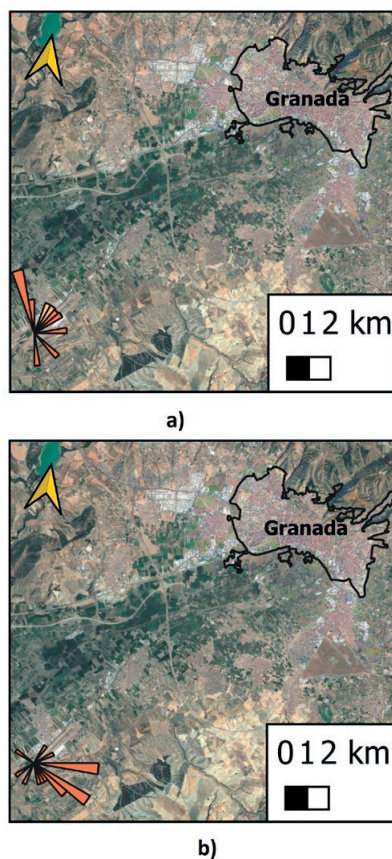


Figura 7. Velocidad y dirección del viento media diaria entre periodos de ola de calor (a) y periodos sin ola de calor (b).

3.4. Contribuciones de velocidad y dirección del viento

Se ha analizado la velocidad y dirección del viento de la estación rural de la AEMET al objeto de comprender su influencia en la variabilidad de la intensidad de las ICUS en la ciudad objeto de estudio (Figura 7). Los datos reflejan que la velocidad del viento media diurna durante la horas de paso del Sentinel-3A han sido de aproximadamente 1,16 veces mayor durante los periodos de condiciones normales que durante los periodos de ola de calor. Esta proporción se incrementa ligeramente hasta los 1,18 veces en el horario de la toma de datos durante las horas de paso del Sentinel-3B.

Durante los periodos de condiciones normales la dirección del viento predominante es Noroeste (de la costa hacia el interior) mientras que durante los periodos de ola de calor el viento predominante es dirección Sureste (del interior hacia la costa).

3.5. Incremento de la superficie afectada por ICUS nocturnas en periodos de ola de calor

En la Figura 8 se han representado las zonas con ICUS nocturnas negativas y positivas durante los periodos de condiciones ambientales sin ola de calor (a) y los periodos de ola de calor (b).

Así, durante los periodos de ola de calor no solo se produce un incremento de la TST y una intensificación de las ICUS, sino que se reporta una mayor superficie urbana afectada por el fenómeno. Si en periodos de condiciones ambientales normales las

ICUS positivas de la urbe afectan al 52,4 % de la ciudad, durante el periodo de ola de calor aumenta hasta el 78,8 % de la superficie urbana. Estos valores, suponen un incremento medio de afección en la ciudad de Granada durante los periodos de ola de calor del 26,4 % en comparación con el periodo de condiciones normales. Para la obtención de estos datos se han tenido en cuenta los píxeles de valores positivos incluidos dentro de la zona de ciudad delimitada.

3.6. Análisis Estadístico

3.6.1. Relaciones TST entre las diferentes localizaciones y condiciones ambientales

Se procede a realizar el análisis estadístico de la TST entre las diferentes localizaciones (urbano y rural) y según las diferentes condiciones ambientales (sin ola de calor y con ola de calor) al objeto de corroborar la existencia de relaciones estadísticamente significativas entre las diferentes localizaciones en los diferentes periodos ambientales. Los resultados del análisis estadístico de los datos de TST obtenida mediante Sentinel-3 se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Relaciones de TST entre las diferentes localizaciones y condiciones ambientales.

Condiciones	Sin ola de calor			Con ola calor		
	β	ρ	SD	β	ρ	SD
TST Rural	0,8967	***	0,026	0,8609	***	0,035

β : Coeficiente; SD: Desviación estándar; ρ : Errores estándar robustos: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ y *** $p < 0,001$

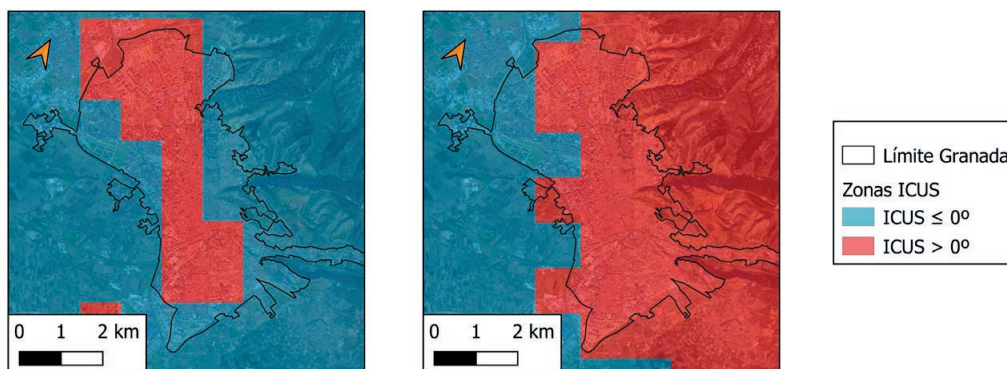


Figura 8. Zonificación de ICUS nocturnas en periodos sin ola de calor (a) y periodos con ola de calor (b).

Los valores obtenidos de R^2 y el estadístico F de los datos de TST en las diferentes condiciones ambientales analizadas se encuentran reflejados en la Tabla 5.

Tabla 5. R^2 y F análisis estadístico.

	R^2	F	Prob>chi ²
Sin ola de calor	0,99	1111,8	0,0000
Con ola de calor	0,99	792,81	0,0000

R^2 : Coeficiente regresión lineal. F: Estadístico F.

Los resultados del análisis estadístico nos indican que tanto en condiciones ambientales sin ola de calor como en condiciones ambientales de ola de calor se produce una relación estadísticamente significativa por encima del 99% entre la TST urbana y la TST rural. Los datos de la tabla 5 indican una buena concordancia entre la variable TST urbana y la TST rural durante las diferentes condiciones ambientales con un nivel de ajuste elevado al 99% de significancia ya que Prob>chi²=0,000. Los valores R^2 y F son ligeramente mayores en las condiciones ambientales sin ola de calor que en condiciones de ola de calor lo que denota que la relación entre la TST de las zonas urbanas y rurales es más fuerte durante los periodos sin ola de calor.

3.6.2. Relaciones entre las variables ICUS y radiación solar, velocidad y dirección del viento

Se procede a realizar el análisis estadístico de las variables que pueden influir en la ICUS obtenida

con Sentinel-3A y 3B utilizando el método del Datos de Panel. Estas han sido: radiación solar, velocidad y dirección del viento. Los resultados del análisis estadístico de los datos de ICUS obtenida mediante Sentinel-3A y 3B se indican en la Tabla 6.

Los resultados del análisis estadístico de los datos de la ICUS diurna obtenidos mediante imágenes Sentinel-3A indican que se produce una relación estadísticamente significativa por encima del 99% con la variable independiente radiación solar en periodos de condiciones atmosféricas normales. En periodos de condiciones de ola de calor esta relación se produce con la radiación solar y la dirección del viento. Los resultados del análisis estadístico de los datos de ICUS nocturnos obtenidos mediante imágenes Sentinel-3B indican que se produce una relación estadísticamente significativa del 99% con la variable independiente radiación solar durante los periodos de condiciones atmosféricas normales y por encima del 99% durante los periodos de ola de calor. Con respecto a la velocidad del viento, se produce una relación estadísticamente significativa del 95% y negativa en condiciones normales y del 99% con la variable dirección del viento en condiciones de ola de calor. Los valores obtenidos de R^2 y el estadístico F de los datos de ICUS diurnos y nocturnos se encuentran reflejados en la Tabla 7. Se observa que estos datos indican una buena concordancia entre la variable ICU y las variables estudiadas mediante el método empleado con un nivel de ajuste elevado al 99% de significancia ya que Prob>chi²<0,000. Los valores R^2 y F son ligeramente mayores en

Tabla 6. Datos de Panel con Sentinel-3A: Relación con radiación solar, velocidad y dirección del viento.

Satélite	3A Cond.normales			3A Ola Calor			3B Cond. normales			3B Ola Calor		
	β	ρ	SD	β	ρ	SD	β	ρ	SD	β	ρ	SD
Radiación solar	0,073	***	0,018	0,083	***	0,002	0,006	**	0,002	0,007	***	0,006
Velocidad	0,038	0,636	0,080	-0,056	0,316	0,056	-0,06	*	0,033	-0,02	0,936	0,291
Dirección	-0,001	0,497	0,002	-0,005	***	0,001	0,002	0,244	0,002	-0,05	**	0,002

β : Coeficiente; SD: Desviación estándar; ρ : Errores estándar robustos: * p <0,05, ** p <0,01 y *** p <0,001.

Tabla 7. R^2 y F análisis estadístico radiación solar.

Satélite	3A			3B		
	R^2	F	Prob>chi ²	R^2	F	Prob>chi ²
Condiciones normales	0,71	16,06	0,0004	0,72	9,42	0,0009
Ola de Calor	0,72	18,50	0,0001	0,75	166,39	0,0000

R^2 : Coeficiente regresión lineal. F: Estadístico F.

las condiciones ambientales de ola de calor que en condiciones ambientales normales lo que denota que la relación entre la ICUS y la radiación solar es más fuerte durante los periodos de ola de calor.

3.6.3. Comparación de TST y temperatura del aire

Los estadísticos de la comparación entre la TST obtenida con Sentinel-3A y 3B y las temperaturas del aire obtenidas en la estación rural de la AEMET se pueden consultar en la tabla 8. Estos nos reporta unos coeficientes de ajuste lineal (Sentinel-3A $R^2=0,95$ y Sentinel-3B $R^2= 0,97$) que se consideran adecuados ya que presentan valores próximos a la unidad.

Tabla 8. R^2 y F análisis estadístico radiación solar.

	R^2	SD (°C)	MBE (°C)	RMSE (°C)
Sentinel-3A	0,95	8,57	-4,10	2,92
Sentinel-3B	0,97	6,36	-3,85	3,18

R^2 : Coeficiente regresión lineal. SD: Desviación Estándar. MBE: error del sesgo medio. RMSE: Error medio cuadrático.

Esta circunstancia indica una buena concordancia entre los valores analizados y se consideran estadísticamente significativos por encima del 94%. De esta forma, se puede confirmar que las variaciones de la TST vienen relacionadas con las variaciones en la temperaturas ambientales.

4. Discusión

Los datos obtenidos con Sentinel-3A reportaron que las TST medias de las zonas rurales son mayores a las TST de la ciudad tanto en periodos de condiciones ambientales normales como en periodos de ola de calor. Por el contrario, los datos obtenidos con Sentinel-3B reportaron que la TST medias de las zonas rurales son menores a las TST medias de las zonas urbanas tanto en periodos de condiciones ambientales normales como en periodos de ola de calor. Son numerosos los estudios académicos que corroboran esta situación entre las temperaturas urbanas y rurales a primeras horas de la mañana y de la noche motivado por la radiación solar recibida, las sombras que generan los edificios y árboles y las diferencias de inercia térmica de las superficies urbanas respecto a las naturales del entorno (Li y Bou-Zeid, 2013; Yang et al., 2020a; Yang et al., 2020b) que validan los datos obtenidos en esta investigación. Esta investigación

puede unirse al grupo de estudios sobre las ciudades de Atenas (House y Santamouris, 2011), Parma (Ao et al., 2019) y Shanghai (Jiang et al., 2019) que han corroborado mayores incrementos de ICU durante las mañanas. Estas ciudades ubicadas en distintos puntos del planeta y con características geográficas, morfológicas y demográficas tan dispares presentan similares latitudes pudiendo ser considerada esta variable en futuros estudios para seguir corroborando esta situación.

Los datos de TST obtenidos con Sentinel-3A y 3B para zonas urbanas y rurales reportaron una intensificación de las mismas en periodos bajo condiciones ambientales de ola de calor en comparación con los periodos de condiciones ambientales normales. Esta circunstancia ha sido estudiada y analizada en investigaciones anteriores llegando a resultados que oscilan entre los 0,6 °C de la ciudad de Shanghai (Jiang et al., 2019) y los 1,2 °C - 3,5 °C de las ciudades de Parma y Atenas, respectivamente (House y Santamouris, 2011). Por tanto, los resultados obtenidos en esta investigación se encuentran en consonancia con los resultados indicados otorgando validez.

El valor medio de ICUS obtenido mediante imágenes Sentinel-3A en periodos de ola de calor y condiciones normales fueron de -2,2 °C y -1,2 °C, respectivamente. Los valores negativos diurnos indican que durante las mañanas las temperaturas de las zonas rurales son más altas que las temperaturas de las zonas urbanas produciéndose el fenómeno conocido como isla de enfriamiento urbano (Saaroni et al., 2018; Wu et al., 2019; Yang et al., 2019; Sobrino e Irakulis, 2020). Esto es debido a varias circunstancias: la diferente inercia térmica de las superficies urbanas respecto a las naturales del entorno y a las sombras que generan los edificios y árboles de la ciudad que impiden que la radiación solar caliente los paramentos de alta inercia térmica de las zonas urbanas (Granada capital cuenta con una superficie de 21,78 km² de los que tan solo 0,87 km² corresponden a zonas verdes) y, por tanto, que desprendan altas dosis de calor y alteren la TST de la zona (Yang et al., 2020b). Esta se produce en ciudades de climas templados y latitudes medias como la ciudad de Granada. Por el contrario, los datos medios de ICUS obtenidos mediante Sentinel-3B en periodos de ola de calor y condiciones normales fueron de 1,5 °C y 0,7 °C, respectivamente. Los valores

positivos nocturnos indican que durante las noches las temperaturas de las zonas urbanas son más altas que las temperaturas de las zonas rurales produciéndose el fenómeno conocido como isla de calor urbano (Sobrino et al., 2013; Lai et al., 2018; Luo y Lau, 2018; Tewari et al., 2019; Anjos et al., 2020; Huang et al., 2020; Santamouris, 2020; Sobrino e Irakulis, 2020). 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 de alta absorción térmica en el interior de las urbes hace que estas, tras ocultarse el sol, desprendan el calor absorbido durante el día.

Los datos de radiación solar total diaria obtenidos reportaron que esta ha sido de 1,2 veces mayor en periodos de ola de calor en comparación con los periodos de condiciones normales. El análisis estadístico mediante la técnica del Datos de Panel reportó que la relación entre la ICUS y la radiación solar es más fuerte durante los periodos de ola de calor. Son numerosos los estudios académicos que corroboran esta situación entre la radiación solar y la ICUS (De Boeck et al., 2010; Li y Bou-Zeid, 2013; Li et al., 2015; Jiang et al., 2019) que validan los datos obtenidos en esta investigación.

Los datos de la dirección del viento reportaron que se producen importantes cambios entre los periodos de condiciones ambientales normales y periodos de ola de calor. Los datos de la velocidad del viento han sido de 1,17 veces mayor en periodos de condiciones ambientales normales en comparación con los periodos de ola de calor. Los resultados denotaron que la relación entre la ICUS y la dirección del viento es más fuerte durante los periodos de ola de calor. Son numerosos los estudios que indican que los cambios de dirección del viento tienen fuertes impactos en la temperatura ambiental de las urbes (Arnfield, 2003; van Hove et al., 2015) mientras que se corroboró una intensificación de la ICUS a primera hora de la mañana y de la noche (Li y Bou-Zeid, 2013; Ramamurthy y Bou-Zeid, 2017; Jiang et al., 2019; An et al., 2020). Estos estudios con resultados similares permiten validar los datos obtenidos en esta investigación.

De los datos de la Figura 7 se han reportado un incremento medio de la superficie urbana afectada por el fenómeno de ICUS bajo condiciones de ola de calor del 26,4 % en comparación con los

periodos de condiciones ambientales normales. Las investigaciones realizadas en otras ciudades (Carvalho et al., 2017; Jiang et al., 2019) presentan valores similares con incrementos que oscilan entre el 21 y el 30% dando soporte a los resultados obtenidos.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado y analizado la TST y la ICUS con imágenes Sentinel-3A y 3B en la ciudad de Granada tanto en periodos de condiciones ambientales normales como en periodos de ola de calor durante los años 2019 y 2020. Para ello, se emplearon imágenes satelitales Sentinel-3A y 3B que tienen la ventaja de obtener imágenes de alta calidad de TST sobre las ciudades con un intervalo de tiempo de 10-12 horas. Los resultados reportaron que las TST medias urbanas y rurales obtenidas con los productos Sentinel-3A y 3B de la ciudad objeto de estudio se intensifican en condiciones de ola de calor en comparación con los periodos de condiciones ambientales normales. La ICUS media obtenida con Sentinel-3A durante todo el periodo de estudio presentó valores negativos mientras que la ICUS media obtenida con Sentinel-3B presentó valores positivos. Esta circunstancia sugiere que durante las mañanas las zonas urbanas se encontraban 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, las zonas urbanas se encontraban a temperaturas más altas que las zonas rurales anexas produciéndose una isla de calor urbano. Dentro del ámbito de los factores ambientales estudiados los resultados detectaron una relación positiva y estadísticamente significativa entre la ICUS y la radiación solar y entre la ICUS y la dirección del viento que se intensificó en los periodos de ola de calor en comparación con los periodos de condiciones ambientales normales. Con respecto a la velocidad del viento resultó ser una variable positiva y estadísticamente significativa pero solo en los periodos de condiciones ambientales normales y bajo los datos obtenidos mediante imágenes Sentinel-3B. Por último, los resultados detectaron que la superficie urbana afectada por el fenómeno de ICUS en condiciones de ola de calor es mayor que en las condiciones normales.

Referencias

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.05.008>
- An, N., Dou, J., González-Cruz, J.E., Bornstein, R.D., Miao, S., Li, L. 2020. An observational case study of synergies between an intense heat wave and the urban heat island in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(4), 605–620. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0125.1>
- 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). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107268>
- Ao, X., Wang, L., Zhi, X., Gu, W., Yang, H., Li, D. 2019. Observed synergies between urban heat islands and heat waves and their controlling factors in Shanghai, China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(9), 1955–1972. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0073.1>
- 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. <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*, 2016, 1480307. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Basara, J.B., Basara, H.G., Illston, B.G., Crawford, K.C. 2010. The Impact of the Urban Heat Island during an Intense Heat Wave in Oklahoma City. *Advances in Meteorology*, 2010, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2010/230365>
- Carvalho, D., Martins, H., Marta-Almeida, M., Rocha, A., Borrego, C. 2017. Urban resilience to future urban heat waves under a climate change scenario: A case study for Porto urban area (Portugal). *Urban Climate*, 19, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.005>
- Cotlier, G.I., Jimenez, J.C. 2022. The Extreme Heat Wave over Western North America in 2021: An Assessment by Means of Land Surface Temperature. *Remote Sensing*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/rs14030561>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.007>
- De Boeck, H.J., Dreesen, F.E., Janssens, I.A., Nijs, I. 2010. Climatic characteristics of heat waves and their simulation in plant experiments. *Global Change Biology*, 16(7), 1992–2000. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02049.x>
- 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(S1), 329–341. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9224-1>
- Fang, L., Tian, C. 2020. Construction land quotas as a tool for managing urban expansion. *Landscape and Urban Planning*, 195(May 2019), 103727. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103727>
- 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. <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. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>
- 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. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2460.1>
- Grumm, R.H. 2011. The central European and russian heat event of July–August 2010. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(10), 1285–1296. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3174.1>
- House, M., Santamouris, M. 2011. *Advances in Building Energy Research Heat Island Research in Europe: The State of Heat Island Research in Europe: The State of the Art. July 2012*, 37–41.
- Huang, X., Ding, A., Gao, J., Zheng, B., Zhou, D., Qi, X., Tang, R., Wang, J., Ren, C., Nie, W., Chi, X., Xu, Z., Chen, L., Li, Y., Che, F., Pang, N., Wang, H., Tong, D., Qin, W., ... He, K. 2021. Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China. *National Science Review*, 8(2). <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa137>
- Jiang, P., Fu, X., Fan, Y., Klemeš, J., Chen, P., Ma, S., Zhang, W. 2021. Spatial-temporal potential exposure risk analytics and urban sustainability impacts related to COVID-19 mitigation: A perspective from car mobility behaviour. *Journal of Cleaner Production*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123673>

- 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. <https://doi.org/10.1029/2018JD030230>
- Lai, J., Zhan, W., Huang, F., Voogt, J., Bechtel, B., Allen, M., Peng, S., Hong, F., Liu, Y., Du, P. 2018. Identification of typical diurnal patterns for clear-sky climatology of surface urban heat islands. *Remote Sensing of Environment*, 217(August), 203–220. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.021>
- Li, D., Bou-Zeid, E. 2013. Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2051–2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Li, D., Sun, T., Liu, M., Yang, L., Wang, L., Gao, Z. 2015. Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 10(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/5/054009>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.008>
- Luo, M., Lau, N.C. 2018. Increasing Heat Stress in Urban Areas of Eastern China: Acceleration by Urbanization. *Geophysical Research Letters*, 45(23), 13,060–13,069. <https://doi.org/10.1029/2018GL080306>
- Masoudi, M., Tan, P.Y., Fadaei, M. 2021. The effects of land use on spatial pattern of urban green spaces and their cooling ability. *Urban Climate*, 35(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100743>
- MCGregor, G.R., Felling, M., Wolf, T., Gosling, S. 2007. *The social impacts of heat waves*. Bristol: Environment Agency.
- Meehl, G.A., Tebaldi, C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 3055686, 994–997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00155-9>
- Oke, T.R. 1987. *Boundary layer climates*. Routledge.
- Oliveira, A., Lopes, A., Niza, S. 2020. Local climate zones in five southern European cities: An improved GIS-based classification method based on Copernicus data. *Urban Climate*, 33(May 2019), 100631. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100631>
- Poumadère, M., Mays, C., Le Mer, S., Blong, R. 2005. The 2003 heat wave in France: Dangerous climate change here and now. *Risk Analysis*, 25(6), 1483–1494. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00694.x>
- 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. <https://doi.org/10.1002/2016JD025357>
- Robine, J.M., Cheung, S.L.K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.P., Herrmann, F.R. 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus - Biologies*, 331(2), 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2007.12.001>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s41651-018-0021-y>
- 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(October 2017), 94–110. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.001>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- Semenza, J., Rubin, C., Falter, K., Selanikio, J., Flanders, W., Howe, H., Wilhelm, J. 1996. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *The New England Journal of Medicine*, 335(2)(July 1995), 86–90. <https://doi.org/10.1056/nejm199607113350203>
- Sobrinho, J.A., Irakulis, I. 2020. A methodology for comparing the surface urban heat Island in selected urban agglomerations around the world from Sentinel-3 SLSTR data. *Remote Sensing*, 12(12), 1–31. <https://doi.org/10.3390/RS12122052>
- Sobrinho, 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.035>

- Sobrinho, J.A., Oltra-Carrió, R., Sòria, G., Jiménez-Muñoz, J.C., Franch, B., Hidalgo, V., Mattar, C., Julien, Y., Cuenca, J., Romaguera, M., Gómez, J.A., de Miguel, E., Bianchi, R., & Paganini, M. 2013. Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9–10), 3177–3192. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716548>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103794>
- Stewart, I.D., Oke, T.R. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Tewari, M., Yang, J., Kusaka, H., Salamanca, F., Watson, C., Treinish, L. (2019). Interaction of urban heat islands and heat waves under current and future climate conditions and their mitigation using green and cool roofs in New York City and Phoenix, Arizona. *Environmental Research Letters*, 14(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf431>
- United Nations Organization. 2021 June ends with exceptional heat. Available from: <https://public.wmo.int/en/media/news/june-ends-exceptional-heat>
- Valor, E., Meneu, V., Caselles, V. 2001. Daily air temperature and electricity load in Spain. *Journal of Applied Meteorology*, 40(8), 1413–1421. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1413:DATAEL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1413:DATAEL>2.0.CO;2)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.029>
- Wang, K., Jiang, S., Wang, J., Zhou, C., Wang, X., Lee, X. 2017. Comparing the diurnal and seasonal variabilities of atmospheric and surface urban heat islands based on the Beijing urban meteorological network. *Journal Geophysical Research Atmospheric*, 122(4449), 2131–2154. <https://doi.org/10.1002/2016JD025304>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133742>
- Xia, J., Tu, K., Yan, Z., Qi, Y. 2016. The super-heat wave in eastern China during July–August 2013: A perspective of climate change. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1291–1298. <https://doi.org/10.1002/joc.4424>
- 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). <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(March), 110563. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110563>
- Yang, J., Zhou, J., Götsche, 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(April), 102136. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102136>
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R.B., Oleson, K. (2014). Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 511(7508), 216–219. <https://doi.org/10.1038/nature13462>
- 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). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
- 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. <https://doi.org/10.1038/srep11160>