

Trabajo Fin de Grado

Ciencias Ambientales

La Isla de Calor en Zaragoza Durante 2020

Urban Heat Island in Zaragoza (Spain) in 2020

Autora

Cristina Laurenti Errea

Director

Miguel Ángel Saz Sánchez

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

2021

RESUMEN

Las ciudades, debido al comportamiento de la radiación en un entorno artificial, son capaces de modificar los rasgos climáticos regionales, generando un fenómeno conocido como “isla de calor urbana”. Esto supone una anomalía positiva de la temperatura en el interior de la ciudad en relación con la periferia no urbanizada.

En el caso de Zaragoza se han descrito diferencias de hasta 7,5 °C en situaciones de estabilidad atmosférica y se han identificado comportamientos distintos de la isla de calor para cada estación del año y durante el ciclo diario.

Este trabajo trae los análisis y resultados del estudio de los patrones espaciales y temporales de este fenómeno en el entramado urbano de Zaragoza a lo largo del año 2020, a partir de los datos de 19 sensores de temperatura colocados en distintos puntos de la ciudad.

Palabras clave: clima urbano, isla de calor urbana (ICU), Zaragoza, anomalía de temperatura.

ABSTRACT

Urban areas are able of modifying regional climatic features due to the behavior of radiation in an artificial environment, generating a phenomenon know as “urban heat island”. This causes a positive anomaly of the temperature in the interior of the city in relation to the near rural areas.

In Zaragoza, differences up to 7,5 °C have been observed in situations of atmospheric stability, while different behaviors of the heat island have also been identified for each season of the year and during the day.

The present work brings the analysis and results for the study of spatial and temporal patterns of this phenomenon in the urban area of Zaragoza throughout 2020, based on data from 19 temperature sensors placed in different parts of the city.

Keywords: urban climate, urban heat island (UHI), Zaragoza, temperature anomaly.

Contenido

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Antecedentes | 1 |
| 1.2 | Justificación y Objetivos..... | 4 |
| 2 | Área de Estudio | 7 |
| 2.1 | Zaragoza..... | 7 |
| 2.2 | Características Climáticas..... | 8 |
| 3 | Datos y Metodología | 9 |
| 3.1 | Búsqueda de Información | 9 |
| 3.2 | Base de Datos..... | 10 |
| 3.3 | Control de Calidad | 12 |
| 3.4 | Plan de Análisis y Cálculo de Estadísticos | 13 |
| 3.5 | Modelización Espacial y Cartografía..... | 15 |
| 4 | Resultados | 19 |
| 4.1 | Intensidad Anual de la Isla de Calor Urbana | 19 |
| 4.2 | Variabilidad Estacional de la Isla de Calor Urbana | 20 |
| 4.3 | Evolución Horaria de la Isla de Calor Urbana | 21 |
| 4.4 | Caracterización de la Isla de Calor Urbana en Tres Momentos del Día | 26 |
| 5 | Discusión..... | 34 |
| 6 | Conclusión y Recomendaciones..... | 40 |
| | Bibliografía | 42 |
| | Apéndice A – Mapas | 44 |
| | Apéndice B – Tablas | 52 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Perfil general de la isla de calor urbana (Giridharan <i>et al.</i> , 2004). | 2 |
| Figura 1.2 – Diagrama esquemático de los elementos de la superficie urbana. De izquierda a derecha: edificación, pavimento y superficies naturales. (Goward, 1981). | 3 |
| Figura 2.1 – Mapa de la localización de Zaragoza, delimitación de la cuenca del río Ebro y rosa de los vientos de la ciudad (Cuadrat. <i>et al.</i> , 2020). | 7 |
| Figura 3.1 – Distribución espacial de los 19 sensores utilizados, en puntos de color. El código de cada sensor corresponde con la numeración en color blanco. A la derecha, nombre completo de cada sensor. | 10 |
| Figura 3.2 – Propiedades del método de interpolación basado en el inverso a la distancia. | 17 |
| Figura 4.1 – Isla de calor urbana promedio de Zaragoza durante el año 2020. | 19 |
| Figura 4.2 – Isla de calor urbana promedio de Zaragoza en otoño de 2020. | 20 |
| Figura 4.3 – Isla de calor promedio de Zaragoza en invierno de 2020. | 21 |
| Figura 4.4 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante el año 2020. Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar. | 22 |
| Figura 4.5 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante el invierno de 2019/2020. Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar. | 23 |
| Figura 4.6 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante el verano de 2020. Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar. | 24 |
| Figura 4.7 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante la primavera de 2020. Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar. | 25 |
| Figura 4.8 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante el otoño de 2020. Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar. | 26 |
| Figura 4.9 – Intensidad anual de la ICU a las 00:00, 12:00 y 21:00. | 27 |
| Figura 4.10 – Isla de calor promedio de Zaragoza a las 00:00 en el año 2020. | 27 |
| Figura 4.11 – Isla de calor promedio de Zaragoza a las 12:00 en el año 2020. | 28 |
| Figura 4.12 – Isla de calor urbana promedio de Zaragoza a las 21:00 en el año 2020. | 28 |
| Figura 4.13 – Intensidad estacional de la ICU a las 00:00, 12:00 y 21:00. | 29 |
| Figura 4.14 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 21:00 en invierno de 2020. | 30 |
| Figura 4.15 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 21:00 en primavera de 2020. | 31 |
| Figura 4.16 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 21:00 en verano de 2020. | 32 |
| Figura 4.17 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 21:00 en otoño de 2020. | 33 |
| Figura A.1 – Temperatura promedio de Zaragoza durante el año 2020. | 44 |
| Figura A.2 – Isla de calor promedio de Zaragoza en primavera de 2020. | 45 |
| Figura A.3 – Isla de calor promedio de Zaragoza en verano de 2020. | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura A.4 – Temperatura promedio de Zaragoza en otoño de 2020..... | 46 |
| Figura A.5 – Temperatura promedio de Zaragoza en invierno 2020. | 46 |
| Figura A.6 – Temperatura promedio de Zaragoza en primavera de 2020..... | 47 |
| Figura A.7 – Temperatura promedio de Zaragoza en verano 2020..... | 47 |
| Figura A.8 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 00:00 en invierno de 2020. | 48 |
| Figura A.9 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 12:00 en invierno de 2020. | 48 |
| Figura A.10 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 00:00 en primavera de 2020. | 49 |
| Figura A.11 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 12:00 en primavera de 2020. | 49 |
| Figura A.12 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 00:00 en verano de 2020..... | 50 |
| Figura A.13 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 12:00 en verano de 2020..... | 50 |
| Figura A.14 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 00:00 en otoño de 2020. | 51 |
| Figura A.15 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 12:00 en otoño de 2020. | 51 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla B.1 – Temperaturas promedio durante el año 2020 e intensidad anual de la ICU. En naranja los valores máximos y en azul los mínimos..... | 52 |
| Tabla B.2 – Temperaturas promedio e intensidad de la ICU en cada. En naranja los valores máximos y en azul los mínimos..... | 53 |
| Tabla B.3 – Promedio de temperatura y anomalía de todos los sensores en cada estación del año 2020. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo. | 53 |
| Tabla B.4 – Anomalía promedio anual entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo. | 54 |
| Tabla B.5 – Anomalía promedio en invierno entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo. . | 54 |
| Tabla B.6 – Anomalía promedio en primavera entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo. . | 55 |
| Tabla B.7 – Anomalía promedio en verano entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo. | 55 |
| Tabla B.8 – Anomalía promedio en otoño entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo. | 56 |
| Tabla B.9 – Temperaturas promedio durante el año 2020 a las 00:00, 12:00 y 21:00 (°C). En naranja el valor máximo y en azul el mínimo..... | 56 |
| Tabla B.10 – Anomalía promedio durante el año 2020 a las 00:00, 12:00 y 21:00 (°C). En color naranja el valor máximo y en azul el mínimo..... | 57 |
| Tabla B.11 – Promedio de temperatura y anomalía de todos los sensores durante el año 2020. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo. | 57 |
| Tabla B.12 – Temperaturas promedio durante cada estación del año 2020 a las 00:00, 12:00 y 21:00 (°C). En naranja el valor máximo y en azul el mínimo..... | 57 |
| Tabla B.13 – Anomalías promedio durante cada estación del año 2020 a las 00:00, 12:00 y 21:00 (°C). En naranja el valor máximo y en azul el mínimo..... | 58 |
| Tabla B.14 – Promedio de temperatura y anomalía de todos los sensores durante cada estación del año 2020. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo..... | 58 |
| Tabla B.15 – Promedio de temperatura de cada mes durante el año 2020. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo. | 58 |

1 Introducción

1.1 Antecedentes

El asentamiento de la población en las ciudades y su consecuente crecimiento suponen un impacto sobre su clima, siendo uno de los efectos climatológicos causados por el hombre más documentado y estudiado debido a su incidencia sobre el confort y calidad de vida de la población (Oke, 1973). Desde Howard (1833) se reconoce el efecto que las áreas urbanas tienen sobre el clima local, siendo el pionero del concepto Isla de Calor Urbana (ICU). Este fenómeno hace referencia a la intensidad de la variación de temperatura entre el centro y la periferia de las ciudades.

Desde la introducción en el ámbito científico de las ICUs y junto con la necesidad de abordar el impacto que la urbanización tiene sobre su clima, se han llevado a cabo estudios sobre el efecto de las Islas de Calor Urbanas en ciudades de todo el mundo, como por ejemplo, Dublín, Irlanda (Sweeney, 1987), Lodz, Polonia (Klysik & Fortuniak, 1999), Granada, España (Montávez *et al.*, 2000), Nueva York, Estados Unidos (Gedzelman *et al.*, 2003), Hong Kong, China (Giridharan *et al.*, 2004), Atenas, Grecia (Kassomenos & Katsoulis, 2006) e incluso ciudades más pequeñas como Aveiro, Portugal (Pinho & Manso Orgaz, 2000).

En todos estos estudios son evidentes las diferencias de temperatura nocturnas entre el centro de las ciudades y su periferia, siendo mayor donde la densidad de edificios es superior. Esto se debe a la modificación que sufre el balance de radiación y de energía en la superficie, que retrasa su enfriamiento normal nocturno. Estas modificaciones a su vez están causadas por la mayor absorción de radiación solar por paredes y estructuras verticales, mayor retención de radiación infrarroja, mayor absorción y posterior liberación de calor retenido, conversión de la radiación absorbida en calor sensible en vez de calor latente y por mayor liberación de calor (latente y sensible) de las combustiones (domésticas, de transportes e industriales) (T. R. Oke, 1982; Cuadrat *et al.*, 2005).

Aparte de estos parámetros relacionados con los balances de radiación y energía, Oke (1973) resalta la importancia que tienen la velocidad del viento y la presencia de nubes a la hora de estudiar las diferencias de balance de calor entre dos zonas determinadas, ya que estos parámetros también afectan a la radiación, convección y advección en cada una. Oke (1982), realizó un estudio sobre las bases energéticas de las ICUs aportando los parámetros mencionados anteriormente y que sirven como referencia para conocer cómo funciona este fenómeno desde un punto de vista físico. En base a ellos, y en comparación con la capacidad de almacenar calor que tienen los centros urbanos; que liberan por la noche, observó que en las

zonas rurales a partir del atardecer la temperatura disminuye exponencialmente hasta que el descenso es interrumpido abruptamente cuando el sol comienza a calentar de nuevo. Este sería el comportamiento normal de una superficie sin infraestructuras ni elevada actividad humana, muy diferente al que se muestra para los centros urbanos. La Figura 1.1 muestra cómo la temperatura varía en función de las características de cada área.

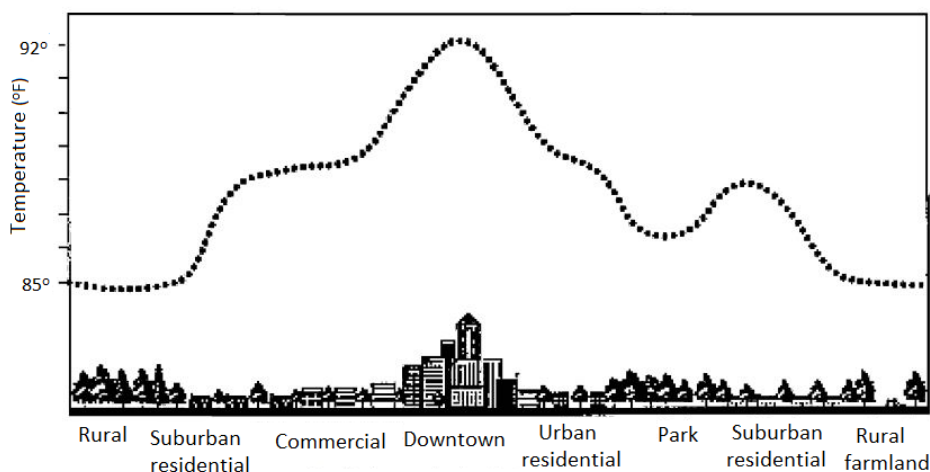


Figura 1.1 – Perfil general de la isla de calor urbana (Giridharan *et al.*, 2004).

Giannaros & Melas (2012) abordan a la intensidad de Isla de Calor haciendo referencia a la variación de temperatura entre zonas con un entorno diferente, para poder así estudiar el efecto que éste tiene sobre su microclima. Es importante, entonces, establecer qué propiedades son aquellas que pueden modificar el ambiente y que por tanto hay que buscar que sean diferentes en cada zona que se vaya a comparar, como estudiaron I. D. Stewart & Oke (2012). Pueden ser citadas propiedades como:

- Estructuras de la superficie

Sus geometrías, las propiedades de los materiales de construcción o la densidad de edificios son factores que modifican el flujo de aire, el transporte de calor y los balances de radiación de onda corta y de onda larga¹ en la superficie (Cuadrat *et al.*, 2005.; Iain D. Stewart *et al.*, 2014). Así, la composición y configuración subsuperficial de cada elemento juega un papel clave en la determinación de su comportamiento térmico (Figura 1.2)

¹ La radiación de onda corta es aquella emitida por los cuerpos de mayor temperatura, en este caso, la que llega a la Tierra desde el Sol. La radiación de onda larga es la que emiten las distintas superficies de la Tierra (Iain D. Stewart *et al.*, 2014).

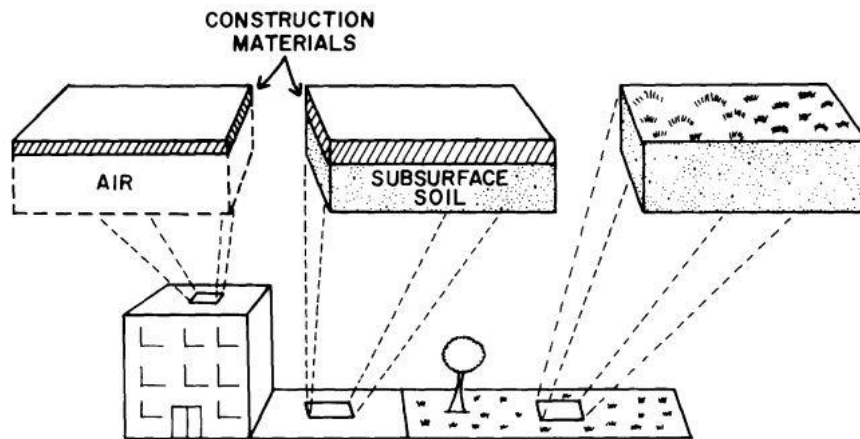


Figura 1.2 – Diagrama esquemático de los elementos de la superficie urbana. De izquierda a derecha: edificación, pavimento y superficies naturales. (Goward, 1981).

- Cubierta vegetal

La presencia de zonas verdes como parques o jardines, con cierta densidad de plantas, determinan la disponibilidad de humedad en el ambiente ya que son las principales responsables de aportarlo. Además, la cubierta vegetal tiene un albedo² superior al del cemento o materiales de construcción, que es muy bajo. Como consecuencia, las áreas verdes absorben menos calor y, por tanto, sirven de termorreguladoras amortiguando el efecto del calor emitido por paredes, tejados y carreteras (Alexander & Mills, 2014).

- Superficie industrial

La presencia de plantas industriales, sobre todo donde se llevan a cabo procesos de combustión, suponen una importante entrada de calor en el ambiente (I. D. Stewart & Oke, 2012).

- Actividad humana

En las zonas más pobladas y con elevada densidad de edificios, existirá una mayor tasa de metabolismo humano que en aquellas zonas con poca presencia humana. Del mismo modo, también se hará notar en el efecto de la isla de calor, la presencia de transportes y su consecuente combustión (Oke, 1973; I. D. Stewart & Oke, 2012).

² El albedo es el porcentaje de radiación reflejada por las superficies, por tanto menor en las ciudades que en zonas de periferia (con menos edificios), afectando a la capacidad de enfriamiento o calentamiento del suelo (Bechtel *et al.*, 2019).

Visto está entonces, que la presencia física de las ciudades altera las propiedades radiativas, aerodinámicas, térmicas y de mezcla del aire en el ambiente (Alexander & Mills, 2014).

En 2005 Cuadrat *et al.* estudiaron la relación entre las características espaciales de la ICU de la ciudad de Zaragoza, España y sus principales factores geográficos. Encontraron que existe una gran influencia tanto de la topografía y los vientos del NW (cierzo) y del SE (viento de bochorno) como de la densidad de edificios, cubierta vegetal y reflectividad de los materiales. En concreto, observaron que la topografía explica el 38% de la variación de la temperatura del aire, seguido de la densidad urbana, la presencia de cubierta vegetal y por último de la reflectividad total. Encontraron también que el viento es el factor más cambiante dentro de la ciudad que afecta a las variaciones de isla de calor. Cuando hay cierzo la isla de calor se desplaza hacia el Este, mientras que cuando hay viento de bochorno se desplaza hacia el Oeste (Cuadrat *et al.*, 2005).

Más adelante, en 2015 Cuadrat *et al.* realizaron un informe sobre el clima de Zaragoza donde afirman que desde finales del siglo XIX la evolución de la temperatura ha seguido un comportamiento variable y que desde los años 80 se observa un calentamiento continuo que dura hasta el presente.

El efecto de las ICUs aparece tanto en verano como en invierno, aunque mientras en las estaciones más frías la temperatura en el centro de la ciudad no solo es mayor durante las horas de noche, sino que también lo es durante el día, en verano las zonas exteriores registran en algunos momentos del ciclo diario temperaturas ligeramente superiores debido a que no hay sombras, la atmósfera es más limpia y no hay obstáculos para la radiación incidente (Cuadrat *et al.*, 2020).

Tejedor *et al.* (2015) estudiaron la ICU en Zaragoza durante una ola de calor que afectó a la ciudad en julio de 2015. Observaron que el patrón de distribución de la humedad relativa es muy similar al de las diferencias de temperatura, notándose la presencia de una isla de sequedad en el centro urbano identificada por Olcina Cantos *et al.* (2016) en otros espacios urbanos.

1.2 Justificación y Objetivos

La aparición de ciudades supone un importante cambio en la estructura natural, tanto de la superficie (cubierta vegetal) como de su dinámica funcional (usos del suelo). El estudio de su clima es una manera eficaz de analizar el efecto de esta transformación y poder conocer así sus causas y sus consecuencias (Goward, 1981).

El efecto de las ICU recae directamente sobre la calidad de vida de las personas, no solo al notar la incomodidad térmica, sino que supone un mayor consumo de energía para refrigerar y

también contribuye a la formación de ozono troposférico. Este último en concreto, es un importante contaminante fotoquímico que se origina principalmente en áreas urbanas, por emisión de automóviles e industria. El ozono troposférico puede causar problemas durante el día, pues la luz del sol contribuye para su formación (IDEAM, 2014).

Actualmente el 56% de la población mundial habita en espacios que podemos categorizar como urbanos, superando el 80% en algunas regiones del mundo. Además, se proyecta que la población mundial alcanzará los 9,9 mil millones en 2050, un aumento de más del 25% de la población actual de 2020 de 7,8 mil millones que se espera que absorban sobre todo las ciudades de países en desarrollo (Population Reference Bureau, 2020). Esto hace aún más interesante y necesario el estudio de las ICU de las ciudades, pues este fenómeno va más allá de lo meramente climático.

Conocer qué factores influyen en la aparición e intensidad de las ICUs, ya sea mitigándola (como el agua, el viento, zonas verdes...) o potenciándola (alta densidad de edificios, verano, noche...), resulta esencial para establecer medidas de prevención y adaptación a posibles escenarios futuros de cambio climático. Para ello, hay que tener en cuenta que las diferencias de temperatura observadas entre el centro y periferia de las ciudades superan las expectativas de cambios de temperatura para las próximas décadas. La mitigación de esta diferencia de temperatura se puede conseguir a partir de una planificación urbana que considere a la isla de calor como un fenómeno importante en esas tareas y básico en la búsqueda de la sostenibilidad de estos espacios.

El estudio va a tener un enfoque espacial, pues se dispone de 19 sensores fijos de temperatura distribuidos por toda la ciudad, que ofrecen información de temperatura medida de forma simultánea en diferentes zonas. Así, se van a analizar las diferencias de temperatura conforme cambia la tipología de la ciudad. Además, el estudio va a tener otro enfoque que es temporal, de manera que pueda analizarse el comportamiento y las ICUs en función del momento del día o la estación del año. Resulta útil para saber cuándo es más intenso el efecto de la isla de calor.

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio va a ser caracterizar espacial y temporalmente la isla de calor urbana de la ciudad de Zaragoza en el año 2020. Se ha elegido realizar el estudio en el año 2020 porque, además de ser el año más reciente, se dispone de un mayor número de sensores termohigrométricos en la ciudad respecto a otros años y además los datos registrados muestran la ausencia significativa de lagunas de información. Se trata pues de un estudio referido únicamente a ese año y que habría de completarse con la información de otros periodos anuales, para desarrollar una mejor caracterización de la ICU en la ciudad de

Zaragoza. En cualquier caso los resultados previsibles aproximan con precisión a este fenómeno en la capital de Aragón y a su caracterización espaciotemporal.

Así, con intención de hacer una caracterización profunda y completa, a continuación, se exponen los 4 objetivos específicos de este estudio:

- Caracterizar la ICU promedio de la ciudad de Zaragoza para todo el año 2020 y analizar las diferencias de temperatura entre el centro y la periferia de la ciudad;
- Caracterizar la ICU promedio para cada estación del año 2020 (invierno, primavera, verano y otoño) y analizar sus anomalías según el resultado del apartado anterior;
- Analizar la evolución horaria (ciclo diario de 24 horas) de la ICU para todo el año y para cada estación;
- Caracterizar la ICU anual y estacional a las 00:00, 12:00 y 21:00.

Para facilitar la interpretación y comparación de los resultados se van a realizar tablas, figuras o cartografías en los diferentes objetivos.

Por fin, el estudio trabaja sobre la sostenibilidad de los espacios urbanos, de manera que se implican varios de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados en la agenda 2030 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2015). Los Objetivos del Desarrollo Sostenible que se abordan en este estudio son: 9.1, 11.3, 11.6, 11b, 13.1, 13.2 y 13.3.

Así, consistiendo la estructura del presente trabajo en 5 apartados que engloban en su totalidad las actividades realizadas en el contexto de análisis de islas de calor urbanas, el apartado **Área de Estudio**, se va a describir la ciudad de Zaragoza con el fin de conocer las características climáticas de la zona, pues esto también es determinante en el comportamiento de las islas de calor urbanas.

A continuación, en el apartado de **Datos y Metodología** se describe la manera que se ha seguido para la realización de cada uno de los objetivos del trabajo. También se explican los procesos de análisis de datos y cartográficos que se han llevado a cabo en este estudio.

En el apartado **Resultados**, se van a exponer los principales resultados obtenidos, con las figuras correspondientes a cada objetivo y después en el apartado de **Discusión** se presenta su análisis y discusión.

Para terminar, en el apartado **Conclusión y Recomendaciones** se va a exponer el desenlace del trabajo y recomendaciones a futuros estudios sobre islas de calor urbanas.

2 Área de Estudio

2.1 Zaragoza

El estudio de la isla de calor urbana de este trabajo se va a realizar en la ciudad de Zaragoza. Zaragoza está situada al Nordeste de España, entre los dos grandes núcleos poblacionales del país, Madrid y Barcelona, siendo la ciudad más importante desde el punto de vista poblacional y económico de Aragón y del Valle del Ebro. Su situación estratégica la convierte en una importante ciudad industrial y comercial, con 681.877 habitantes (INE, 2020). Su entorno metropolitano se considera fuertemente especializado en el sector de la industria, en especial de la automoción. El emplazamiento de Zaragoza se establece en la zona central de la depresión del Ebro, donde confluyen los cauces de los ríos Ebro, Gállego y Huerva (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Mapa de la localización de Zaragoza, delimitación de la cuenca del río Ebro y rosa de los vientos de la ciudad (Cuadrat. *et al.*, 2020).

En su área urbana, que ocupa 967 km², la variación topográfica no supera los 100 metros de desnivel entre el eje del río Ebro y la zona más elevada de la ciudad, que está a 280 metros de altura sobre el nivel del mar y localizada en el sur de la ciudad. Las vías urbanas de la ciudad mantienen un flujo de 30.000 vehículos diarios, que sumado a la escasez de espacios verdes en las zonas céntricas, genera una imagen de ciudad compacta (Cuadrat *et al.*, 2020).

2.2 Características Climáticas

El espacio regional en el que se ubica la ciudad de Zaragoza posee un clima mediterráneo con marcada influencia continental: escasas precipitaciones y temperaturas elevadas en verano y frescas en invierno. Existe un notable contraste entre el frío invierno, con una temperatura media en enero de 2020 de 6,04 °C y el cálido verano, con 26,11 °C de media en el mes de julio (Tabla B.15).

Además, durante el invierno no son inhabituales las heladas y las situaciones en las que las temperaturas se mantienen varias horas en valores próximos a cero, incluso durante varios días consecutivos con situaciones de nieblas persistentes. En el extremo contrario, durante el verano se registran valores que sobrepasan frecuentemente los 35 °C.

Según Cuadrat *et al.* (2005), desde finales del siglo XIX la evolución de la temperatura en Zaragoza no ha mantenido un comportamiento constante, al igual que ocurre en otras partes de España. Se observa un claro calentamiento desde los años ochenta que se mantiene hasta la actualidad, de modo que, con el paso del tiempo, los sensores de temperatura registrarán valores más elevados. También concluyen que el calentamiento continuo intensifica los días de calor extremo, aumentando la cantidad de noches tropicales; aquellas en las que la temperatura mínima registrada no baja de los 20 °C, y que al mismo tiempo disminuye la frecuencia de días fríos.

3 Datos y Metodología

3.1 Búsqueda de Información Bibliográfica

En este apartado se explica el procedimiento de obtención de información que ha sido necesaria para establecer el marco teórico en el que se basa el estudio.

Para lograr que la búsqueda fuera efectiva, previamente se ha establecido el tema que se va a estudiar, en este caso: isla de calor urbana. Así la búsqueda se orienta hacia este ámbito de la geografía.

En este caso, el primer contacto bibliográfico ha sido con artículos sugeridos por el Departamento de Geografía de la universidad de Zaragoza. Se trata tanto de artículos referentes en este ámbito (I. D. Stewart & Oke, 2012), como previos estudios de clima urbano realizados por grupos de investigación del departamento (Cuadrat *et al.*, 2005).

Tras la primera toma de contacto y la comprensión del funcionamiento de las islas de calor urbanas, se ha continuado la búsqueda con la idea de conocer la evolución de los conocimientos sobre isla de calor urbano, desde que se consideró este concepto por primera vez (Howard, 1833), hasta la relevancia que tiene en la actualidad (Demuzere *et al.*, 2019). Para realizar esta selección se ha hecho uso de herramientas de búsqueda bibliográfica. Para limitar la búsqueda a la información que resultará útil para la realización de este estudio, se han identificado conceptos clave como: clima urbano (*urban climate*) o isla de calor urbana (*urban heat island*). Se ha dado especial atención a la fecha de publicación, con intención de comprender cómo se han ido desarrollando, mejorando y transmitiendo los conocimientos en este ámbito.

De esta manera también se ha hecho una búsqueda intencionada de estudios de islas de calor que se han hecho en ciudades de distintas partes del mundo (Sweeney, 1987, Montávez *et al.*, 2000, Pinho & Manso Orgaz, 2000). Esto ha sido útil para comparar diferentes puntos de vista a la hora de abordar el efecto de las islas de calor, y también para la familiarización de la manera de aplicar las bases teóricas en estudios prácticos concretos.

Para completar el listado bibliográfico en el que se apoya este estudio, se han seleccionado citas bibliográficas de acuerdo con la relevancia y el protagonismo en los documentos que se han ido leyendo.

Tras leer, comprender y profundizar en el conocimiento sobre clima urbano, se ha sintetizado la información suficiente y necesaria para poder realizar un estudio sobre isla de calor urbana en la ciudad de Zaragoza.

3.2 Base de Datos

Para realizar este estudio se han utilizado registros horarios de temperatura desde diciembre de 2019 hasta diciembre de 2020. Estos datos han sido recogidos por la red de sensores termohigrométricos del Departamento de Geografía de la universidad de Zaragoza, que están colocados estratégicamente en distintos puntos de la ciudad (Figura 3.1).

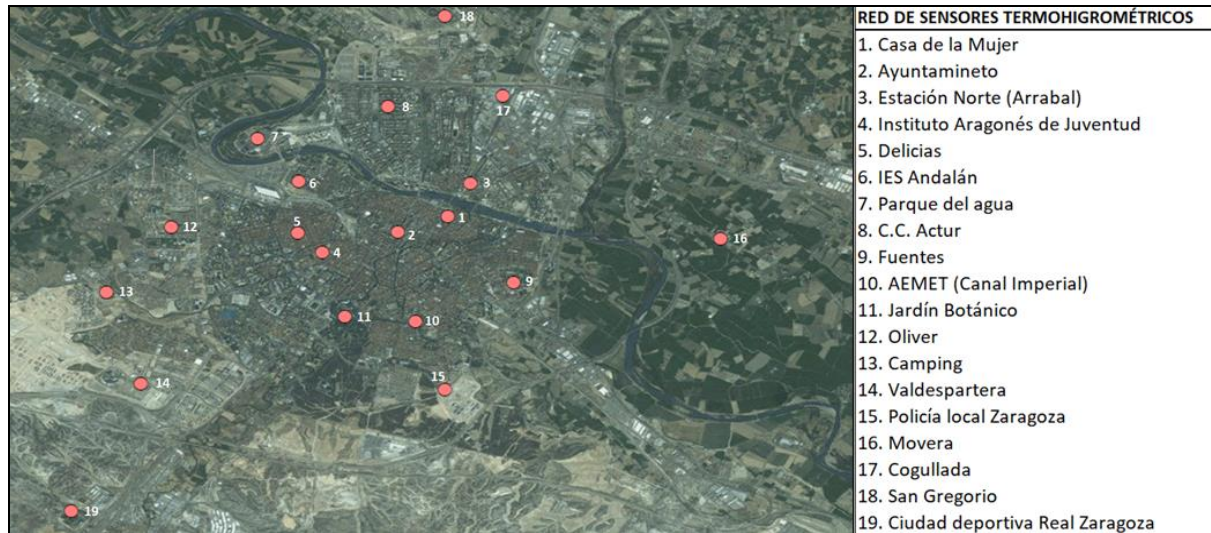


Figura 3.1 – Distribución espacial de los 19 sensores utilizados, en puntos de color. El código de cada sensor corresponde con la numeración en color blanco. A la derecha, nombre completo de cada sensor.

Los sensores son del tipo HOBOPro v2 (Figura 3.2) y disponen de un *data-logger* para almacenar la información. Su rango de funcionamiento para las temperaturas es de los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a los $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una precisión de $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una resolución de $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los sensores se montan dentro de un soporte tipo M-RSA para protegerlos de la radiación solar directa y del efecto de la lluvia.

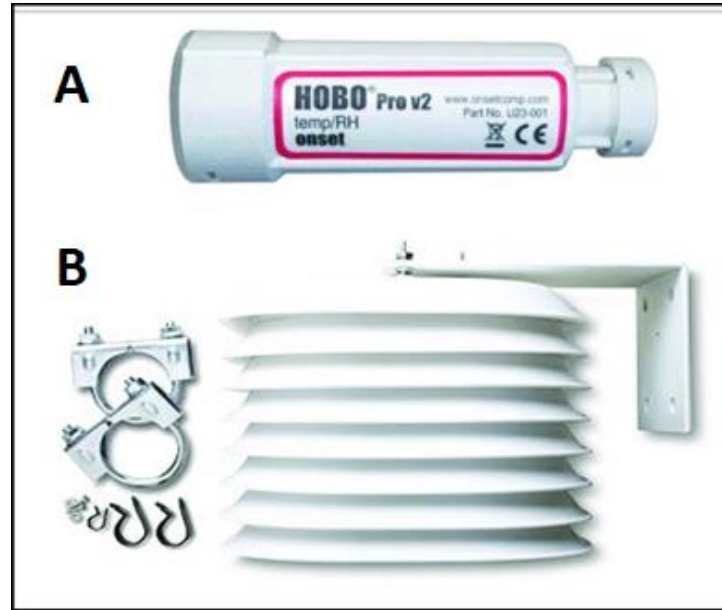


Figura 3.2 – A: sensores tipo HOB0 utilizados. B: elemento de protección frente a la radiación solar directa.

Es importante haber realizado un estudio previo para establecer las zonas óptimas donde serán instalados los sensores en base al objetivo de estudiar las diferencias de temperatura entre los distintos ambientes de la ciudad y poder comparar varias zonas climáticas siguiendo el modelo de Stewart y Oke, (2012). En este caso para su ubicación se tuvieron en cuenta trabajos ya desarrollados desde el comienzo de este siglo por Cuadrat *et al.* (2005), Cuadrat *et al.* (2015) o Cuadrat *et al.* (2020).

Así, los sensores quedan repartidos por varias zonas de la ciudad con características diferentes en cuanto a su estructura urbana, desde zonas céntricas con un entramado compacto (Plaza Santa Marta o Delicias), hasta zonas más alejadas y periféricas de la ciudad (Ciudad Deportiva del Real Zaragoza o Barrio de San Gregorio). Todos ellos están colocados a tres metros del suelo en espacios públicos, en su mayoría pertenecientes al Ayuntamiento de Zaragoza (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Sensor ubicado en San Gregorio (T18) y vista en detalle en la esquina superior derecha.

Una vez recogidos los datos de los sensores, es imprescindible que pasen un exhaustivo control de calidad, sobre el que se hace referencia a continuación, con el fin de detectar posibles datos aberrantes o lagunas de información.

3.3 Control de Calidad

En primer lugar, se ha homogeneizado el lenguaje de los datos. Esto es, por ejemplo, utilizar la misma representación horaria en todos los sensores, algunos indican la hora en sistema de dos mitades de 12 horas (am y pm) y otros en sistema de 24 horas. Esto puede ser distinto para cada sensor, dependiendo de si disponen de conexión bluetooth o no.

Para que el programa pueda detectar los datos de los mismos días, el formato de los horarios debe estar estandarizado.

A continuación, se han detectado datos anómalos, o sea, datos imposibles debidos a fallos en los sensores. En este caso aquellos registros menores de -15°C y mayores de 50°C se han descartado, pues conociendo las condiciones climáticas del área de estudio, son valores con una probabilidad muy baja o casi nula de ocurrencia.

En tercer lugar, se ha hecho una búsqueda y análisis de datos repetidos. Si se detectan registros de más de 10 horas con la misma temperatura, lo más seguro es que sea un error, pero se ha de analizar cada caso para determinar si las condiciones atmosféricas hacían posible esos

valores. En el caso de registros de humedad, estos datos no deberían considerarse erróneos, pues en condiciones de niebla es muy común recoger el mismo valor durante varias horas.

El siguiente paso es detectar diferencias de temperatura muy elevadas de una hora a otra. Para esto no existe un valor fijo a partir del cual los datos se puedan descartar, pero suelen ser relevantes aquellas diferencias que superan los 7 °C en un periodo de una hora. En los meses de verano, entrada la tarde, es posible observar este tipo de diferencias bruscas entre horas. Tras analizar la situación se ha sabido que estos registros se deben al efecto de las tormentas y lluvias de verano, comunes a esas horas y durante esas fechas y que provocan un descenso brusco de la temperatura. O sea, las diferencias bruscas de temperatura pueden tener justificación y ser datos normales, lo que hace necesario el estudio de cada situación. Para ello resulta útil apoyarse en situaciones sinópticas, que dan distintos escenarios de condiciones meteorológicas.

El último paso consiste en completar las posibles lagunas de información. Primero es necesario detectarlas y después extrapolar los datos para poder completar los que están vacíos.

Todo el proceso se realizó a partir de scripts en R y fue ejecutado en R Studio.

3.4 Plan de Análisis y Cálculo de Estadísticos

Siguiendo lo explicado anteriormente, el objetivo de este trabajo es caracterizar la isla de calor urbana, que como se explica en Stewart y Oke, (2012), es la diferencia de temperatura entre dos zonas locales climáticas distintas. En este estudio se dispone de 19 sensores que nos ofrecen información sobre cada una de sus zonas, por lo que la diferencia se calculará entre las 19 zonas respecto con la que resulte ser la más fresca.

Una vez que se ha tenido la base de datos depurada y sin fallos, como se detalla en el apartado anterior, el siguiente paso ha sido organizar los datos de manera que puedan ser analizados atendiendo a los objetivos de este estudio.

A continuación, se explica el procedimiento de análisis y estadística que se ha seguido para alcanzar cada uno de los cuatro objetivos propuesto. Se ha utilizado el programa Microsoft Excel®.

En primer lugar, para caracterizar la UHI promedio de la ciudad de Zaragoza para todo el año 2020, se han analizado las diferencias de temperatura entre el centro y la periferia de la ciudad. Para ello, primero se han agrupado los datos registrados desde el 01/01/2020 hasta el 12/12/2020 de los 19 sensores. A continuación, se ha calculado la media de los 365 datos de cada uno de los observatorios para poder después calcular la diferencia entre el valor medio anual de cada observatorio con el que haya resultado ser el más fresco, que en este caso ha sido

el observatorio T19, ubicado en la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza, al sur de la ciudad y en una zona no urbanizada.

De esta manera, se ha conseguido una idea general de cómo varían las temperaturas promedio anuales en Zaragoza. Al analizar las diferencias de temperatura entre el centro y la periferia, se ha podido determinar la anomalía entre zonas y así, la intensidad de la UHI durante el año 2020.

Para facilitar la interpretación y análisis de los resultados obtenidos, se ha realizado la cartografía con el promedio de las temperaturas y con su anomalía.

El siguiente objetivo era caracterizar la UHI promedio para cada estación del año y analizar sus anomalías según el resultado del apartado anterior. Para ello, primero se han agrupado los datos necesarios para ello, en este caso, para cada estación del año. Para diferenciar las 4 estaciones se han agrupado los meses de tres en tres atendiendo a los criterios de agrupación habitualmente usados en Climatología, de la siguiente manera: diciembre 2019, enero y febrero de 2020 como invierno; marzo, abril y mayo de 2020 como primavera; junio, julio y agosto de 2020 como verano y por último septiembre, octubre y noviembre de 2020 como otoño. Según esto, para analizar por ejemplo la isla de calor durante la estación de invierno, lo primero ha sido agrupar los datos registrados desde el 01/12/2019 hasta el 28/02/2020 en los 19 sensores. A continuación, se ha calculado el promedio de temperatura para los tres meses en cada observatorio. Al igual que en el apartado anterior, también se ha calculado la anomalía respecto a la estación más fresca, es decir, con el observatorio T19. Para ello, se ha calculado la diferencia entre el valor estacional promedio de cada observatorio con el del T19. Este mismo proceso se ha repetido con las demás estaciones del año; primavera, verano y otoño, recopilando en cada caso los datos de los meses respectivos.

Así, se ha conseguido diferenciar el comportamiento que tiene la isla de calor urbano en Zaragoza para cada estación del año. También, mediante el análisis de las anomalías se ha analizado cómo varía su intensidad en función de la época del año.

En este caso también se ha realizado una cartografía para facilitar su interpretación. Se va a caracterizar la temperatura promedio en cada estación del año, y también se va a hacer con la anomalía.

Lo siguiente a estudiar ha sido la evolución horaria de la temperatura durante todo el año y durante cada estación en los dos observatorios con mayor diferencia, en el caso de este estudio, el observatorio T05; localizado en Delicias, como el más cálido y el T19; localizado en la C.D. Real Zaragoza, como el más fresco. Para poder estudiar esta evolución lo primero ha sido agrupar, atendiendo al día y a la hora, los registros de temperatura de los que se dispone. Primero, para hacer la evolución horaria durante todo el año, se ha buscado desde el 01/01/2020

hasta el 31/12/2020 los registros de las 00:00. Una vez ordenados, se ha calculado la diferencia entre ellos cada día del año y después se ha hecho la media de ese valor. Se ha conseguido así la anomalía media de la ICU a las 00:00 en un año. Al repetir este proceso con cada una de las 23 horas que quedan del día, se ha conseguido la anomalía media de cada hora durante un año.

Para interpretar mejor estos datos, el siguiente paso ha sido calcular la desviación estándar de las anomalías para cada hora. Así, se percibe cómo difieren entre ellas las temperaturas en una hora del día. El último paso para poder apreciar mejor la evolución horaria de la ICU durante un año ha sido realizar un gráfico, donde también aparece la desviación estándar de cada hora.

Este mismo proceso se ha repetido para cada estación del año, agrupando los meses atendiendo al criterio climático descrito en el apartado anterior. De esta manera, para calcular la evolución en invierno, se ha empezado limitando la búsqueda de los datos entre el 01/12/2019 y el 28/02/2020. Una vez se han tenido los datos que interesan, se ha comenzado con la búsqueda de los registros para cada hora del día para los observatorios T05 y T19. Esto se ha repetido con todas las estaciones del año. El procedimiento ha sido el mismo que el que se ha seguido para la evolución anual, así que se ha vuelto a calcular la diferencia entre los observatorios, la anomalía media y la desviación estándar. También se ha hecho un gráfico para cada estación.

Por último, se pretende conocer la anomalía respecto a la zona más fresca en tres momentos del día: a las 00:00, a las 12:00 y las 21:00, tanto para todo el año como para cada estación. Para ello se han vuelto a agrupar los registros dependiendo del día y de la hora. Primero, desde el 01/01/2020 hasta el 31/12/2020 se han buscado todos los registros de las 00:00 para los 19 observatorios del estudio. Una vez ordenados, se ha calculado el promedio anual para cada observatorio. Después se ha calculado la anomalía respecto al observatorio más fresco (ciudad deportiva en nuestro caso) con los 18 observatorios restantes haciendo la diferencia entre sus respectivos promedios anuales.

3.5 Modelización Espacial y Cartografía

Con los datos organizados y preparados de acuerdo con los objetivos de este trabajo, el siguiente paso ha sido someterlos a un tratamiento cartográfico que se ha desarrollado en el software ArcGIS®, del campo de los sistemas de información geográfica (SIG). Esto va a permitir visualizar la variación espacial de la temperatura en el entramado urbano de Zaragoza atendiendo a cada situación; promedios y anomalías anuales, estacionales, y en tres momentos del día.

La base de datos de la que se parte ofrece información de carácter puntual, registrada en puntos concretos de los que conocemos su localización en el espacio. Para poder encontrar

relación entre ellos y conocer su variación por toda la ciudad, se han tenido que convertir en superficies continuas de información. Para lograrlo, se ha aplicado un método de interpolación espacial, que convierte datos puntuales en superficies continuas ofreciendo valores para aquellos puntos que no disponen de dato medido.

Se ha probado para ello la pertinencia de tres métodos distintos de interpolación distintos, todos ellos implementados en la extensión Spatial Analyst de ArcGIS: interpolación local, ponderación inversa a la distancia y kriging, con el fin de aplicar aquel que haya ofrecido un valor de error cuadrático medio (RMSE) más bajo a partir del proceso de validación cruzada que desarrolla ArcGIS®. El error cuadrático medio es un término estadístico que calcula la diferencia entre el valor estimado y el que se estima (Vicente *et al.*, 2003). En este caso, para cada punto cuyo valor se conoce, o sea, los valores de los 19 sensores, calcula la diferencia entre la estimación de ese valor generado por el método de interpolación, y el valor real que se conoce de este punto. El RMSE mide el promedio del cuadrado de esa diferencia para cada uno de los valores que se conocen. Se calcula según la Eq. (1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Donde: P_i es el valor estimado, O_i es el valor de referencia y n es el número de puntos usado en la interpolación.

Finalmente, la ponderación inversa a la distancia ha resultado ser la opción más ventajosa, dando valores de RMSE de entre 0,3 y 0,5 °C.

A partir del método de interpolación basado en el inverso a la distancia, el valor que toma una variable en un punto del espacio es el promedio de los valores de los puntos de muestreo incluidos en el conjunto de interpolación, ponderados por la distancia a la que se encuentran. Esta ponderación incluye el inverso a la distancia elevado a un exponente r . El valor de este exponente se puede modificar, pero en este caso se ha utilizado la función que implementa ArcGIS® para el buscar el valor óptimo, que ha oscilado entre 1 y 4 entre todas las cartografías realizadas. A continuación, se presenta el método de interpolación basado en el inverso a la distancia utilizado en este estudio que se calcula según la Eq. (2).

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{ij}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-r}} \quad (2)$$

Donde \hat{Z} es el valor estimado en el punto x_0 , n es el número de puntos usado en la interpolación, x_i es el valor conocido en el i -ésimo punto, d_{ij} es la distancia desde el punto conocido al el punto a estimar y r es la potencia del inverso a la distancia.

Para calcular los valores de cada punto del espacio, la interpolación de este estudio se ha hecho incluyendo los valores de 15 puntos de muestreo y una distancia de 3000 metros a su alrededor. En caso de que para llegar a tomar los valores de 15 puntos sea necesario sobrepasar la distancia indicada, el programa lo hace automáticamente. A continuación, en la Figura 3.2 se muestran las propiedades del método de interpolación basado en el inverso a la distancia aplicadas a todas las cartografías del estudio.

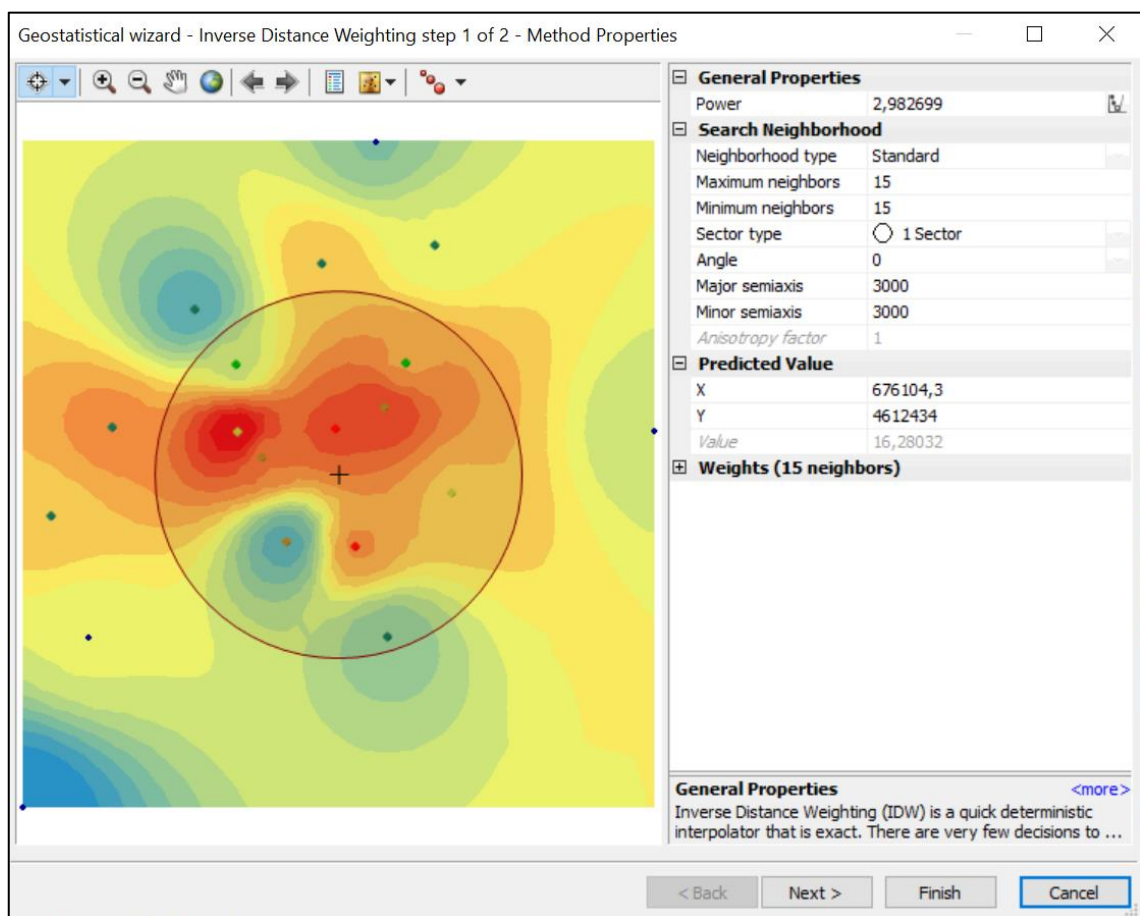


Figura 3.2 – Propiedades del método de interpolación basado en el inverso a la distancia.

Una vez terminada la modelización espacial, se ha superpuesto sobre un mapa base de la ciudad de Zaragoza (Esri, 2020), de manera que se pueda asociar e interpretar el resultado con la localización en la área de estudio. Para esto es importante incluir las coordenadas X e Y de cada sensor de manera que coincida con su localización real sobre el mapa.

El método de interpolación se ha aplicado en referencia a tres de los cuatro objetivos abarcados en el presente estudio para poder así completarlos. Para caracterizar la isla de calor urbana anual se han realizado dos cartografías: una con los valores promedios y otra con las anomalías respecto al observatorio más fresco. Para caracterizar la ICU estacional, se han realizado 4 cartografías con los valores promedio de cada estación del año (invierno, primavera, verano y otoño) y otras 4 con las anomalías. Por último, se ha caracterizado la ICU con las anomalías a las 00:00, a las 12:00 y a las 21:00 con los valores anuales y estacionales.

Así, al final se han realizado un total de 25 interpolaciones que han servido como base para sustentar y explicar los resultados de este estudio.

4 Resultados

4.1 Intensidad Anual de la Isla de Calor Urbana

Tras realizar los promedios anuales de los registros de temperatura de cada sensor, se ha observado que, durante el año 2020 el observatorio urbano que ha recogido las mayores temperaturas es el que está situado en Delicias, alcanzando los 16,94 °C, seguido por la casa de la mujer (16,78 °C), el ayuntamiento (16,6 °C) y Las Fuentes (16,47 °C). Como se observa en la Figura 4.1, estas zonas son las que mayor diferencia de temperatura han tenido respecto a la C.D. RZgz, observatorio representativo de la periferia no urbanizada.

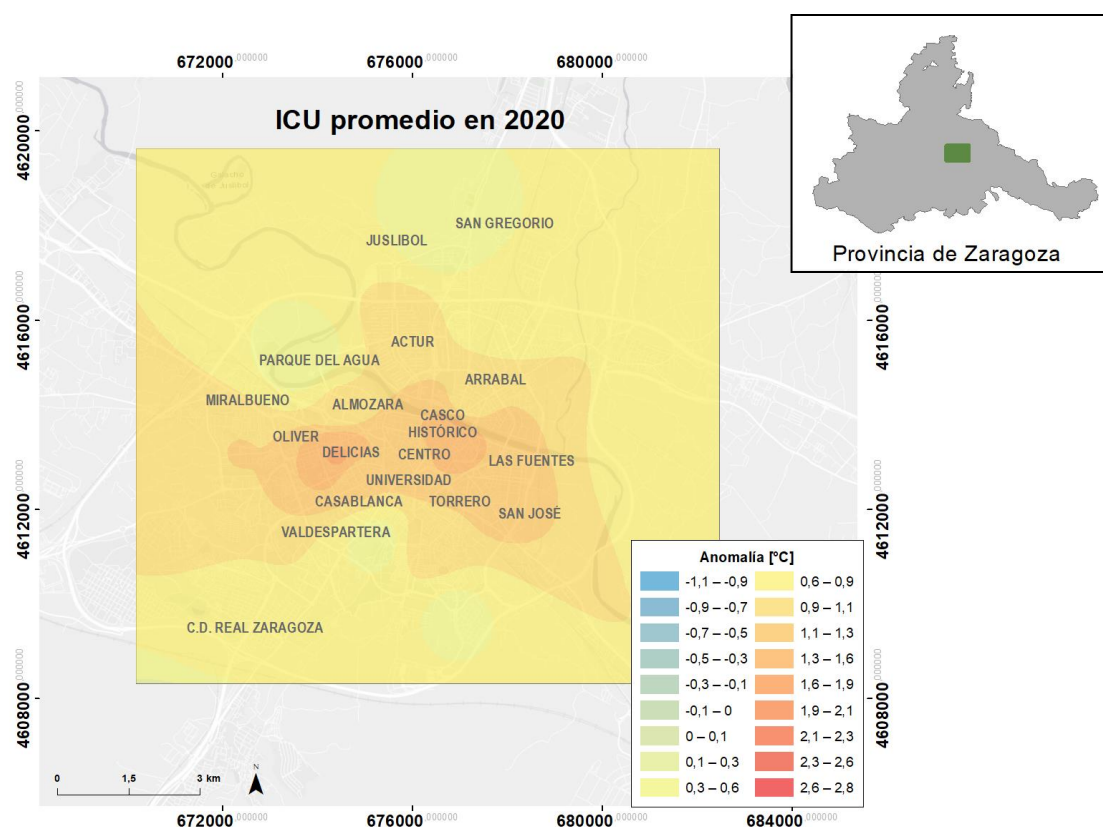


Figura 4.1 – Isla de calor urbana promedio de Zaragoza durante el año 2020.

Por otro lado, el observatorio que ha dado los valores más bajos de temperatura ha sido el de la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza, llegando a 15,31 °C, seguido por el del parque del agua (15,67 °C), San Gregorio (15,73 °C) y el jardín botánico (15,81 °C).

La diferencia entre el valor promedio anual de Delicias y el de la C.D. RZgz, ha sido de 1,62 °C, que es la mayor anomalía promedio anual entre el centro y la periferia de la ciudad (Figura 4.1).

En los apéndices A y B aparece el mapa de las temperaturas promedio anuales y las tablas con los valores de cada sensor.

4.2 Variabilidad Estacional de la Isla de Calor Urbana

Tras calcular los promedios trimestrales para cada estación del año, el valor más alto se ha observado en verano, llegando a 25,36 °C, superando por 15,96 °C el valor promedio más alto de invierno, 9,40 °C que ha sido la estación más fría. En segundo lugar, después de verano, la estación de otoño ha sido, con un valor promedio máximo de 16,78 °C, más cálida que la primavera, con un valor de 16,40 °C.

Al hacer la diferencia con los promedios estacionales de cada observatorio respecto a la C.D. RZgz, se observó que la mayor anomalía promedio ha sido en otoño, con un valor 1,81 °C, y por tanto ha sido la estación donde mayor intensidad promedio ha tenido la ICU. En la Figura 4.2 se presenta la isla de calor promedio en esta estación.

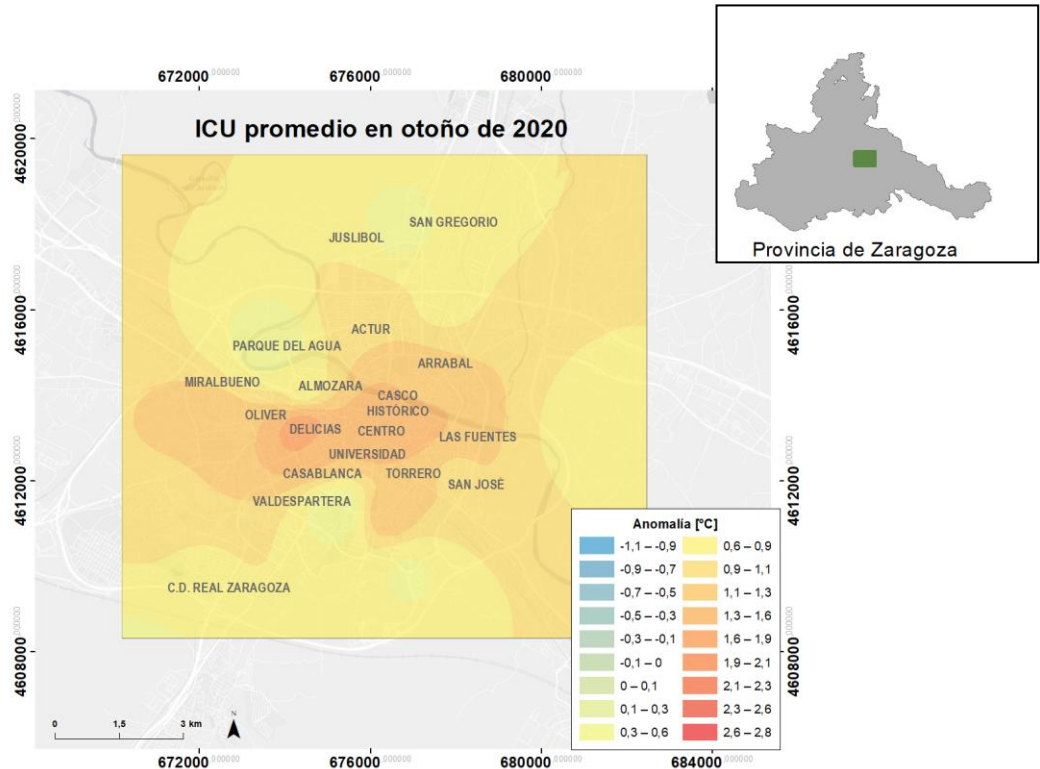


Figura 4.2 – Isla de calor urbana promedio de Zaragoza en otoño de 2020.

Por otro lado, en invierno la anomalía promedio ha sido más baja que en el resto de las estaciones, con un promedio de 0,66 °C y un valor máximo de 1,33 °C, como se presenta en la Figura 4.3.

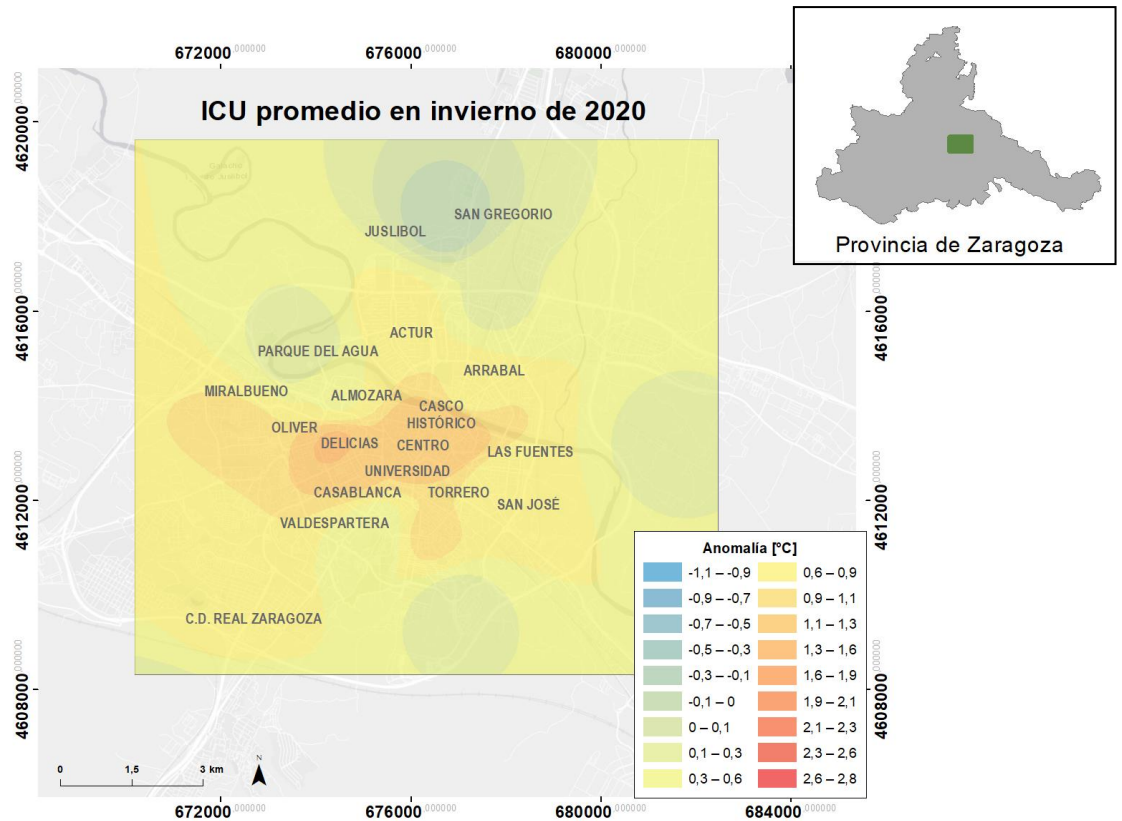


Figura 4.3 – Isla de calor promedio de Zaragoza en invierno de 2020.

La anomalía máxima de verano ha sido de 1,67 °C, pocos grados más que la de primavera, que ha sido de 1,62 °C.

En los apéndices A y B aparecen los mapas de las temperaturas promedio de cada estación y las tablas con los valores de todos los sensores en cada caso.

4.3 Evolución Horaria de la Isla de Calor Urbana

A partir de los datos del sensor T05, en Delicias, y el T19, en la CD RZgz, que son los que mayor diferencia de temperatura promedio anual han tenido, se ha conocido cómo evoluciona la anomalía de la ICU a lo largo de las horas del día, calculando el promedio de todos los días del año. Esta evolución se puede observar en la Figura 4.4.

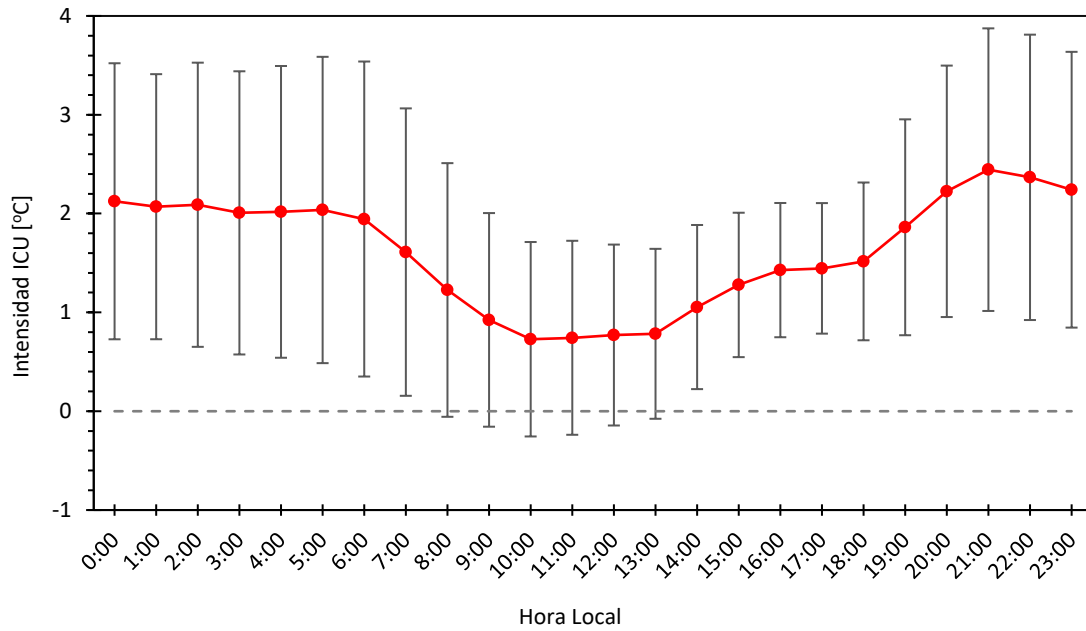


Figura 4.4 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante el año 2020. Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar.

De acuerdo con el gráfico de la Figura 4.4, el valor promedio máximo de intensidad de la ICU se alcanza a las 21:00, siendo de 2,44 °C de diferencia entre el centro y la periferia. Por otro lado, la mínima ha sido a las 13:00, cuando la diferencia media entre las dos zonas ha sido de 0,73 °C. También se ha calculado la desviación estándar de la anomalía en cada hora, que resulta ser más elevada a las 6:00, cuando alcanza 1,59 °C. De la misma manera, a las 17:00 la desviación estándar es de 0,66 °C, la más baja de todas las horas. Entre las 8:00 y las 13:00 la desviación alcanza valores por debajo de 0,00 °C.

Conocidos los resultados anuales, a continuación, se presentan los de cada estación, empezando por invierno (Figura 4.5), cuando más baja ha sido la intensidad de la isla de calor.

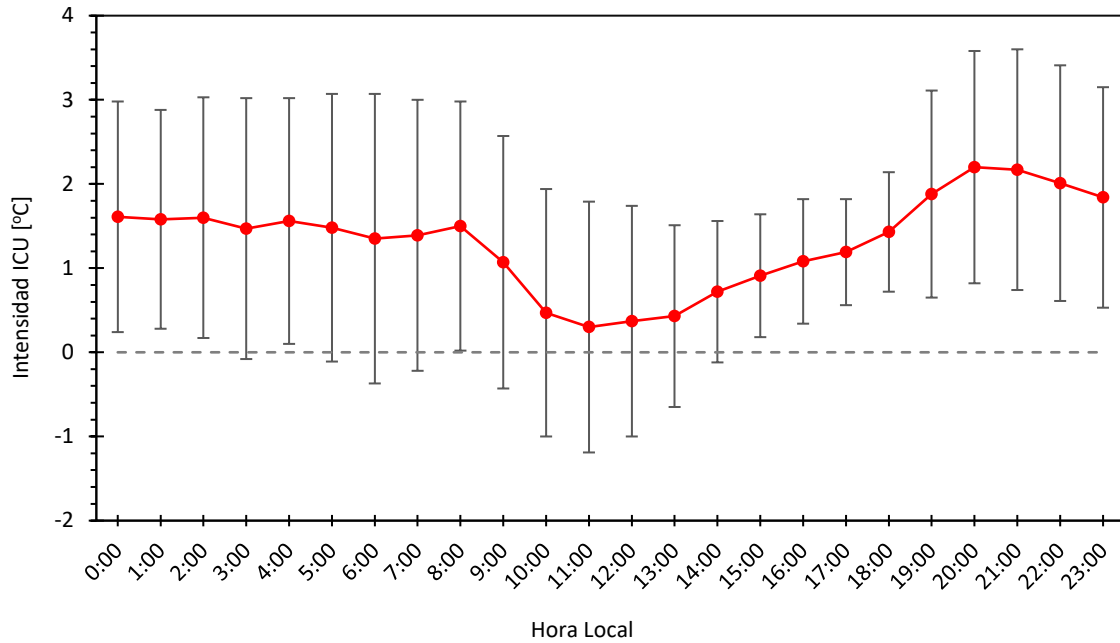


Figura 4.5 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante el invierno de 2019/2020. Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar.

Durante la estación de invierno, como se muestra en la Figura 4.5, se han dado las anomalías más bajas. En concreto, a las 11:00 se ha alcanzado una anomalía media de 0,30 °C, la mínima durante todo el año. Por otra parte, la anomalía media máxima se ha alcanzado a las 20:00, llegando a los 2,20 °C de diferencia entre el centro y la periferia. Los valores más bajos de las desviaciones estándar se dan entre las 14:00 y las 18:00 horas, siendo la mínima a las 17:00 con un valor de 0,63 °C.

Respecto a la evolución horaria de la intensidad de la ICU, según se ve en la Figura 4.5, los valores se mantienen estables durante las horas de noche y a partir de las 8:00 comienzan a descender hasta estabilizarse a partir de las 11:00 y comenzar a aumentar nuevamente hasta las 20:00.

En el otro extremo, en la época de verano la evolución de la anomalía ha seguido valores más elevados, como se presenta en la Figura 4.6.

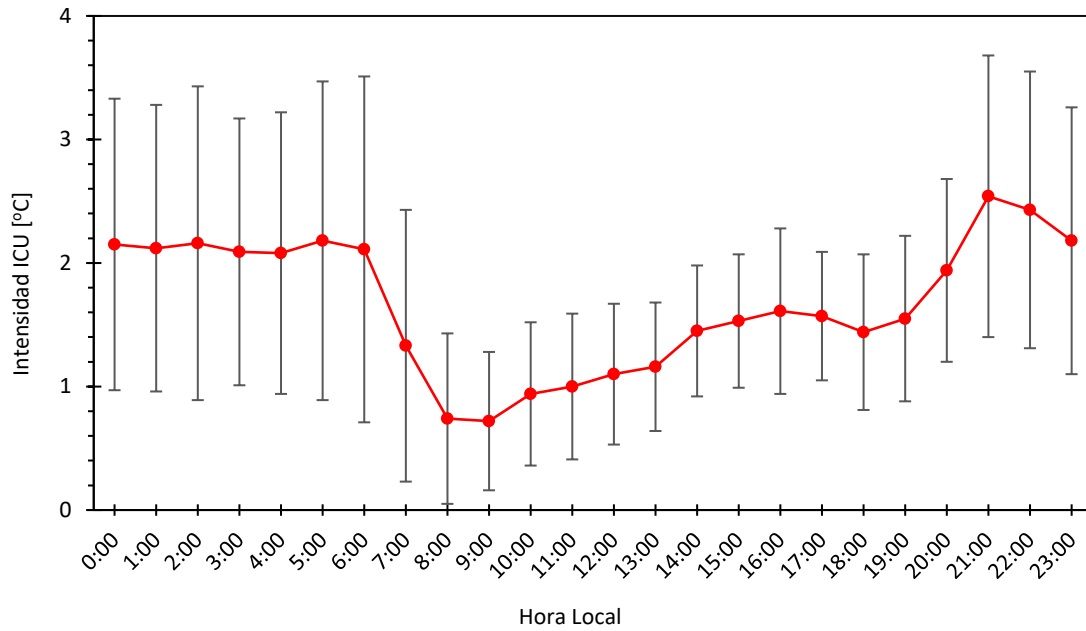


Figura 4.6 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante el verano de 2020.

Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar.

Durante el verano, como se ve en la Figura 4.6, la anomalía media desciende bruscamente en las primeras horas de luz del día, entre las 6:00 y las 8:00 horas, cuando pasa de 2,11 a 0,74 °C de diferencia entre Delicias y la C.D. RZgz. A partir de entonces aumenta uniformemente hasta que a partir de las 19:00 horas, la anomalía media pasa de 1,55 a 2,54 °C en dos horas, cuando alcanza el valor máximo a las 21:00. Se observa que entre las 8:00 y las 20:00 la desviación es menor en comparación con el resto de las horas.

Continuando con el resto de las estaciones, en la Figura 4.7 se presenta la evolución diaria de la isla de calor durante la primavera.

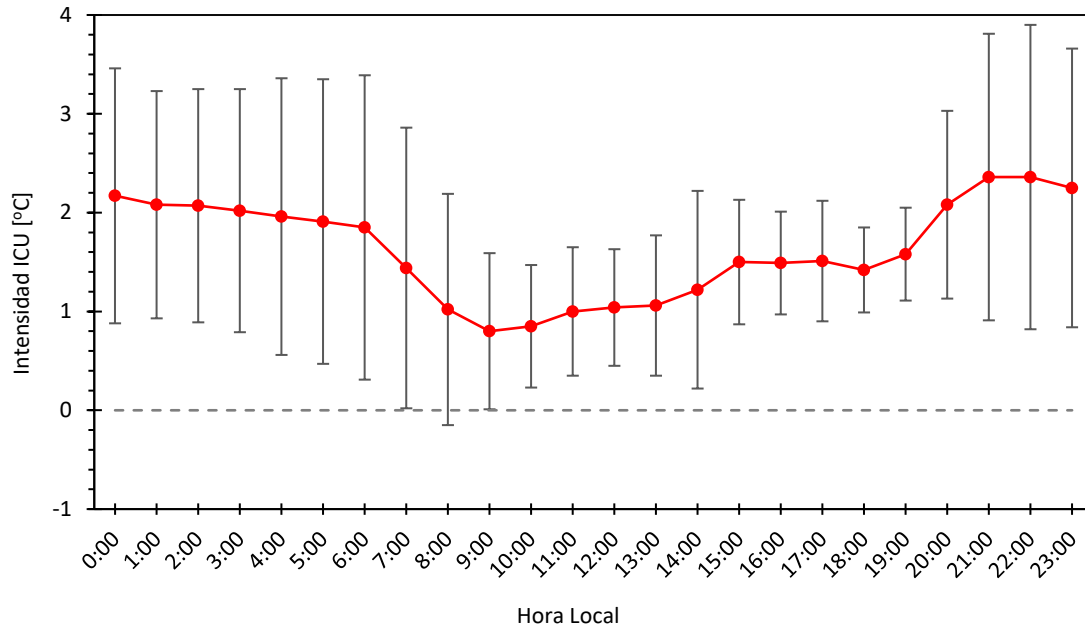


Figura 4.7 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante la primavera de 2020.

Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar.

Durante la primavera, Figura 4.7, la anomalía promedio es mayor entre las 20:00 y las 6:00, cuando alcanza valores en torno a 2,00 °C. A partir de las 6:00 desciende hasta alcanzar el valor mínimo de 0,80 °C a las 9:00. En esta estación se ha dado el valor más bajo de desviación, siendo de 0,43 °C a las 18:00.

Por último, se presenta la evolución de la estación de otoño, en la Figura 4.8.

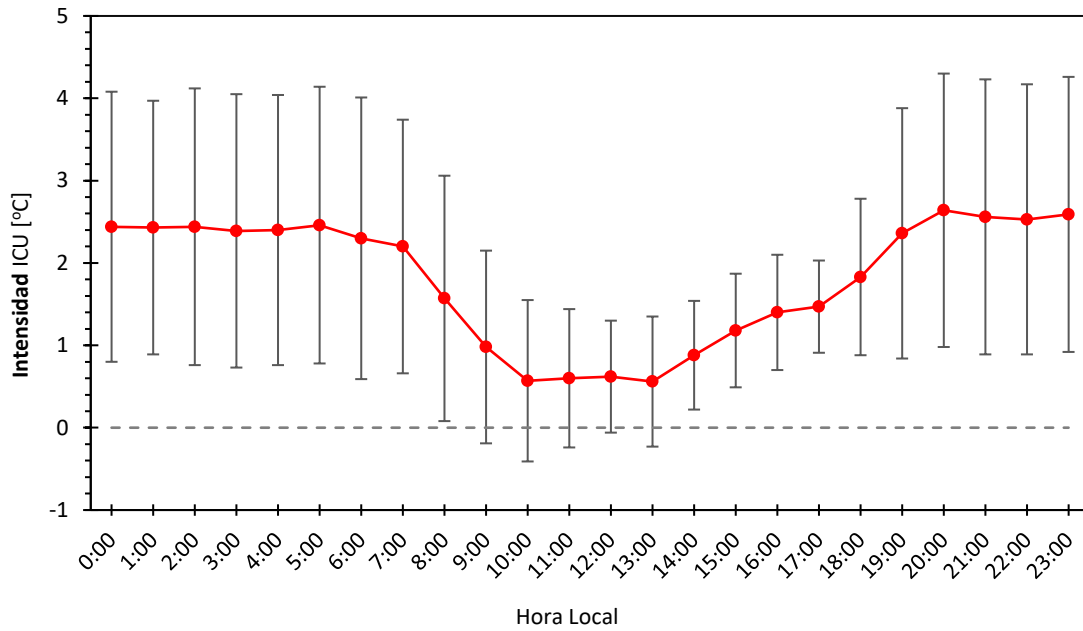


Figura 4.8 – Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor urbana durante el otoño de 2020.

Línea roja: anomalía media. Barras verticales: desviación estándar.

En otoño, como se ve en la Figura 4.8, a partir de las 7:00 la temperatura disminuye y se mantiene estable entre las 10:00 y las 13:00, cuando alcanza la anomalía promedio mínima de 0,56 °C. A partir de entonces aumenta hasta las 20:00, que es cuando se ha dado la anomalía promedio más elevada del año, con un valor de 2,64 °C. La menor desviación aparece a las 17:00, cuando es de 0,56 °C y la máxima a las 6:00, cuando es de 1,71 °C.

En el Apéndice B se pueden consultar los valores de cada gráfico presentado en este apartado, de la Tabla B.4 a Tabla B.8.

4.4 Caracterización de la Isla de Calor Urbana en Tres Momentos del Día

Tras considerar sólo las temperaturas anuales registradas en tres momentos del día; 00:00, 12:00 y 21:00 se observó que el comportamiento de la ICU es diferente entre los tres momentos. Además, la misma diferencia entre las tres horas mencionadas, se encuentra para cada escenario estudiado: durante todo el año y en cada una de las 4 estaciones. En todos los casos la comparación se hace sólo entre las tres horas a analizar, independientemente de que en algunos casos no sean las horas con los resultados extremos de entre todas las horas del día.

El distinto comportamiento en cada hora puede observarse en el gráfico de la Figura 4.9, donde aparecen los valores promedio de la anomalía anual de cada sensor respecto a la C.D. RZgz.

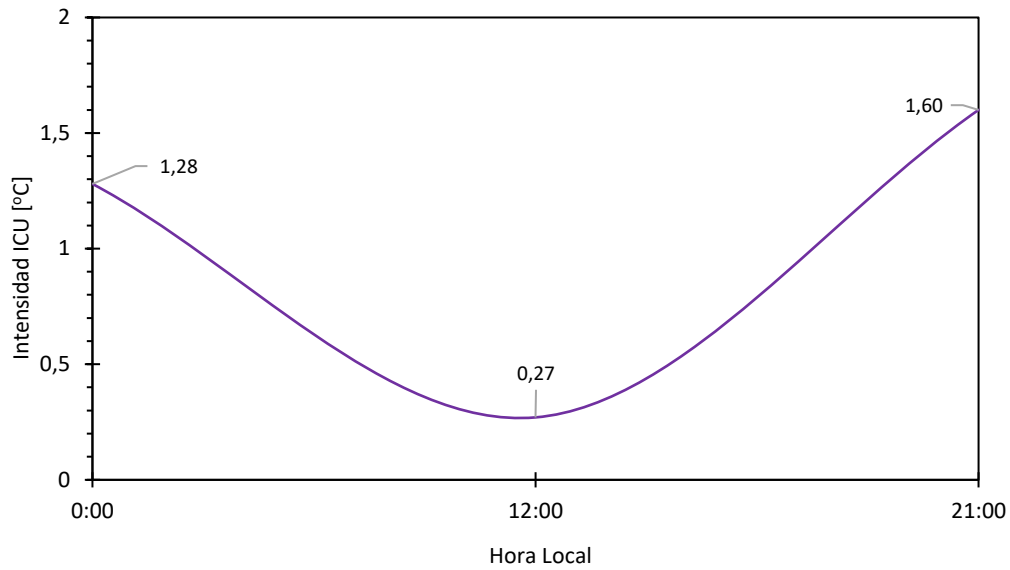


Figura 4.9 – Intensidad anual de la ICU a las 00:00, 12:00 y 21:00.

Comenzando por los resultados anuales, a continuación, se presentan las figuras donde se muestra la intensidad de la ICU anual a las 00:00, 12:00 y 21:00.

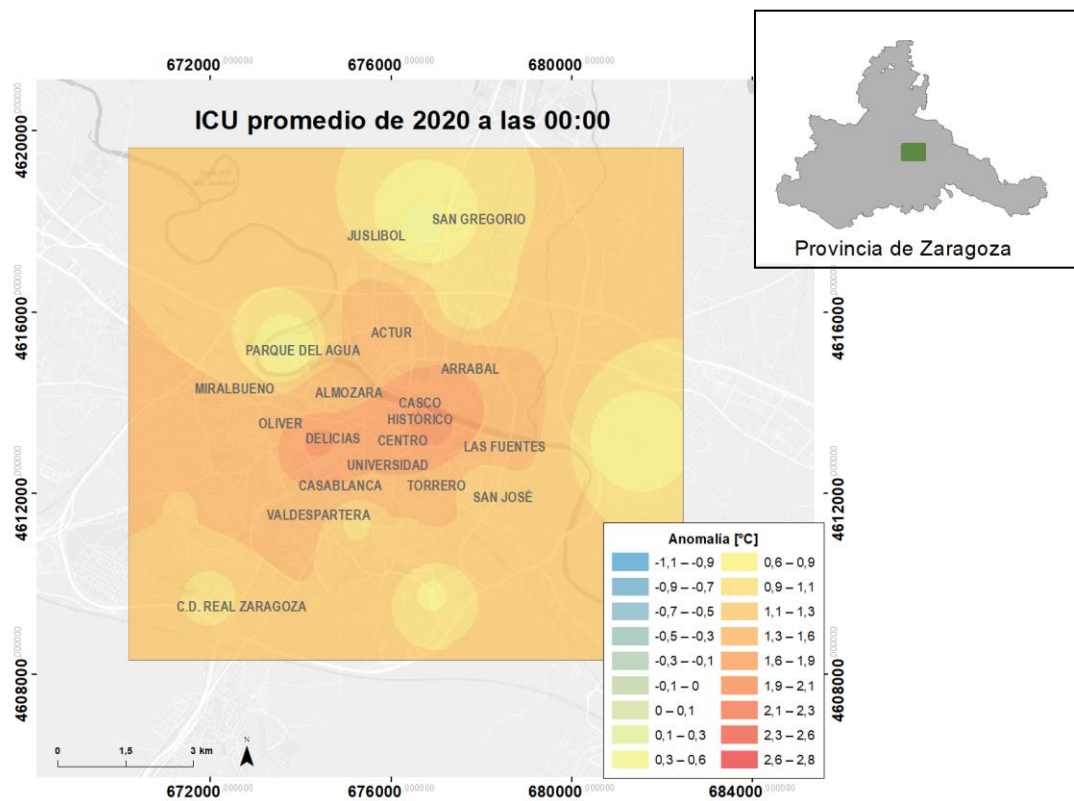


Figura 4.10 – Isla de calor promedio de Zaragoza a las 00:00 en el año 2020.

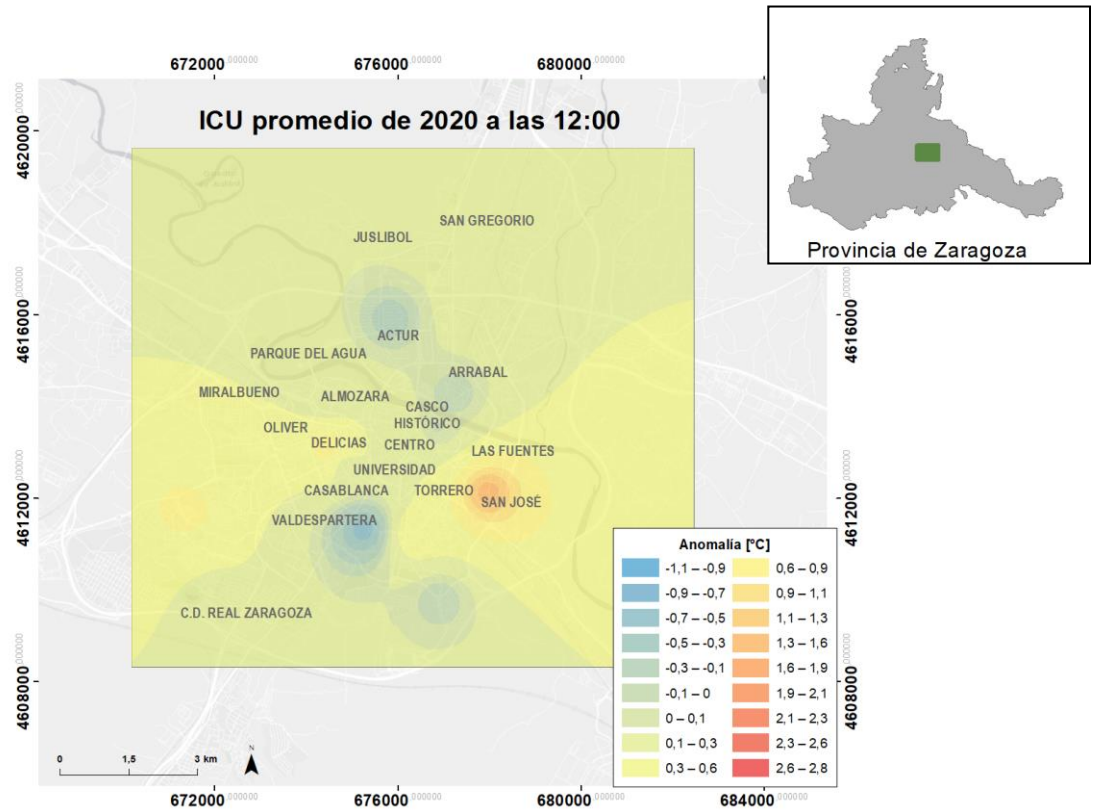


Figura 4.11 – Isla de calor promedio de Zaragoza a las 12:00 en el año 2020.

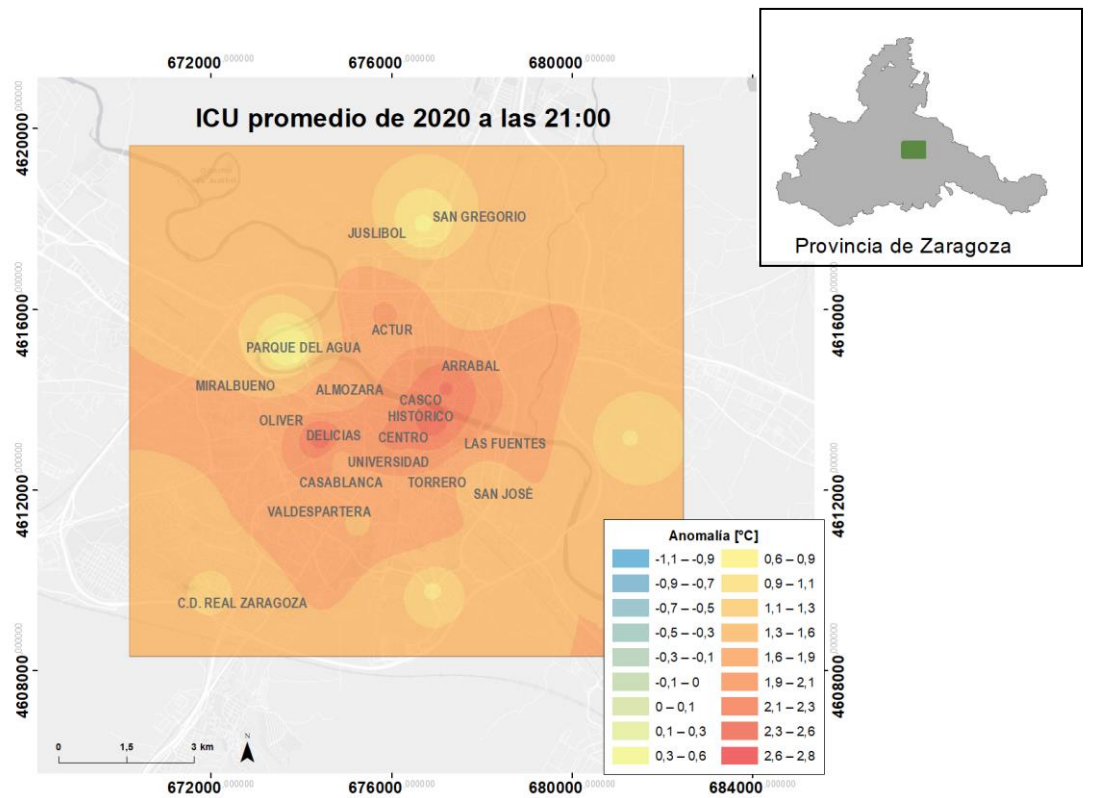


Figura 4.12 – Isla de calor urbana promedio de Zaragoza a las 21:00 en el año 2020.

Durante el año 2020, se ha observado que la intensidad de la ICU es máxima a las 21:00 (Figura 4.12) y mínima a las 12:00 (Figura 4.11), con valores máximos en cada caso de 2,47 y 1,41 °C respectivamente. A las 00:00, la anomalía máxima ha sido de 2,24 °C (Figura 4.10). Respecto al valor más bajo de anomalía, ha sido de -0,62 °C y se ha dado a las 12:00.

A las 21:00, la anomalía media ha sido de 1,60 °C de diferencia entre el centro y la periferia de la ciudad, siendo el valor más alto de los tres momentos.

La temperatura anual promedio de todos los sensores es mayor a las 12:00, cuando alcanza los 17,90 °C y menor a las 00:00, cuando el promedio es de 14,59 °C (Tabla B.9).

Ahora, en cada estación del año se observa cómo el fenómeno de la isla de calor aparece en todas ellas siguiendo el mismo patrón, pero con diferente intensidad, como puede observarse en el gráfico de la Figura 4.13 a continuación.

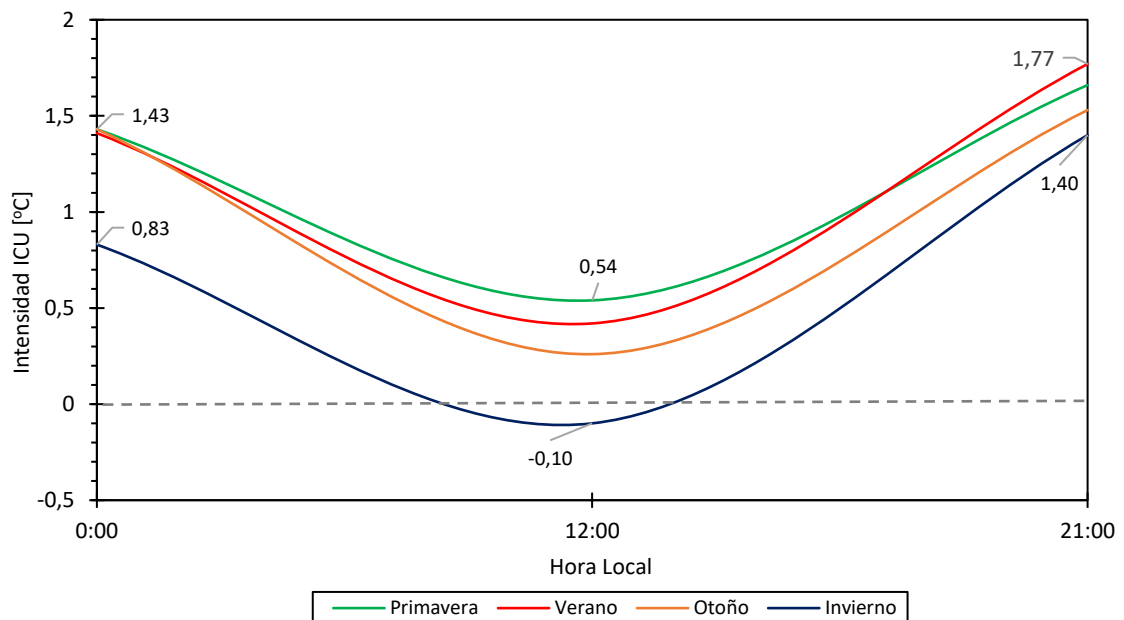


Figura 4.13 – Intensidad estacional de la ICU a las 00:00, 12:00 y 21:00.

Para aligerar la lectura y no mostrar todas cartografías en este apartado, se exponen únicamente los mapas de las ICUs a las 21:00, que es la hora a la que se han registrado los valores más altos.

En invierno, la anomalía máxima se ha dado a las 21:00 (Figura 4.14), con un valor de 2,43 °C, y la mínima a las 12:00, con -0,63 °C.

De acuerdo con el gráfico de la Figura 4.13, la anomalía media a las 21:00 ha sido de 1,40 °C entre el centro y la periferia, el valor más bajo de todas las estaciones a esta hora.

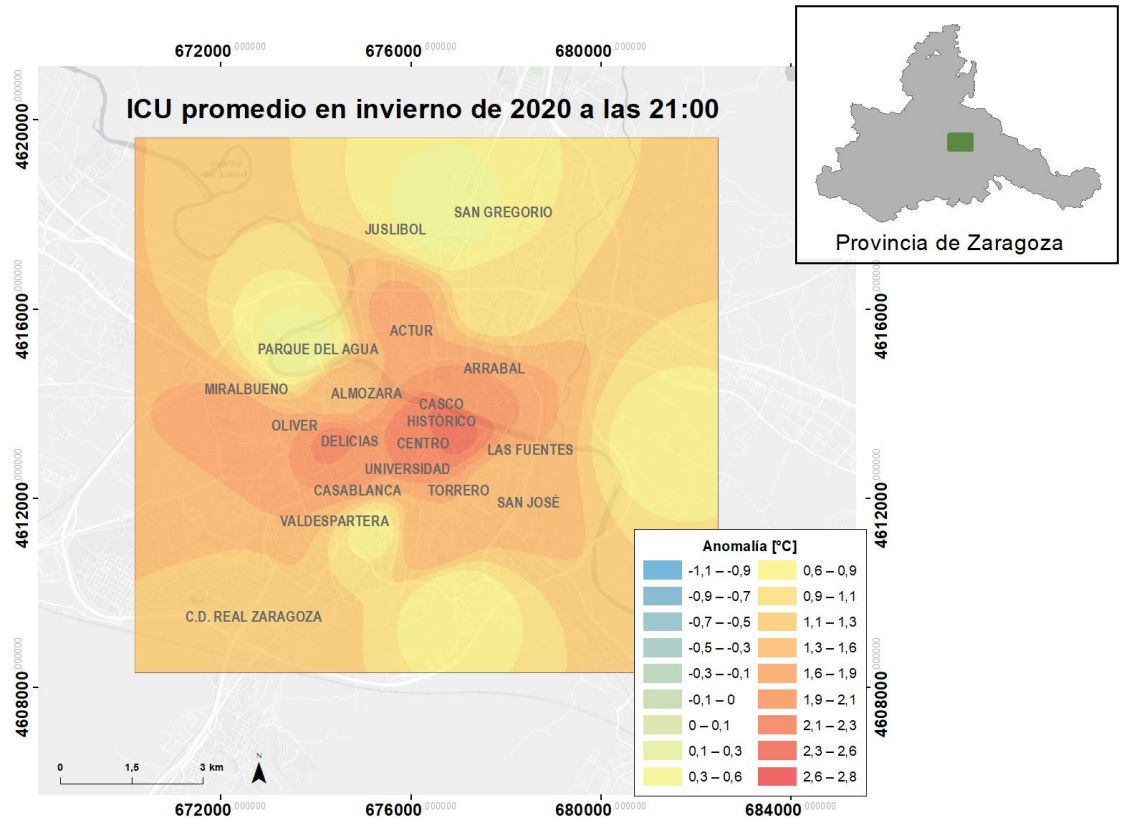


Figura 4.14 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 21:00 en invierno de 2020.

La temperatura en invierno promedio de todos los sensores ha sido mayor a las 12:00, con un valor de 9,55 °C, 1,71 °C más que a las 00:00, que es cuando la temperatura ha sido menor.

En primavera la mayor anomalía también ha sido a las 21:00 (Figura 4.15), llegando a darse el promedio más alto del año, con un valor de 2,70 °C. A las 00:00 el promedio de las anomalías ha sido más bajo, con un valor de -0,34 °C.

Como se ve en el gráfico de la Figura 4.13, la anomalía promedio a las 21:00 es mayor que en las otras dos horas, con un valor de 1,66 °C, y a las 12:00 la anomalía promedio ha sido de 0,54 °C, las más baja de primavera, pero mayor que en el resto de las estaciones a la misma hora.

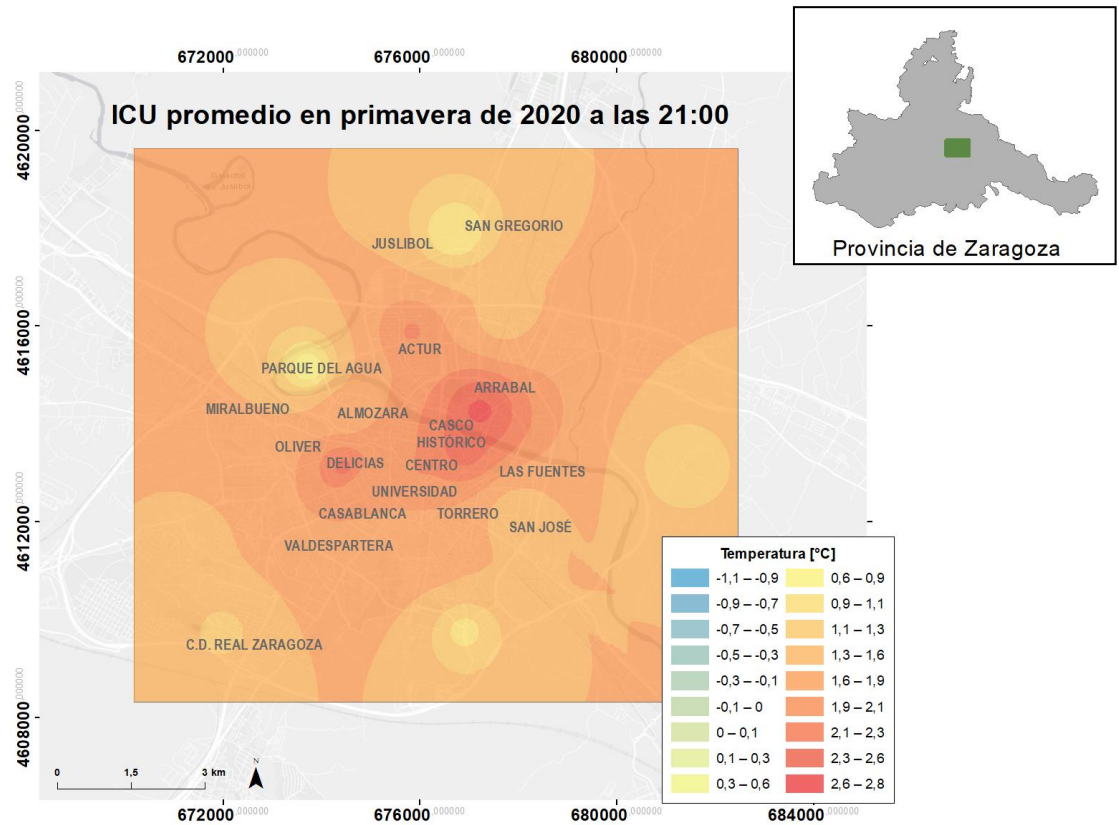


Figura 4.15 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 21:00 en primavera de 2020.

La temperatura promedio de primavera a las 12:00 ha sido mayor que a las 00:00 y las 21:00, llegando a los 17,61 °C, 3,43 °C por encima del promedio a las 00:00, cuando la temperatura es menor.

Durante el verano, la mayor anomalía también ha sido a las 21:00 (Figura 4.16), con un valor promedio de 2,69 °C, solo 0,01 °C por debajo del promedio en primavera a la misma hora. De los tres momentos estudiados, ha sido a las 00:00 cuando la intensidad de la ICU ha sido menor, con un valor de -0,01 °C, el más bajo de todas las estaciones.

De acuerdo con el gráfico de la Figura 4.13, el promedio a las 21:00 ha sido el mayor de todas las estaciones, con una anomalía de 1,77 °C.

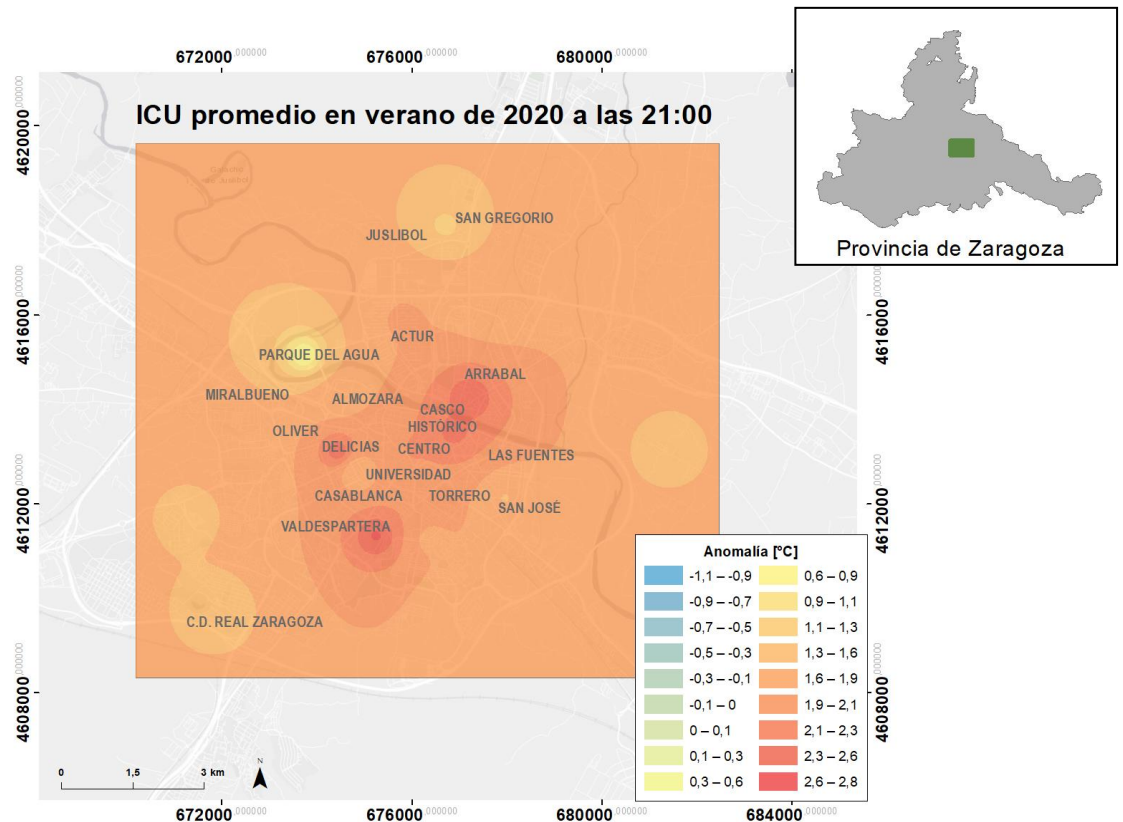


Figura 4.16 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 21:00 en verano de 2020

La mayor temperatura promedio de verano ha sido a las 12:00, con un valor de 26,85 °C, 4,57 °C más que a las 00:00, cuando ha sido menor.

Por último, durante la estación de otoño, a las 21:00 (Figura 4.17) la anomalía máxima ha sido de 2,56 °C y la mínima a las 12:00, con un valor de -0,92 °C.

En gráfico de la Figura 4.11 se puede ver que a las 21:00, la anomalía media de otoño ha sido mayor que en las otras dos horas, con un valor de 1,53 °C.

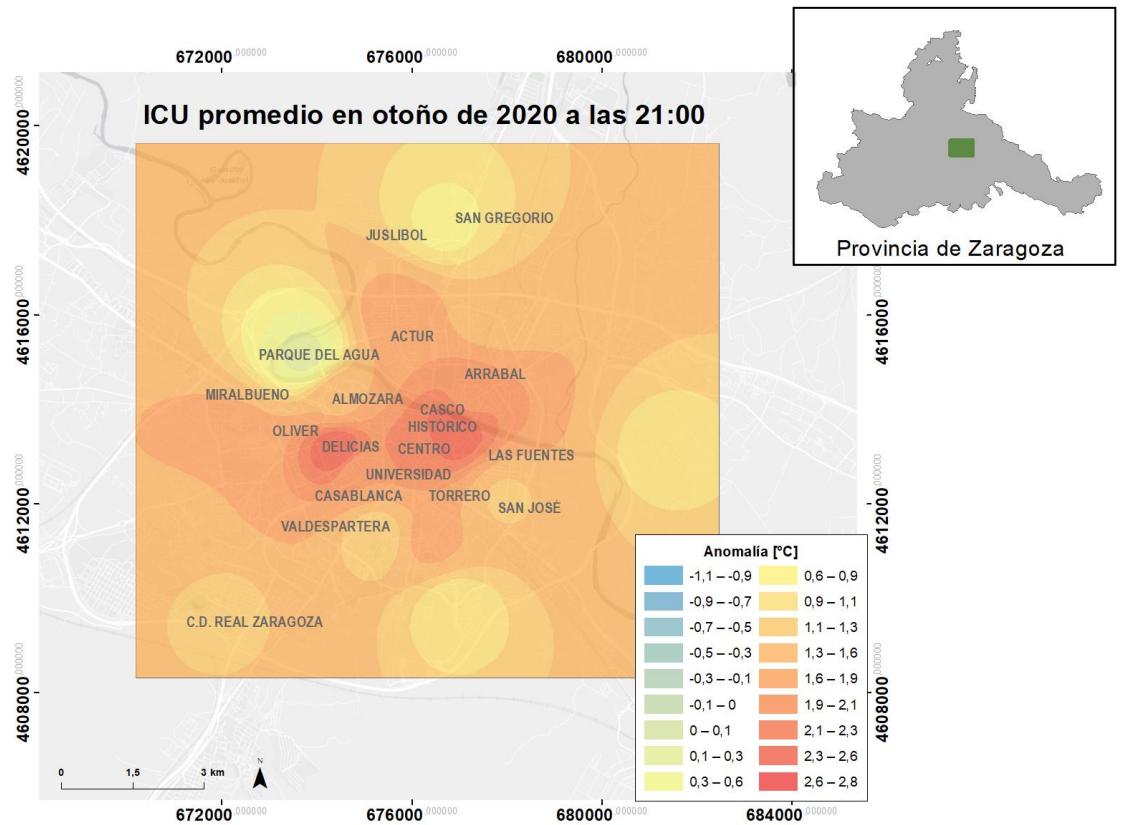


Figura 4.17 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 21:00 en otoño de 2020

La temperatura promedio a las 12:00 en otoño, que ha sido la mayor de las tres, es de 17,83 °C, más que el promedio de primavera, pero menos que el de verano a la misma hora.

En el Apéndice A aparecen el resto de los mapas y en el Apéndice B las tablas con todos los datos de los resultados que han sido mencionados en este apartado.

5 Discusión

Una vez expuestos los resultados del estudio, en base a ellos, en este apartado se pretende analizarlos y discutirlos, de acuerdo con la teoría de las ICUs.

Comenzando con la intensidad anual de la ICU, acorde con la Figura 4.1, se puede diferenciar claramente que la temperatura promedio anual en el centro de la ciudad; donde hay una elevada densidad de edificios, es mayor que en zonas de la periferia, donde el espacio es más abierto y menos poblado. Esto es causado por el efecto que tienen las características de las áreas densamente edificadas sobre su microclima, como explica Oke (1982), que resalta que la presencia de edificios influye en la capacidad que tiene la energía del sol para alcanzar la superficie. Así pues, factores urbanos como la reflectividad de los materiales o el calor producido por las actividades urbanas hacen que la ciudad acumule más calor que el que se acumula en las zonas de la periferia, donde no hay tantos obstáculos que generen este efecto.

Los resultados muestran que, las dos zonas más contrastadas han sido Delicias y la C.D. RZgz, con una diferencia de sus promedios anuales de 1,62 °C, lo que indica que estas dos zonas tienen características térmicas diferentes. Delicias, por ejemplo, es un distrito de Zaragoza con morfología compacta y alta densidad de edificios. Estas características también las recogen zonas de Zaragoza como el distrito de Las Fuentes o el centro de la ciudad (Ayuntamiento o Casa de la Mujer, en la plaza Santa Marta de la capital aragonesa), Figura 3.1. Por esta razón, y de acuerdo con Christen & Vogt (2004), los sensores colocados en las zonas mencionadas han registrado los promedios anuales más elevados, después de Delicias.

El observatorio situado en el Barrio de Las Fuentes, en concreto, ha registrado, en cuarto lugar, un promedio de temperatura anual de 16,46 °C, casi medio grado menos que en Delicias, a pesar de tratarse de una zona de morfología similar. Esto sucede por el efecto que tiene el viento sobre la intensidad de la isla de calor, pues cuando hay bochorno, que sobre todo ocurre en épocas de calor; que es cuando mayor es la intensidad de la ICU, el viento que viene del sureste, impacta en este distrito suavizando las temperaturas, como explican Cuadrat *et al.* (2020).

Aun así, el sensor de Las Fuentes ha registrado el valor de temperatura anual más alto, alcanzando los 41,64 °C el 31 de julio a las 15:00, por encima de la temperatura máxima registrada por el sensor de Delicias, que, a pesar de resultar ser el sensor con el mayor promedio anual, el 27 de julio a las 17:00 alcanzó su valor máximo de 40,51 °C, 1,13 °C menos que el de Las Fuentes. Estos valores máximos se dieron durante la ola de calor que afectó a Zaragoza entre el 25 de julio y el 2 de agosto (AEMET, 2020). Debido al efecto del bochorno explicado anteriormente, aunque el valor máximo anual se haya registrado en Las Fuentes, su promedio se

rebaja y la anomalía anual con respecto a la C.D. RZgz es de 1,15 °C, que se considera un valor alto, pero 0,47 °C por debajo de la anomalía de Delicias (Tabla B.1).

Por otra parte, la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza es una zona localizada al sudoeste de la ciudad, a una distancia de 3 km. El sensor está colocado en una zona abierta, con arbustos y árboles a su alrededor y al lado de unas instalaciones deportivas. Esta zona, por tanto, es la que está menos expuesta a las alteraciones que la ciudad puede tener sobre su temperatura. Esto también ocurre en el barrio rural de San Gregorio, cuyo sensor ha registrado el tercer valor promedio más bajo. También se trata de una zona alejada de la urbe; aunque no tanto como la C.D. RZgz, y con muy poca densidad de edificios. El segundo sensor más fresco ha sido el que está situado en el Parque del Agua, que ha llegado a los 15,67 °C (Tabla B.1), solo 0,36 °C menos que el de la C.D. RZgz a pesar de situarse considerablemente más cerca de zonas densamente pobladas. Esto ocurre porque es un parque de gran extensión y alejado por tanto de entramados urbanos, y porque el sensor se encuentra rodeado de vegetación y cerca de la vera del río Ebro. Estos son factores que suavizan las temperaturas, actuando como termorreguladores, según Iain D. Stewart *et al.* (2014).

Hasta aquí se ha analizado la ICU durante todo el año, ofreciendo referencias sobre las zonas de Zaragoza que más diferencia han tenido de temperatura, pero, profundizando más y desglosando el análisis para cada época del año, se ha comprobado que la ICU tiene comportamientos diferentes en cada estación, dependiendo sobre todo de los cambios de temperatura asociados a cada una de las estaciones del año.

Durante el verano, contando con datos registrados desde el 1 de junio hasta el 31 de agosto, el promedio de temperatura de la ciudad en conjunto ha sido de 24,64 °C. Otoño por otro lado, contando con los registros desde el 1 de septiembre hasta el 30 de noviembre, ha tenido un valor promedio de 15,92 °C, 8,72 °C por debajo del promedio de la estación de verano (Tabla B.3). Esto entra dentro del valor esperado, pues cuando termina el verano, las temperaturas comienzan a descender.

En base a los resultados observados, a la hora de analizar la intensidad de la ICU durante estas dos estaciones, era previsible encontrar una anomalía, con respecto a la estación de la C.D. RZgz, mayor en verano que en otoño, pues es en verano cuando las temperaturas son mayores y el efecto de isla de calor urbana se intensifica, según Demuzere *et al.* (2019) o Cuadrat *et al.* (2005), entre otros, que resaltan que la ICU se ve intensificada durante condiciones meteorológicas estables, o sea, durante verano e invierno. En cambio, durante otoño y primavera, las condiciones meteorológicas son con menos frecuencia anticiclónicas y así, la ICU es menos intensa. A pesar de esto, la anomalía máxima durante el otoño ha sido de 1,81 °C, mientras que en verano ha sido de 1,67 °C, 0,15 °C menos (Tabla B.2). Se podría pensar que al

contar septiembre como mes de otoño, cuando no es hasta el día 22 de ese mes cuando termina la estación de verano según el calendario astronómico, la anomalía en septiembre ha podido ser superior, y aumentar la anomalía media de la estación de otoño. Pero eso no ha sido así, pues la mayor anomalía promedio mensual, no solo de la estación de otoño, sino de todo el año, ha sido durante el mes de noviembre, con un valor de 1,92 °C.

Esta irregularidad, donde la intensidad de la ICU ha resultado ser mayor en otoño que en verano, podría deberse a que durante el año 2020 el otoño ha sido más cálido y seco de lo normal en toda España en comparación con el periodo de 1981-2010, según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2020). Así, aunque otoño no ha sido la estación con la temperatura media más alta, sí que ha sido la estación donde el promedio de las diferencias entre el centro y las afueras de la ciudad ha sido mayor.

Respecto a las demás estaciones, invierno ha sido la más fría, con un promedio de 8,73 °C (Tabla B.3) y también con la menor anomalía de las cuatro estaciones del año, con una diferencia máxima de 1,33 °C entre Delicias y la CD RZgz (Tabla B.2). Este resultado ha sido de esperar, pues la intensidad de la ICU es menor durante épocas frías, de acuerdo con Arnfield (2003). También se observa que, la anomalía durante el invierno ha sido, en casi todos los casos, menor que en el resto de las estaciones. Por tanto, el invierno es la estación donde la intensidad de la ICU ha sido menor.

Durante la primavera se ha notado el aumento de temperatura, alcanzando un promedio estacional de 15,75 °C (Tabla B.3), un valor mayor al de invierno, pero menor que el de otoño y, por supuesto que el de verano. La anomalía promedio ha seguido el mismo patrón, con un valor máximo de 1,62 °C (Tabla B.2). Esto puede generar confusión si se entiende que, durante la primavera, en el hemisferio norte la energía del sol incide por encima del ecuador, con más intensidad que en otoño, cuando la inclinación del eje de la Tierra hace que la radiación solar llegue con menos intensidad. Por eso, el hecho de que en otoño la temperatura promedio sea mayor que en primavera, puede sostenerse en que el otoño de 2020 fue excepcionalmente más caluroso de lo normal, como se ha explicado anteriormente.

Continuando, para hacer un análisis de la intensidad de la ICU todavía más profundo, se ha estudiado su evolución a lo largo de las horas del día, a partir de la anomalía entre la más cálida en promedio, o sea, Delicias, y la más fresca, C.D. RZgz. Además de hacerlo con los promedios de las anomalías durante todo el año, se ha analizado la evolución en cada estación del año, para una vez más, poder comparar el comportamiento que tiene la ICU en cada una de ellas.

De acuerdo con Oke (1982) o Alexander & Mills (2014), entre otros, durante las horas de noche, la intensidad de la ICU es mayor que durante el día. Explican que esto ocurre porque en las zonas rurales a partir del atardecer, la temperatura disminuye exponencialmente hasta

aproximadamente las 5:00, cuando es abruptamente interrumpida por la entrada del calor a partir del amanecer. En cambio, en zonas urbanas el descenso de la temperatura es lineal, condicionado por el calor antropogénico y el que ha sido almacenado durante el día. Esta diferencia en el comportamiento de las temperaturas en zonas urbanas y rurales trae como consecuencia que la anomalía entre estas dos zonas sea mayor a partir de la puesta de sol. El caso de este estudio no es diferente, pues como se ve en la Figura 4.4, la intensidad de la ICU comienza a aumentar considerablemente a partir de las 18:00, coincidiendo con la hora media anual a partir de la cual la radiación solar va perdiendo intensidad y que, por tanto, da comienzo a las horas nocturnas. Esto muestra cómo el ciclo diario de temperatura evoluciona de forma paralela al balance energético.

Además, de acuerdo con Fenner *et al.* (2014), los árboles y tejados altos presentes en las zonas urbanas actúan como obstáculos para la radiación de onda corta proveniente del sol durante las horas de luz, bloqueando su entrada a la superficie. Lo contrario ocurre en las zonas de la periferia, donde la ausencia de sombras permite el calentamiento completo de la superficie durante las horas de luz. Esta diferencia de ambientes supone que la anomalía de temperatura entre el centro y la periferia sea de pocas décimas, como se observa en la Figura 4.4 entre las 9:00 y las 13:00, cuando aparecen valores de anomalía próximos a los 0 °C (Tabla B.4).

Esto también puede observarse en la Tabla B.10, donde se muestran anomalías negativas en algunos sensores. Por ejemplo, se ve que a las 12:00 la anomalía promedio entre sensores como el de la casa de la mujer, actur, o jardín botánico es de hasta -0,62 °C de diferencia con la C.D. RZgz lo que indica que en la periferia la temperatura ha sido mayor que en el centro de la ciudad. En el caso del jardín botánico, que ha tenido la mayor anomalía negativa con respecto a la C.D. RZgz, ocurre lo que se conoce como efecto isla de frío, que se da en parques urbanos donde la temperatura es menor que en las zonas urbanas y, en este caso, incluso menor que en la periferia de la ciudad, eso sí, solo durante el medio día, según Napper *et al.* (1981). Este autor sugiere que la principal causa de este efecto es la reducida densidad de edificios junto con la presencia de posibles obstáculos a la radiación solar como árboles o edificios altos de alrededor.

Según lo anterior, se han registrado valores de temperatura mayores en la periferia que en el centro urbano durante horas de luz, aunque son valores promedio de las temperaturas de todo el año. En el caso de Zaragoza, esto ya lo observaron Cuadrat *et al.* en 2015.

Para conocer durante que época del año se ha dado el mayor número de anomalías negativas, se ha analizado la evolución horaria de la temperatura para cada estación y se ha sabido que, es durante la estación de invierno cuando se registran los valores más bajos de anomalía durante las horas de luz (12:00), con un promedio de -0,10 °C (Tabla B.14). Así, según la Figura 4.5, se ha sabido que, durante esta estación del año se han dado valores de anomalía más bajos que en

las demás, en concreto entre las 10:00 y la 13:00, que es cuando la luz solar incide con mayor intensidad. En la Tabla B.13 se observa cómo a las 12:00 durante el mes de invierno se dan anomalías negativas en prácticamente todos los sensores.

En referencia a la zona de Delicias, que recordando apartados anteriores ha sido la zona con mayor promedio anual de temperatura, el efecto de la ICU durante el invierno alcanza el valor máximo a las 11:00, con un valor de 0,30 °C (Tabla B.5), esto es, la anomalía promedio más baja de todas las estaciones del año. Así se confirma que, durante los meses más fríos del año, la ICU pierde intensidad. Respecto a la anomalía máxima, durante esta estación se da a las 20:00, con un valor promedio de 2,20 °C, que aun así no supera a los promedios máximos de las demás estaciones del año.

Por otra parte, la estación de verano ha generado el efecto contrario, compensando y equilibrando el resultado de la Figura 4.4, pues durante esa época del año no se han registrado anomalías promedio por debajo de los 0,70 °C, sino que la media alcanza un valor de 0,95 °C (Tabla B.3). Ha sido durante las horas de mayor incidencia solar; entre las 8:00 y las 13:00 cuando se han registrado los promedios más bajos de anomalía, como se observa en la Figura 4.6. En concreto, observando la Tabla B.14 se ve que, al igual que en el resto de las estaciones del año, la intensidad de la ICU es menor a las 12:00, cuando sobre la zona de la periferia incide la energía del sol directamente mientras que en la ciudad tiene mayor dificultad para alcanzar la superficie. Esto genera una diferencia de velocidad de calentamiento y en la periferia se alcanzan valores incluso superiores que en el centro urbano.

Por ejemplo, en relación con el efecto de la isla de frío mencionada anteriormente, durante la estación de verano al medio día, la periferia supera con más de un grado la temperatura del jardín botánico (Tabla B.13). Relacionado esto con la temperatura promedio en cada momento (Tabla B.14), se puede observar que al medio día se dan los promedios de temperatura más elevados, y es entonces cuando la intensidad de la ICU es menor, por la diferencia de velocidad de calentamiento que se ha explicado. Lo contrario ocurre durante las horas de noche (21:00), cuando no hay luz y la diferencia de las temperaturas entre el centro y las afueras es mayor, a causa del calor que es capaz de almacenar el área urbana.

Por último, resulta relevante analizar la anomalía máxima que se ha dado en Zaragoza durante el año 2020, que ha sido de 7,50 °C de diferencia entre Delicias y la C.D. RZgz. Esto ocurrió el 6 de agosto a las 02:00, apoyando a Arnfield (2003) o I. D. Stewart & Oke (2012), que resaltan que la intensidad de una isla de calor urbana es mayor en verano y durante las horas de noche. En ese momento, mientras en el distrito de Delicias había una temperatura de 24,94 °C, la periferia se encontraba a 17,44 °C. Esto es una gran diferencia de temperatura que genera un impacto negativo no solo en confort térmico, que es evidente, sino también en el confort

climático, pues las condiciones normales del clima en el centro de la ciudad se ven considerablemente alteradas.

La aparición del fenómeno de las islas de calor urbanas es inevitable, pues una vez que se construyen ciudades densamente habitadas con una morfología de edificios compacta, las condiciones climáticas de esa zona se van a ver alteradas. Aún así, su intensidad sí que puede ser prevenida y disminuida, a través de una planificación urbanística que contemple a este fenómeno y proponga medidas para conseguirlo, como introducir elementos urbanos termorreguladores; vegetación, o evitar la construcción de entramados compactos. Para ello, los estudios sobre clima urbano ofrecen resultados analíticos del efecto que tiene este fenómeno, para contribuir en la mejora de los planes urbanísticos y así, mejorar las condiciones del entorno y la calidad de vida de las personas.

6 Conclusión y Recomendaciones

Las conclusiones de este estudio vienen a corroborar lo que previamente se ha observado en la literatura especializada en clima urbano hasta la fecha y en concreto, sobre islas de calor urbanas. Además, los resultados de este estudio van más allá de confirmar que existe una isla de calor en Zaragoza, pues se ha profundizado en su análisis durante el ciclo diario y se han encontrado patrones relevantes de comportamiento, todavía poco abordados en previos estudios sobre el tema.

Por otro lado, la ciudad de Zaragoza, al igual que la mayoría de las ciudades desarrolladas, está sometida a continuas modificaciones urbanísticas y de crecimiento espacial. Este estudio ofrece información actualizada a previos estudios realizados en Zaragoza y pasa a formar parte del seguimiento del comportamiento de este fenómeno con el paso del tiempo.

Las características morfológicas y estructurales de las áreas urbanas influyen sobre su ambiente, modificando las condiciones climáticas del entorno. Por esta causa en la periferia la temperatura es menor que en las zonas de mayor densidad de edificios.

Respecto a la intensidad de la isla de calor urbana, es mayor por la noche y los valores máximos se dan en verano, alcanzando los 7 °C, aunque en promedio estacional, durante el año 2020 ha sido mayor en otoño. El viento es un factor que disminuye la intensidad de la isla de calor, haciendo que sea menor durante situaciones de inestabilidad meteorológica.

El efecto de isla de calor puede desaparecer durante el día y la ciudad ser más fresca que los alrededores rurales, sobre todo entre las 09:00 y las 13:00.

El comportamiento de la isla de calor urbana es diferente en función de la estación del año: durante épocas cálidas es más intensa que en épocas frías. Durante el ciclo diario de temperatura, la intensidad de la ICU aumenta notablemente pocas horas después de la puesta de sol y disminuye de nuevo con el comienzo de las horas de luz.

Para continuar con la mejora de calidad de los estudios de clima urbano, se recomienda disponer de un mayor número de sensores que registren las temperaturas de más zonas de la ciudad. Esto ayudaría a conseguir un estudio más amplio y unos resultados más precisos. Respecto al instrumental, a la hora de ampliar la red sería útil instalar sensores actualizados que dispongan de mejor conectividad para acelerar el proceso de recogida de datos o poder consultarlos con mayor frecuencia.

El efecto de las islas de calor urbanas debería ser un aspecto para tener en cuenta a la hora de planear la ordenación urbanística de las ciudades, ya sea considerando la inclusión de elementos termorreguladores, como parques con vegetación y superficies acuáticas, o considerando los

conocimientos aportados a la hora de planificar el entramado urbano. Así, será posible encontrar un equilibrio entre el crecimiento de la sociedad y su impacto en el ambiente, que traerá ventajas sobre la calidad de vida de las personas.

Bibliografía

- Alexander, P. J., & Mills, G. (2014). Local climate classification and Dublin's urban heat island. *Atmosphere*, 5(4), 755–774. <https://doi.org/10.3390/atmos5040755>.
- 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>.
- Bechtel, B., Alexander, P. J., Beck, C., Böhner, J., Brousse, O., Ching, J., Demuzere, M., Fonte, C., Gál, T., Hidalgo, J., Hoffmann, P., Middel, A., Mills, G., Ren, C., See, L., Sismanidis, P., Verdonck, M. L., Xu, G., & Xu, Y. (2019). Generating WUDAPT Level 0 data – Current status of production and evaluation. *Urban Climate*, 27, 24–45. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.001>.
- Christen, A., & Vogt, R. (2004). Energy and radiation balance of a central European City. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.1074>.
- Cuadrat, J. M., Barrao, S., Serrano, R., Saz, M.A., Tejedor, E. (2020). Variabilidad temporal de la isla de calor urbana de la ciudad de Zaragoza (España).
- Cuadrat, J. M., Saz, M. Á., Serrano, R., & Tejedor, E. (2015). Patrones temporales y espaciales de la temperatura urbana de Zaragoza.
- Cuadrat, J.M., Vicente-Serrano, S., Saz, M.A. (2005). Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín de la AGE*, 40, 311-327. <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/2019>.
- Demuzere, M., Bechtel, B., Middel, A., & Mills, G. (2019). Mapping Europe into local climate zones. *PLoS ONE*, 14(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214474>
- El verano de 2020, récord de máximo estrés térmico en el sur peninsular, cierra una década en la que se han duplicado las olas de calor en España - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España. (2020).
- Esri, DeLorme, HERE, G. (2020). *Light Gray Canvas Map*.
- Fenner, D., Meier, F., Scherer, D., & Polze, A. (2014). Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001-2010. *Urban Climate*, 10(P2), 308–331. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.02.004>.
- Gedzelman, S. D., Austin, S., Cermak, R., Stefano, N., Partridge, S., Quesenberry, S., & Robinson, D. A. (2003). Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0724-2>.
- Giannaros, T. M., & Melas, D. (2012). *Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City : The case study of Thessaloniki , Greece.* 118, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.006>.
- Giridharan, R., Ganesan, S., & Lau, S. S. Y. (2004). *Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong.* 36, 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.016>.
- Goward, S. N. (1981). Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island. *Physical Geography*, 2(1), 19–33. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642202>.
- Howard, L. (1833). The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it, vol 2. Harvey and Darton. J. and A. Arch, Longman,

- Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter, 20(5).
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, I. (1833). *ozono troposférico*. Meteorología Aeronautica. <http://www.meteoaeronautica.gov.co/ozono-troposferico>.
- Kassomenos, P. A., & Katsoulis, B. D. (2006). Mesoscale and macroscale aspects of the morning Urban Heat Island around Athens, Greece. *Meteorology and Atmospheric Physics*. <https://doi.org/10.1007/s00703-006-0191-x>.
- Klysik, K., & Fortuniak, K. (1999). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00131-4).
- Montávez, J. P., Rodríguez, A., & Jiménez, J. I. (2000). A study of the Urban Heat Island of Granada. *International Journal of Climatology*. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000630\)20:8<899::AID-JOC433>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20:8<899::AID-JOC433>3.0.CO;2-I).
- Napper, N.J. Tyson, P.D., Owens, I. F. and H. W. J. (1981). Modelling the winter urban heat island over Christchurch, New Zeland. *Journal of Applied Meteorology*, 20, 365–376.
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)*. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6).
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.
- Olcina Cantos, J., Rico Amorós, A. M., Moltó Mantero, E., Tejedor, E., Cuadrat, J. M., Saz, M. Á., Serrano Notivoli, R., López, N., & Aladrén, M. (2016). Islas de calor y confort térmico en Zaragoza durante la ola de calor de julio de 2015. In *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio* (pp. 141–151). Servicio de Publicaciones de la UA. <https://doi.org/10.14198/xcongresoaealicante2016-13>.
- Pinho, O. S., & Manso Orgaz, M. D. (2000). The urban heat island in a small city in coastal Portugal. *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s004840000063>.
- Population Reference Bureau. (2020). *World Population Data Sheet*. Population Reference Bureau. <https://www.prb.org/2020-world-population-data-sheet/>.
- 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>.
- Stewart, Iain D., Oke, T. R., & Krayenhoff, E. S. (2014). Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1062–1080. <https://doi.org/10.1002/joc.3746>.
- Sweeney, J. (1987). The Urban Heat Island of Dublin City. *Irish Geography*, 20(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/00750778709478819>.
- Unidas, N. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Objetivos y Metas Del Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>.
- Vicente Serrano, S., & M; Sáz Sánchez, Miguel Ángel; Cuadrat, J. M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, 24(2), 161–180. <https://doi.org/10.3354/cr024161>.

Apéndice A – Mapas

En este apéndice se presentan las cartografías realizadas para cada escenario analizado en este estudio.

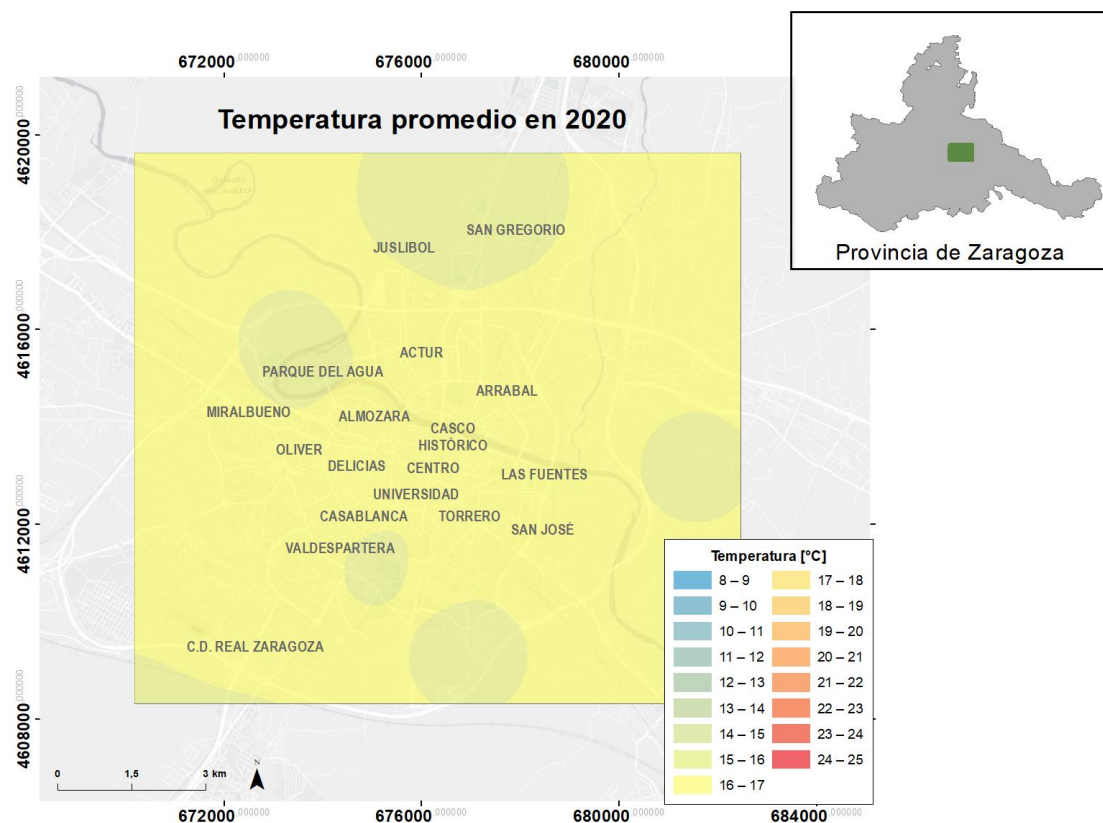


Figura A.1 – Temperatura promedio de Zaragoza durante el año 2020.

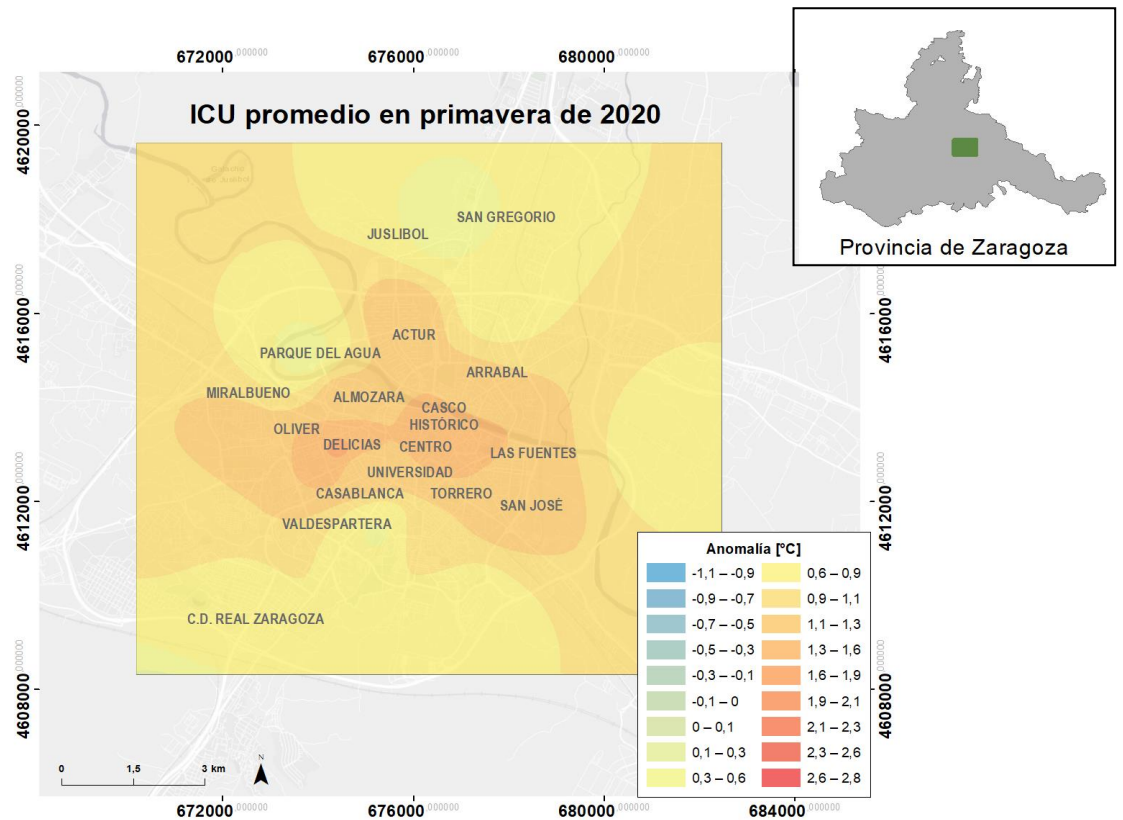


Figura A.2 – Isla de calor promedio de Zaragoza en primavera de 2020.

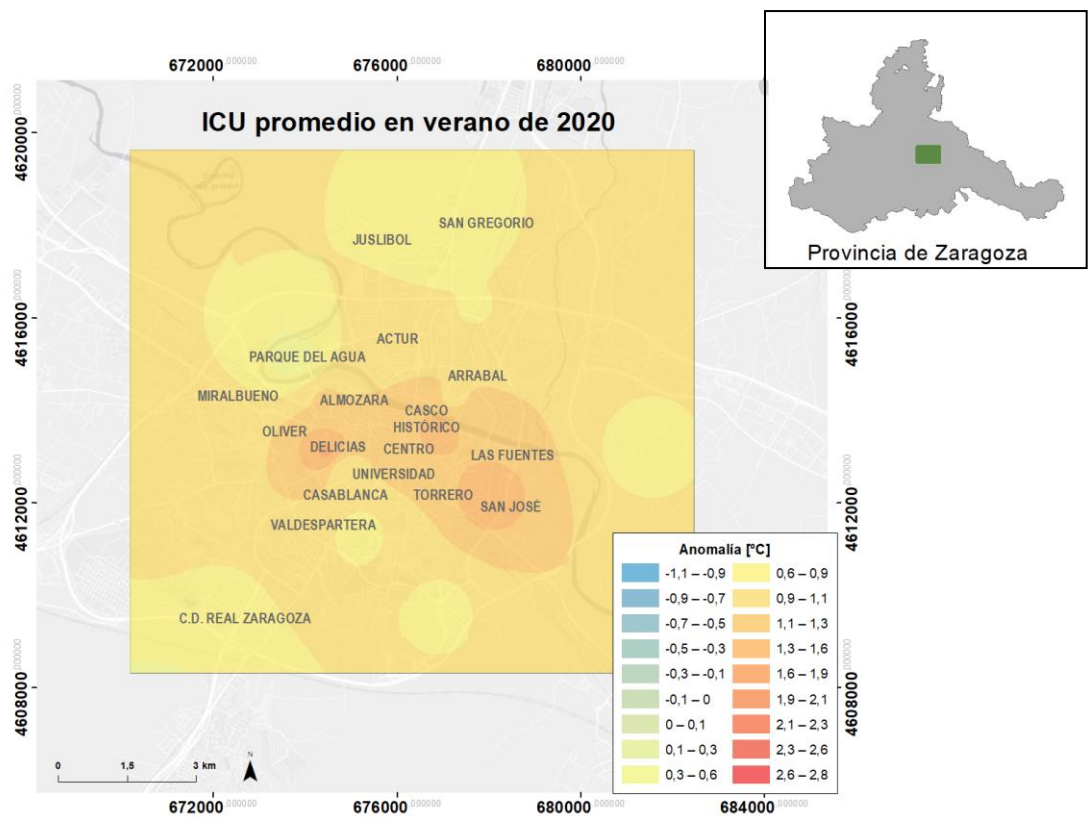


Figura A.3 – Isla de calor promedio de Zaragoza en verano de 2020.

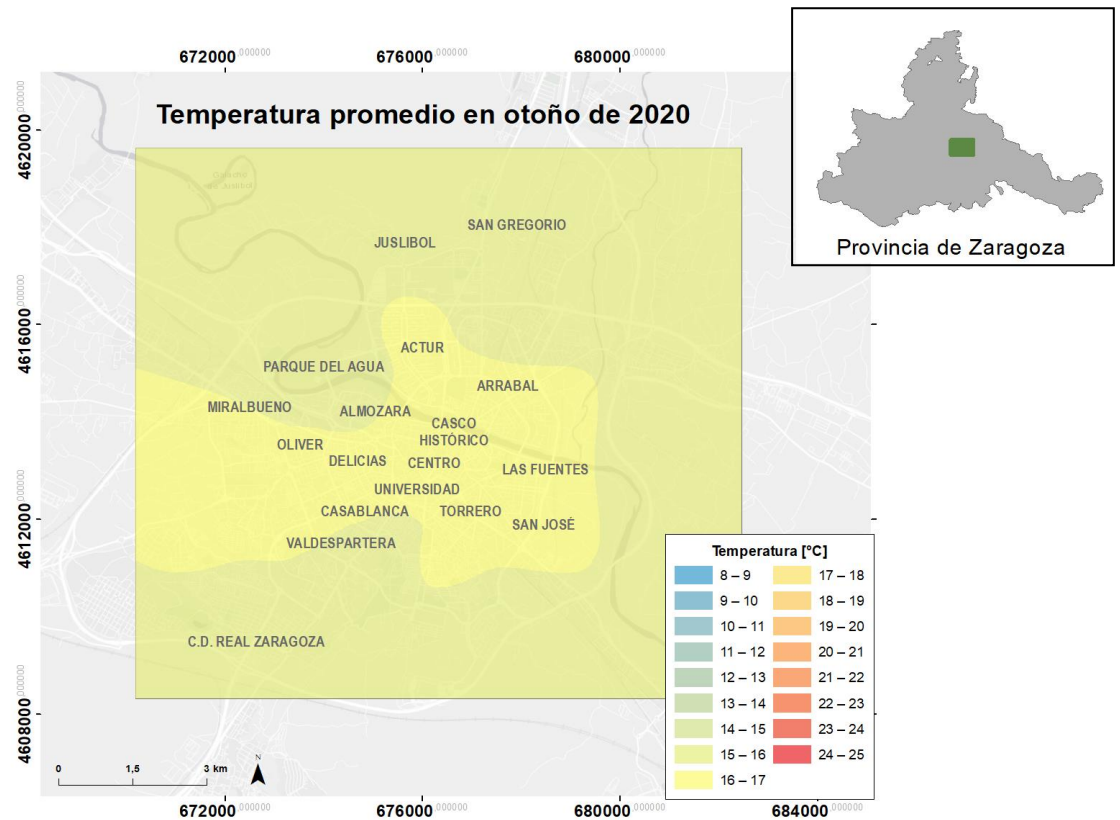


Figura A.4 – Temperatura promedio de Zaragoza en otoño de 2020.

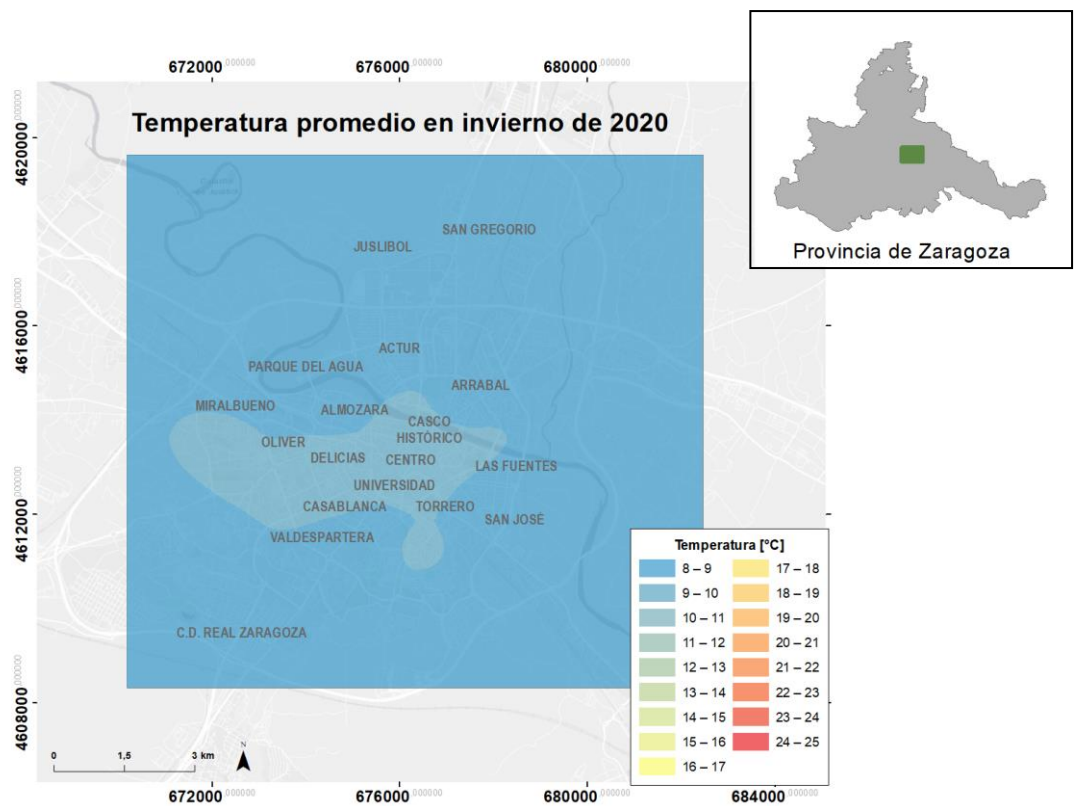


Figura A.5 – Temperatura promedio de Zaragoza en invierno 2020.

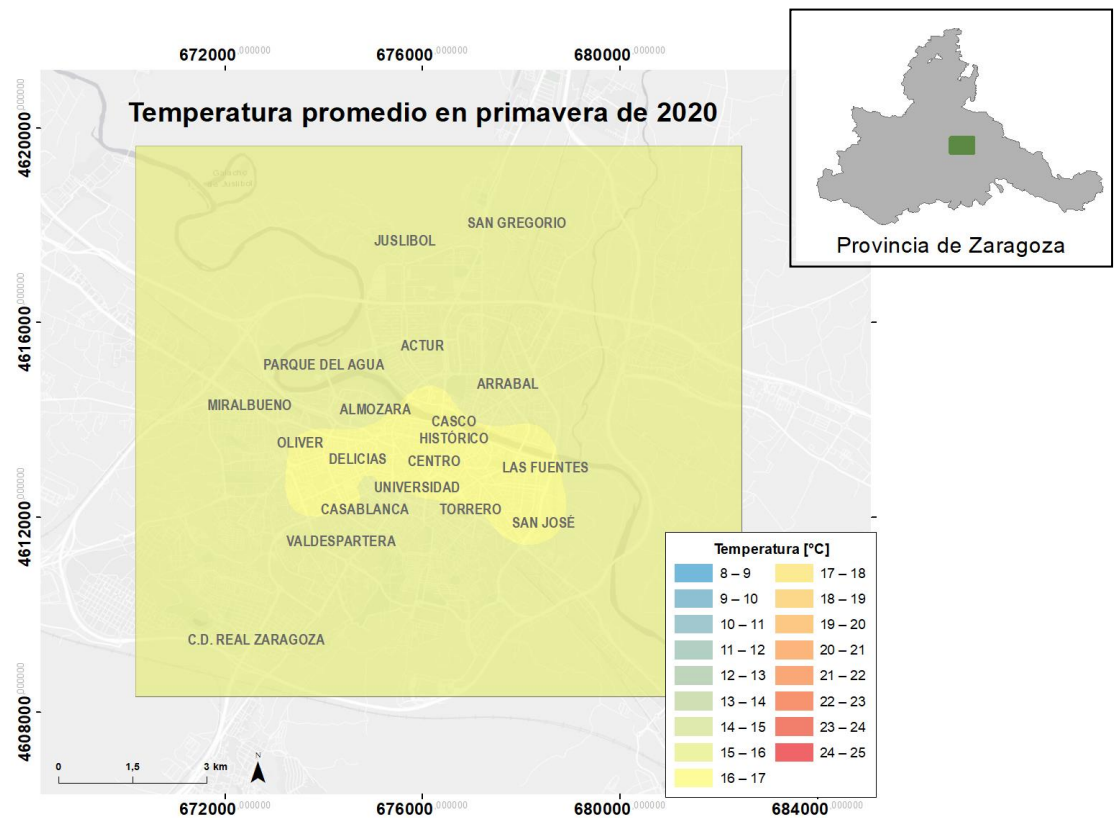


Figura A.6 – Temperatura promedio de Zaragoza en primavera de 2020.

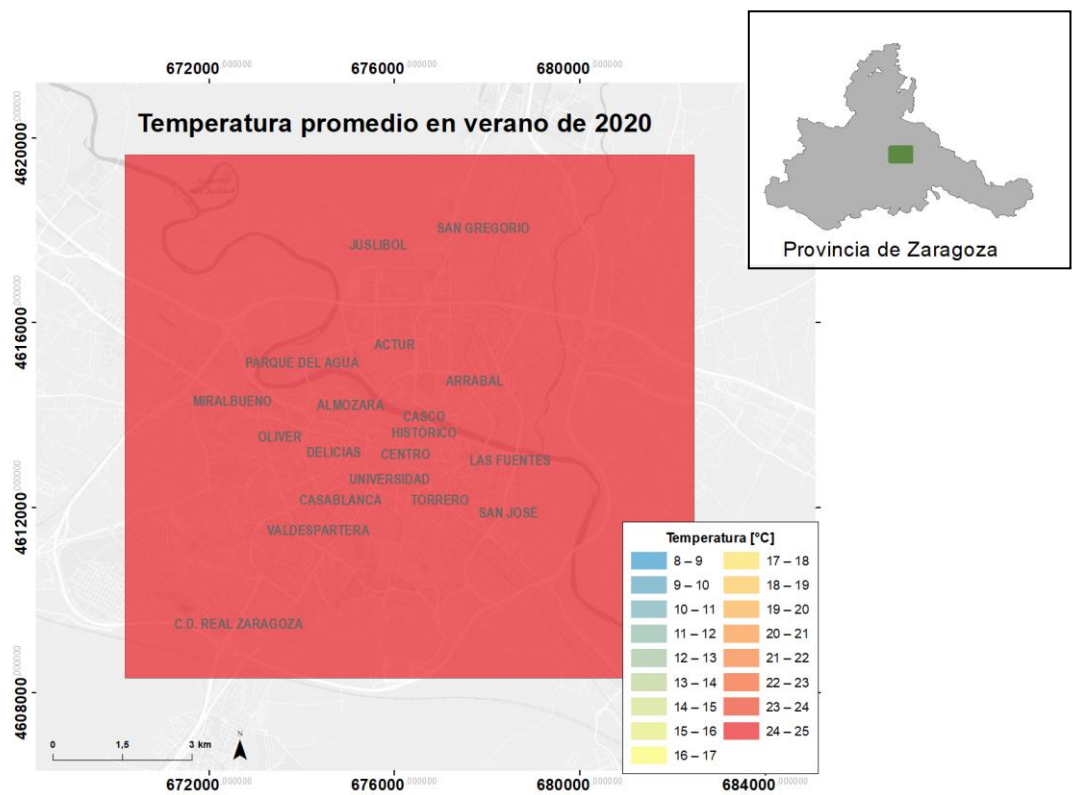


Figura A.7 – Temperatura promedio de Zaragoza en verano 2020.

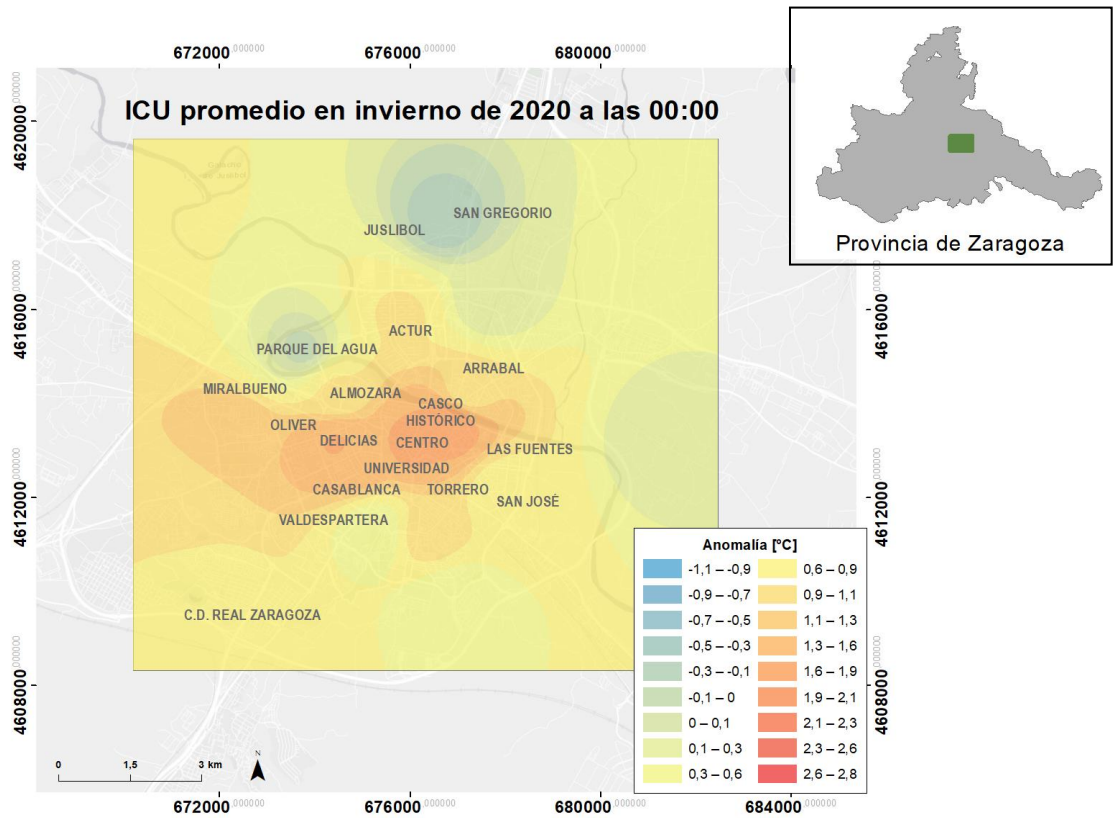


Figura A.8 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 00:00 en invierno de 2020.

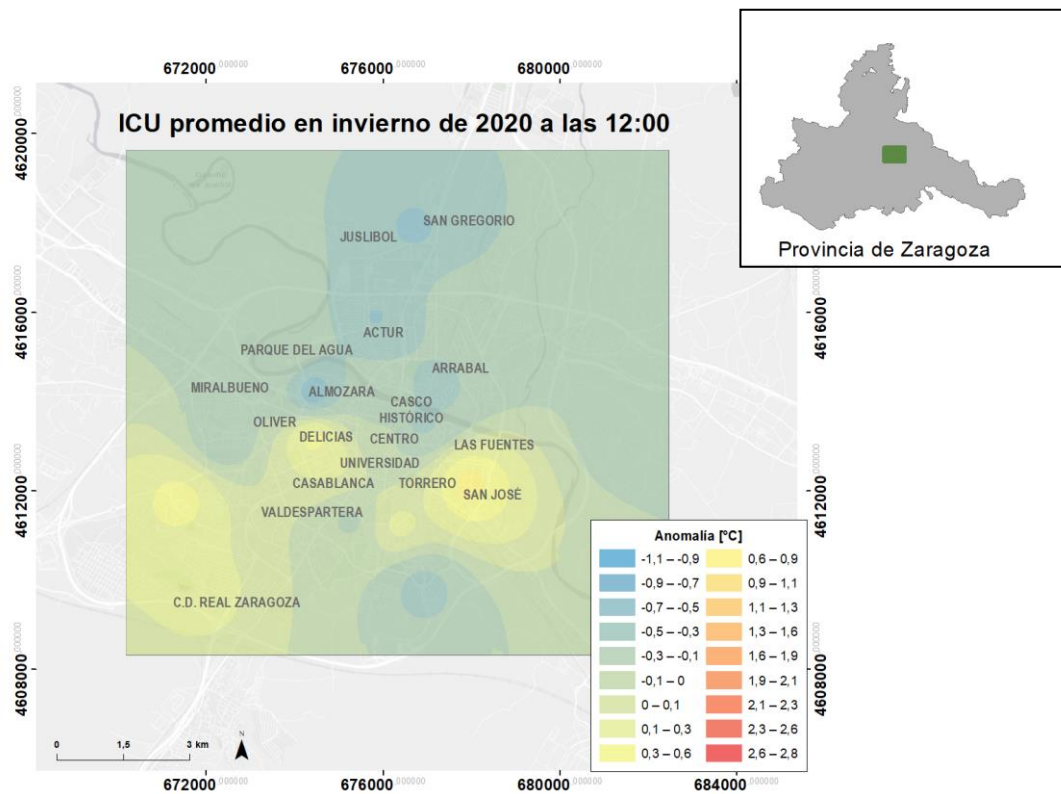


Figura A.9 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 12:00 en invierno de 2020.

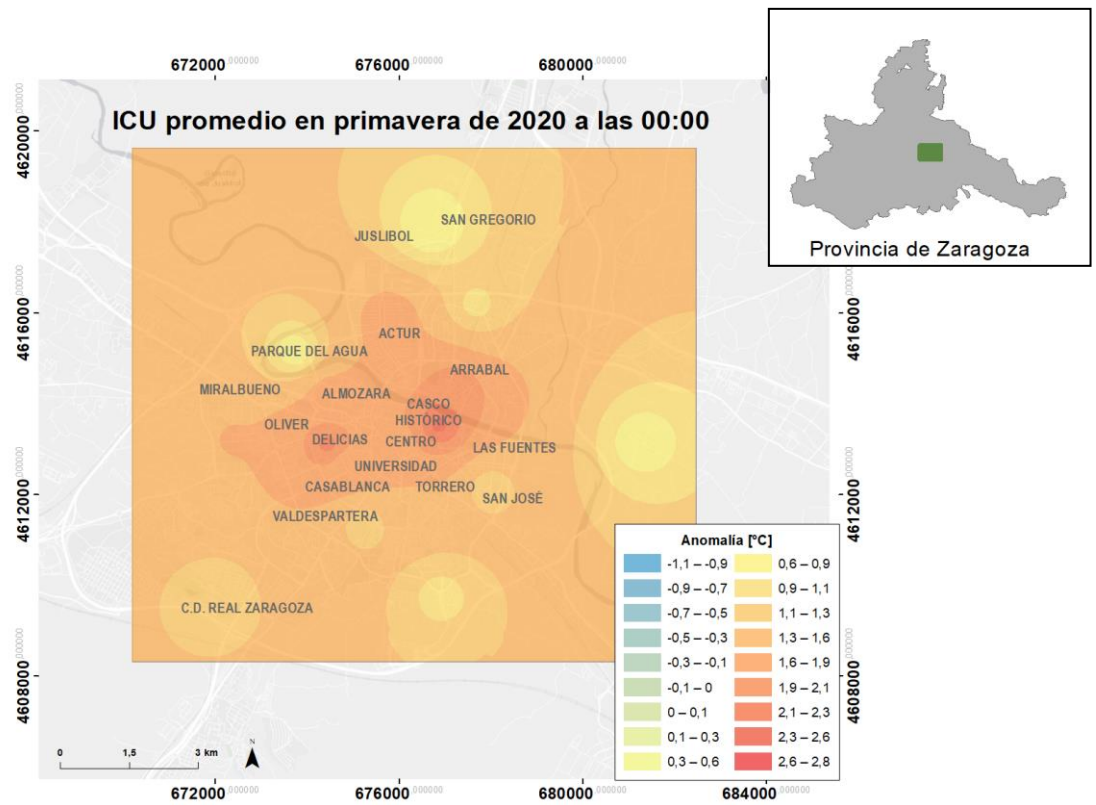


Figura A.10 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 00:00 en primavera de 2020.

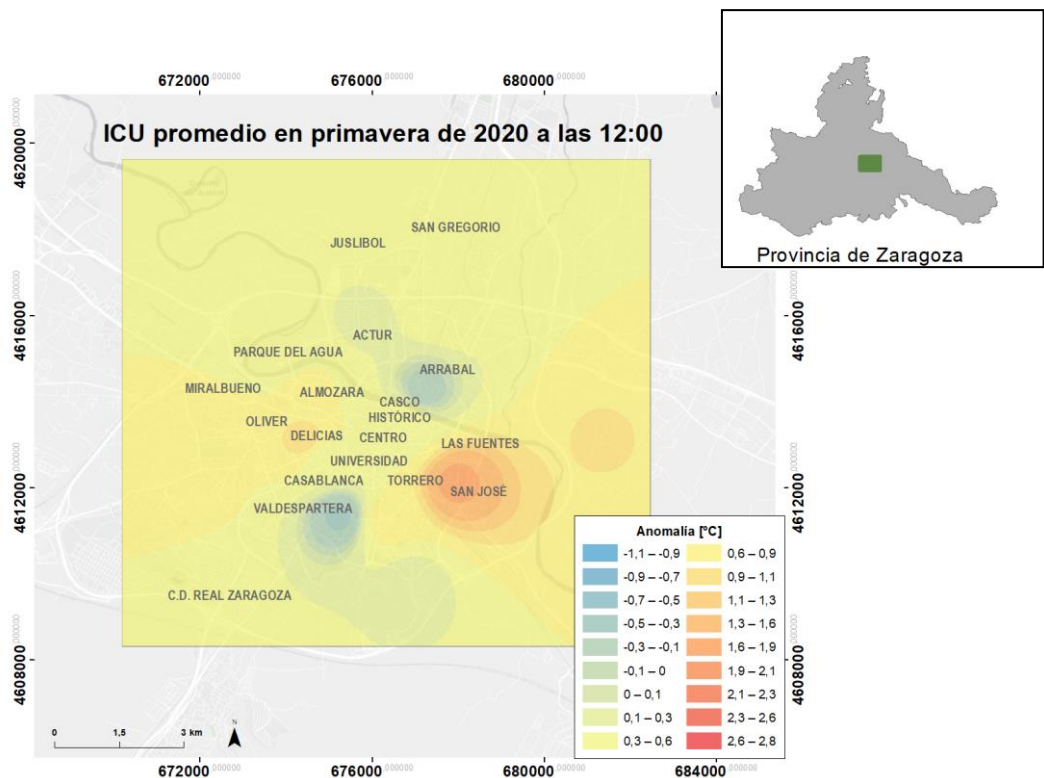


Figura A.11 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 12:00 en primavera de 2020.

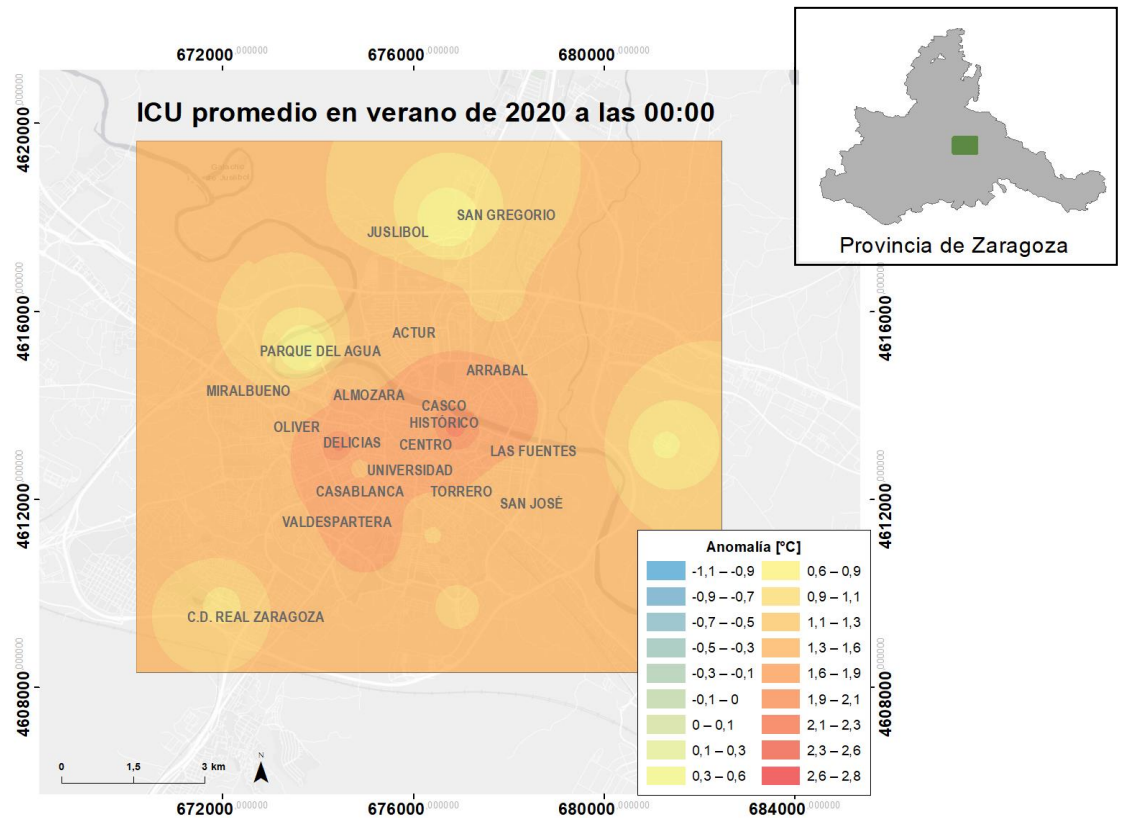


Figura A.12 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 00:00 en verano de 2020.

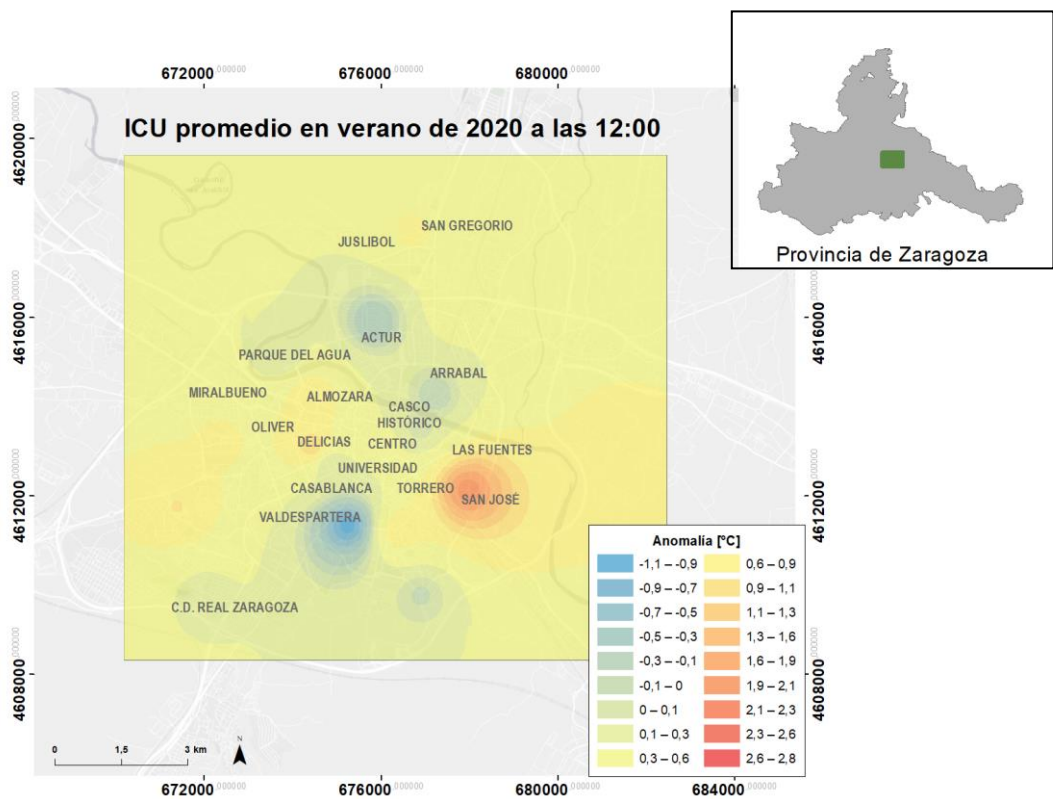


Figura A.13 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 12:00 en verano de 2020.

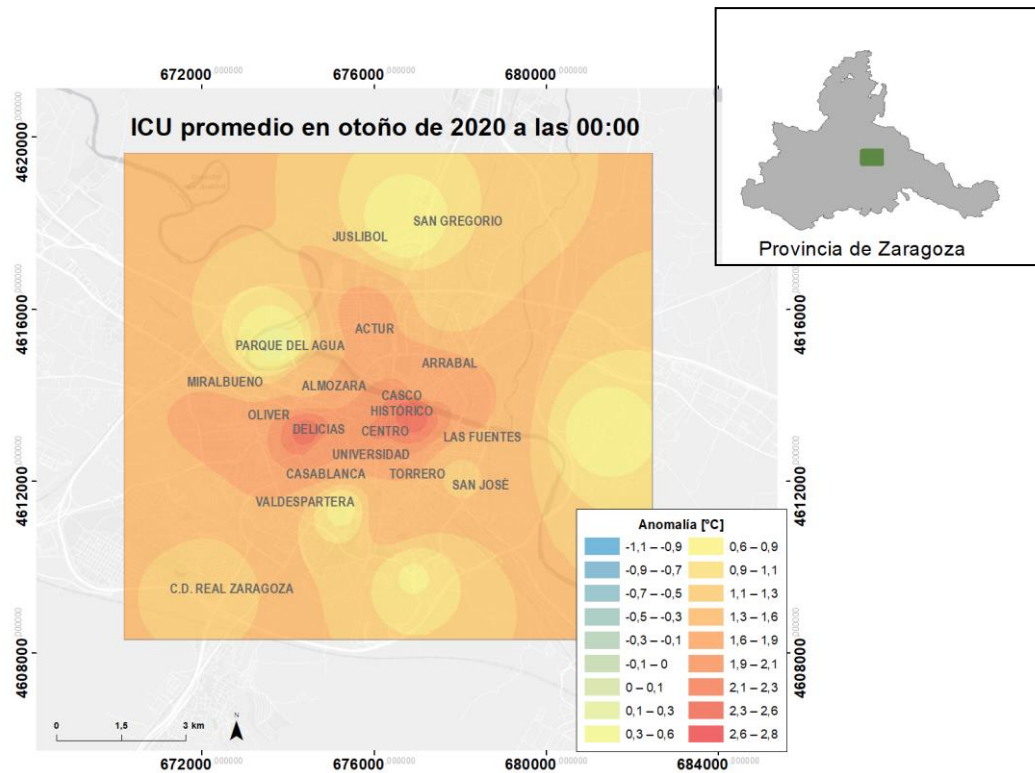


Figura A.14 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 00:00 en otoño de 2020.

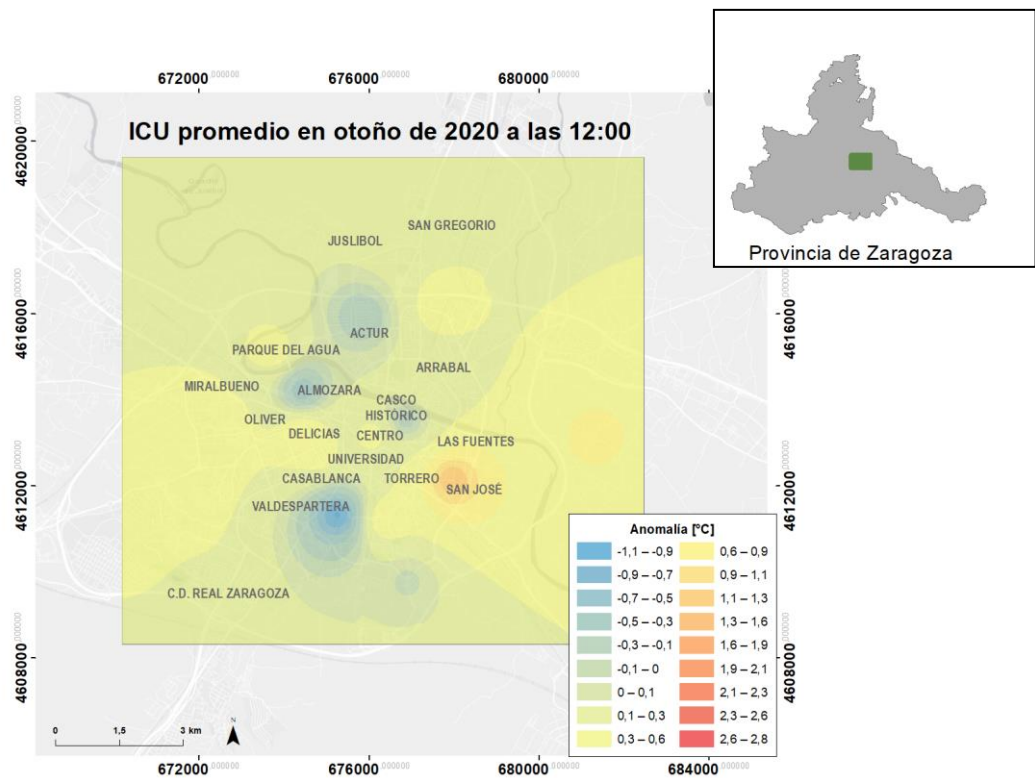


Figura A.15 – Isla de calor promedio en Zaragoza a las 12:00 en otoño de 2020.

Apéndice B – Tablas

En este apéndice se presentan tablas con los valores resultados para cada escenario analizado en este estudio.

Tabla B.1 – Temperaturas promedio durante el año 2020 e intensidad anual de la ICU. En naranja los valores máximos y en azul los mínimos.

| CÓDIGO SENSOR | NOMBRE SENSOR | T ^a media anual [°C] | Anomalía respecto T19 [°C] |
|---------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| T01 | Casa de la mujer | 16,78 | 1,46 |
| T02 | Ayuntamiento | 16,60 | 1,28 |
| T03 | Estación Norte | 16,37 | 1,05 |
| T04 | Instituto de juventud | 16,46 | 1,14 |
| T05 | Delicias | 16,94 | 1,62 |
| T06 | IES Andalán | 16,24 | 0,92 |
| T07 | Parque del agua | 15,67 | 0,36 |
| T08 | C.C. Actur | 16,33 | 1,01 |
| T09 | Fuentes | 16,47 | 1,15 |
| T10 | AEMET | 16,39 | 1,07 |
| T11 | Jardín botánico | 15,81 | 0,49 |
| T12 | Oliver | 16,42 | 1,10 |
| T13 | Camping | 16,32 | 1,00 |
| T14 | Valdespartera | 16,09 | 0,77 |
| T15 | Policía local | 15,86 | 0,54 |
| T16 | Movera | 15,97 | 0,65 |
| T17 | Cogullada | 16,03 | 0,71 |
| T18 | San Gregorio | 15,73 | 0,41 |
| T19 | Real Zaragoza | 15,32 | 0 |

Tabla B.2 – Temperaturas promedio e intensidad de la ICU en cada. En naranja los valores máximos y en azul los mínimos.

| CÓDIGO SENSOR | NOMBRE SENSOR | Tª media estacional [°C] | | | | Anomalía respecto T19 [°C] | | | |
|---------------|-----------------------|--------------------------|-----------|--------|-------|----------------------------|-----------|--------|-------|
| | | INVIERNO | PRIMAVERA | VERANO | OTOÑO | INVIERNO | PRIMAVERA | VERANO | OTOÑO |
| T01 | Casa de la mujer | 9,36 | 16,37 | 25,15 | 16,51 | 1,28 | 1,60 | 1,46 | 1,54 |
| T02 | Ayuntamiento | 9,32 | 16,07 | 24,88 | 16,43 | 1,24 | 1,30 | 1,18 | 1,47 |
| T03 | Estación Norte | 8,91 | 15,91 | 24,76 | 16,15 | 0,84 | 1,13 | 1,07 | 1,18 |
| T04 | Instituto de juventud | 9,22 | 15,99 | 24,59 | 16,28 | 1,14 | 1,21 | 0,89 | 1,31 |
| T05 | Delicias | 9,40 | 16,40 | 25,36 | 16,78 | 1,33 | 1,62 | 1,67 | 1,81 |
| T06 | IES Andarán | 8,64 | 15,93 | 24,82 | 15,78 | 0,57 | 1,15 | 1,13 | 0,81 |
| T07 | Parque del agua | 8,24 | 15,31 | 24,04 | 15,30 | 0,17 | 0,53 | 0,34 | 0,34 |
| T08 | C.C. Actur | 8,80 | 15,98 | 24,66 | 16,05 | 0,73 | 1,21 | 0,96 | 1,08 |
| T09 | Fuentes | 8,80 | 16,02 | 25,22 | 16,06 | 0,73 | 1,24 | 1,52 | 1,09 |
| T10 | AEMET | 9,02 | 15,87 | 24,78 | 16,19 | 0,94 | 1,09 | 1,08 | 1,22 |
| T11 | Jardín botánico | 8,45 | 15,37 | 24,44 | 15,32 | 0,38 | 0,59 | 0,74 | 0,35 |
| T12 | Oliver | 9,06 | 15,93 | 24,74 | 16,22 | 0,98 | 1,16 | 1,05 | 1,25 |
| T13 | Camping | 8,88 | 15,82 | 24,78 | 16,04 | 0,80 | 1,04 | 1,09 | 1,07 |
| T14 | Valdespartera | 8,71 | 15,57 | 24,46 | 15,84 | 0,64 | 0,79 | 0,77 | 0,87 |
| T15 | Policía local | 8,27 | 15,42 | 24,47 | 15,54 | 0,20 | 0,64 | 0,77 | 0,57 |
| T16 | Movera | 8,34 | 15,58 | 24,48 | 15,73 | 0,27 | 0,80 | 0,79 | 0,76 |
| T17 | Cogullada | 8,36 | 15,57 | 24,58 | 15,83 | 0,28 | 0,79 | 0,88 | 0,86 |
| T18 | San Gregorio | 8,04 | 15,28 | 24,32 | 15,51 | -0,03 | 0,5 | 0,62 | 0,54 |
| T19 | Real Zaragoza | 8,07 | 14,78 | 23,69 | 14,97 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla B.3 – Promedio de temperatura y anomalía de todos los sensores en cada estación del año 2020.

En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| | INVIERNO | PRIMAVERA | VERANO | OTOÑO |
|------------------------|----------|-----------|--------|-------|
| Tª promedio [°C] | 8,73 | 15,75 | 24,64 | 15,92 |
| Anomalía promedio [°C] | 0,66 | 0,97 | 0,95 | 0,95 |

Tabla B.4 – Anomalía promedio anual entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| ANUAL | | |
|-------|---------------------|------------|
| Hora | Anomalía media [°C] | Desviación |
| 0:00 | 2,12 | 1,40 |
| 1:00 | 2,07 | 1,34 |
| 2:00 | 2,09 | 1,44 |
| 3:00 | 2,01 | 1,43 |
| 4:00 | 2,02 | 1,48 |
| 5:00 | 2,04 | 1,55 |
| 6:00 | 1,94 | 1,59 |
| 7:00 | 1,61 | 1,45 |
| 8:00 | 1,23 | 1,28 |
| 9:00 | 0,92 | 1,08 |
| 10:00 | 0,73 | 0,98 |
| 11:00 | 0,74 | 0,98 |
| 12:00 | 0,77 | 0,92 |
| 13:00 | 0,78 | 0,86 |
| 14:00 | 1,05 | 0,83 |
| 15:00 | 1,28 | 0,73 |
| 16:00 | 1,43 | 0,68 |
| 17:00 | 1,45 | 0,66 |
| 18:00 | 1,52 | 0,80 |
| 19:00 | 1,86 | 1,09 |
| 20:00 | 2,23 | 1,27 |
| 21:00 | 2,44 | 1,43 |
| 22:00 | 2,37 | 1,44 |
| 23:00 | 2,24 | 1,40 |

Tabla B.5 – Anomalía promedio en invierno entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| INVIERNO | | |
|----------|---------------------|------------|
| Hora | Anomalía media [°C] | Desviación |
| 0:00 | 1,61 | 1,37 |
| 1:00 | 1,58 | 1,30 |
| 2:00 | 1,60 | 1,43 |
| 3:00 | 1,47 | 1,55 |
| 4:00 | 1,56 | 1,46 |
| 5:00 | 1,48 | 1,59 |
| 6:00 | 1,35 | 1,72 |
| 7:00 | 1,39 | 1,61 |
| 8:00 | 1,50 | 1,48 |
| 9:00 | 1,07 | 1,50 |
| 10:00 | 0,47 | 1,47 |
| 11:00 | 0,30 | 1,49 |
| 12:00 | 0,37 | 1,37 |
| 13:00 | 0,43 | 1,08 |
| 14:00 | 0,72 | 0,84 |
| 15:00 | 0,91 | 0,73 |
| 16:00 | 1,08 | 0,74 |
| 17:00 | 1,19 | 0,63 |
| 18:00 | 1,43 | 0,71 |
| 19:00 | 1,88 | 1,23 |
| 20:00 | 2,20 | 1,38 |
| 21:00 | 2,17 | 1,43 |
| 22:00 | 2,01 | 1,40 |
| 23:00 | 1,84 | 1,31 |

Tabla B.6 – Anomalía promedio en primavera entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| PRIMAVERA | | |
|-----------|---------------------|------------|
| Hora | Anomalía media [°C] | Desviación |
| 0:00 | 2,17 | 1,29 |
| 1:00 | 2,08 | 1,15 |
| 2:00 | 2,07 | 1,18 |
| 3:00 | 2,02 | 1,23 |
| 4:00 | 1,96 | 1,40 |
| 5:00 | 1,91 | 1,44 |
| 6:00 | 1,85 | 1,54 |
| 7:00 | 1,44 | 1,42 |
| 8:00 | 1,02 | 1,17 |
| 9:00 | 0,80 | 0,79 |
| 10:00 | 0,85 | 0,62 |
| 11:00 | 1,00 | 0,65 |
| 12:00 | 1,04 | 0,59 |
| 13:00 | 1,06 | 0,71 |
| 14:00 | 1,22 | 1,00 |
| 15:00 | 1,50 | 0,63 |
| 16:00 | 1,49 | 0,52 |
| 17:00 | 1,51 | 0,61 |
| 18:00 | 1,42 | 0,43 |
| 19:00 | 1,58 | 0,47 |
| 20:00 | 2,08 | 0,95 |
| 21:00 | 2,36 | 1,45 |
| 22:00 | 2,36 | 1,54 |
| 23:00 | 2,25 | 1,41 |

Tabla B.7 – Anomalía promedio en verano entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| VERANO | | |
|--------|---------------------|------------|
| Hora | Anomalía media [°C] | Desviación |
| 0:00 | 2,15 | 1,18 |
| 1:00 | 2,12 | 1,16 |
| 2:00 | 2,16 | 1,27 |
| 3:00 | 2,09 | 1,08 |
| 4:00 | 2,08 | 1,14 |
| 5:00 | 2,18 | 1,29 |
| 6:00 | 2,11 | 1,40 |
| 7:00 | 1,33 | 1,10 |
| 8:00 | 0,74 | 0,69 |
| 9:00 | 0,72 | 0,56 |
| 10:00 | 0,94 | 0,58 |
| 11:00 | 1,00 | 0,59 |
| 12:00 | 1,10 | 0,57 |
| 13:00 | 1,16 | 0,52 |
| 14:00 | 1,45 | 0,53 |
| 15:00 | 1,53 | 0,54 |
| 16:00 | 1,61 | 0,67 |
| 17:00 | 1,57 | 0,52 |
| 18:00 | 1,44 | 0,63 |
| 19:00 | 1,55 | 0,67 |
| 20:00 | 1,94 | 0,74 |
| 21:00 | 2,54 | 1,14 |
| 22:00 | 2,43 | 1,12 |
| 23:00 | 2,18 | 1,08 |

Tabla B.8 – Anomalia promedio en otoño entre Delicias y la C.D. RZgz y desviación estándar para cada hora del día. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| OTOÑO | | |
|-------|---------------------|------------|
| Hora | Anomalia media [°C] | Desviación |
| 0:00 | 2,44 | 1,64 |
| 1:00 | 2,43 | 1,54 |
| 2:00 | 2,44 | 1,68 |
| 3:00 | 2,39 | 1,66 |
| 4:00 | 2,40 | 1,64 |
| 5:00 | 2,46 | 1,68 |
| 6:00 | 2,30 | 1,71 |
| 7:00 | 2,20 | 1,54 |
| 8:00 | 1,57 | 1,49 |
| 9:00 | 0,98 | 1,17 |
| 10:00 | 0,57 | 0,98 |
| 11:00 | 0,60 | 0,84 |
| 12:00 | 0,62 | 0,68 |
| 13:00 | 0,56 | 0,79 |
| 14:00 | 0,88 | 0,66 |
| 15:00 | 1,18 | 0,69 |
| 16:00 | 1,40 | 0,70 |
| 17:00 | 1,47 | 0,56 |
| 18:00 | 1,83 | 0,95 |
| 19:00 | 2,36 | 1,52 |
| 20:00 | 2,64 | 1,66 |
| 21:00 | 2,56 | 1,67 |
| 22:00 | 2,53 | 1,64 |
| 23:00 | 2,59 | 1,67 |

Tabla B.9 – Temperaturas promedio durante el año 2020 a las 00:00, 12:00 y 21:00 (°C). En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| NOMBRE SENSOR | ANUAL | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| | 0:00 | 12:00 | 21:00 |
| Casa de la mujer | 15,61 | 17,63 | 17,95 |
| Ayuntamiento | 15,21 | 17,94 | 17,63 |
| Estación Norte | 15,07 | 17,53 | 17,80 |
| Instituto de juventud | 15,06 | 17,88 | 17,33 |
| Delicias | 15,50 | 18,41 | 17,93 |
| IES Andalán | 14,82 | 17,73 | 17,13 |
| Parque del agua | 13,78 | 17,86 | 16,01 |
| C.C. Actur | 14,89 | 17,44 | 17,42 |
| Fuentes | 14,54 | 19,05 | 16,89 |
| AEMET | 14,67 | 18,17 | 17,17 |
| Jardín botánico | 14,38 | 17,02 | 17,04 |
| Oliver | 14,86 | 18,10 | 17,24 |
| Camping | 14,66 | 18,33 | 16,95 |
| Valdespartera | 14,40 | 17,88 | 16,71 |
| Policía local | 14,21 | 17,55 | 16,56 |
| Movera | 14,01 | 18,15 | 16,58 |
| Cogullada | 14,27 | 17,91 | 16,84 |
| San Gregorio | 13,84 | 17,86 | 16,36 |
| Real Zaragoza | 13,38 | 17,64 | 15,48 |

Tabla B.10 – Anomalía promedio durante el año 2020 a las 00:00, 12:00 y 21:00 (°C). En color naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| NOMBRE SENSOR | ANUAL | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| | 0:00 | 12:00 | 21:00 |
| Casa de la mujer | 2,24 | -0,01 | 2,47 |
| Ayuntamiento | 1,83 | 0,30 | 2,15 |
| Estación Norte | 1,69 | -0,11 | 2,32 |
| Instituto de juventud | 1,68 | 0,25 | 1,85 |
| Delicias | 2,12 | 0,77 | 2,44 |
| IES Andalán | 1,44 | 0,09 | 1,65 |
| Parque del agua | 0,40 | 0,23 | 0,53 |
| C.C. Actur | 1,52 | -0,20 | 1,94 |
| Fuentes | 1,16 | 1,41 | 1,41 |
| AEMET | 1,29 | 0,53 | 1,69 |
| Jardín botánico | 1,00 | -0,62 | 1,56 |
| Oliver | 1,48 | 0,46 | 1,76 |
| Camping | 1,29 | 0,69 | 1,47 |
| Valdespartera | 1,02 | 0,24 | 1,23 |
| Policía local | 0,83 | -0,09 | 1,07 |
| Movera | 0,63 | 0,51 | 1,09 |
| Cogullada | 0,90 | 0,27 | 1,36 |
| San Gregorio | 0,46 | 0,22 | 0,87 |

Tabla B.11 – Promedio de temperatura y anomalía de todos los sensores durante el año 2020. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| | ANUAL | | |
|------------------------|-------|-------|-------|
| | 0:00 | 12:00 | 21:00 |
| Tª promedio [°C] | 14,59 | 17,9 | 17,00 |
| Anomalía promedio [°C] | 1,28 | 0,27 | 1,60 |

Tabla B.12 – Temperaturas promedio durante cada estación del año 2020 a las 00:00, 12:00 y 21:00 (°C). En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| NOMBRE SENSOR | INVIERNO | | | PRIMAVERA | | | VERANO | | | OTOÑO | | |
|-----------------------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0:00 | 12:00 | 21:00 | 0:00 | 12:00 | 21:00 | 0:00 | 12:00 | 21:00 | 0:00 | 12:00 | 21:00 |
| Casa de la mujer | 8,87 | 9,30 | 10,38 | 15,19 | 17,54 | 17,62 | 23,17 | 26,48 | 26,84 | 15,61 | 17,43 | 17,34 |
| Ayuntamiento | 8,72 | 9,56 | 10,16 | 14,69 | 17,64 | 17,26 | 22,68 | 26,84 | 26,51 | 15,24 | 17,95 | 16,98 |
| Estación Norte | 8,05 | 9,26 | 9,86 | 14,93 | 16,89 | 17,84 | 22,81 | 26,33 | 27,01 | 14,86 | 17,77 | 16,83 |
| Instituto de juventud | 8,49 | 9,80 | 9,89 | 14,66 | 17,53 | 17,08 | 22,50 | 26,54 | 25,94 | 15,04 | 17,94 | 16,69 |
| Delicias | 8,67 | 10,02 | 10,12 | 15,00 | 18,15 | 17,50 | 23,10 | 27,56 | 26,93 | 15,57 | 18,21 | 17,36 |
| IES Andalán | 7,97 | 9,01 | 9,39 | 14,52 | 17,75 | 16,93 | 22,57 | 27,28 | 26,17 | 14,68 | 17,14 | 16,30 |
| Parque del agua | 7,03 | 9,55 | 8,39 | 13,56 | 17,53 | 15,89 | 21,44 | 26,58 | 24,94 | 13,59 | 18,00 | 14,99 |
| C.C. Actur | 7,98 | 9,14 | 9,63 | 14,57 | 17,34 | 17,26 | 22,54 | 26,17 | 26,36 | 14,85 | 17,32 | 16,67 |
| Fuentes | 7,80 | 10,35 | 9,29 | 14,01 | 18,79 | 16,48 | 22,39 | 28,56 | 25,96 | 14,39 | 18,87 | 16,06 |
| AEMET | 8,09 | 9,78 | 9,55 | 14,14 | 17,87 | 16,79 | 22,21 | 27,29 | 26,20 | 14,65 | 18,07 | 16,48 |
| Jardín botánico | 7,40 | 9,53 | 8,79 | 14,00 | 16,76 | 16,83 | 22,78 | 25,45 | 27,07 | 13,94 | 16,67 | 15,90 |
| Oliver | 8,35 | 9,41 | 9,78 | 14,44 | 17,81 | 16,92 | 22,32 | 27,11 | 26,02 | 14,86 | 18,16 | 16,60 |
| Camping | 7,96 | 10,04 | 9,38 | 14,23 | 17,97 | 16,62 | 22,31 | 27,37 | 25,80 | 14,59 | 18,18 | 16,33 |
| Valdespartera | 7,85 | 9,79 | 9,07 | 13,94 | 17,45 | 16,38 | 21,99 | 26,69 | 25,71 | 14,28 | 17,87 | 16,02 |
| Policía local | 7,36 | 9,24 | 8,64 | 13,82 | 17,26 | 16,17 | 22,17 | 26,43 | 25,98 | 14,00 | 17,56 | 15,70 |
| Movera | 7,18 | 9,49 | 8,76 | 13,60 | 18,01 | 16,28 | 21,82 | 27,2 | 25,74 | 13,90 | 18,25 | 15,81 |
| Cogullada | 7,16 | 9,40 | 8,89 | 13,87 | 17,60 | 16,61 | 22,16 | 26,92 | 26,01 | 14,25 | 18,02 | 16,09 |
| San Gregorio | 6,91 | 9,12 | 8,42 | 13,47 | 17,59 | 16,06 | 21,60 | 27,10 | 25,58 | 13,81 | 17,84 | 15,63 |
| Real Zaragoza | 7,05 | 9,65 | 7,96 | 12,83 | 17,10 | 15,15 | 20,95 | 26,46 | 24,38 | 13,13 | 17,59 | 14,79 |

Tabla B.13 – Anomalías promedio durante cada estación del año 2020 a las 00:00, 12:00 y 21:00 (°C).

En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| NOMBRE SENSOR | INVIERNO | | | PRIMAVERA | | | VERANO | | | OTOÑO | | |
|-----------------------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0:00 | 12:00 | 21:00 | 0:00 | 12:00 | 21:00 | 0:00 | 12:00 | 21:00 | 0:00 | 12:00 | 21:00 |
| Casa de la mujer | 1,82 | -0,35 | 2,43 | 2,36 | 0,44 | 2,48 | 2,21 | 0,02 | 2,46 | 2,48 | -0,16 | 2,55 |
| Ayuntamiento | 1,67 | -0,08 | 2,20 | 1,86 | 0,54 | 2,11 | 1,73 | 0,38 | 2,13 | 2,11 | 0,36 | 2,19 |
| Estación Norte | 1,00 | -0,38 | 1,91 | 2,10 | -0,21 | 2,70 | 1,86 | -0,13 | 2,63 | 1,73 | 0,19 | 2,04 |
| Instituto de juventud | 1,44 | 0,15 | 1,94 | 1,83 | 0,42 | 1,94 | 1,54 | 0,08 | 1,56 | 1,91 | 0,36 | 1,90 |
| Delicias | 1,61 | 0,37 | 2,17 | 2,17 | 1,04 | 2,36 | 2,15 | 1,10 | 2,54 | 2,44 | 0,62 | 2,56 |
| IES Andálan | 0,92 | -0,63 | 1,44 | 1,69 | 0,65 | 1,78 | 1,62 | 0,82 | 1,79 | 1,55 | -0,44 | 1,50 |
| Parque del agua | -0,02 | -0,10 | 0,44 | 0,73 | 0,42 | 0,75 | 0,48 | 0,12 | 0,56 | 0,46 | 0,42 | 0,20 |
| C.C. Actur | 0,92 | -0,51 | 1,67 | 1,74 | 0,24 | 2,12 | 1,58 | -0,29 | 1,98 | 1,72 | -0,27 | 1,88 |
| Fuentes | 0,75 | 0,71 | 1,34 | 1,18 | 1,69 | 1,33 | 1,44 | 2,09 | 1,57 | 1,25 | 1,28 | 1,26 |
| AEMET | 1,03 | 0,13 | 1,59 | 1,31 | 0,77 | 1,65 | 1,26 | 0,83 | 1,82 | 1,51 | 0,48 | 1,69 |
| Jardín botánico | 0,35 | -0,12 | 0,83 | 1,17 | -0,34 | 1,68 | 1,83 | -1,01 | 2,69 | 0,81 | -0,92 | 1,10 |
| Oliver | 1,30 | -0,23 | 1,83 | 1,61 | 0,71 | 1,77 | 1,37 | 0,65 | 1,64 | 1,72 | 0,57 | 1,81 |
| Camping | 0,91 | 0,39 | 1,43 | 1,40 | 0,87 | 1,47 | 1,35 | 0,91 | 1,42 | 1,46 | 0,59 | 1,53 |
| Valdespartera | 0,80 | 0,14 | 1,11 | 1,11 | 0,35 | 1,24 | 1,03 | 0,23 | 1,33 | 1,15 | 0,28 | 1,23 |
| Policía local | 0,31 | -0,41 | 0,69 | 0,99 | 0,16 | 1,03 | 1,22 | -0,03 | 1,59 | 0,87 | -0,03 | 0,91 |
| Movera | 0,13 | -0,15 | 0,81 | 0,77 | 0,91 | 1,13 | 0,86 | 0,74 | 1,36 | 0,77 | 0,66 | 1,01 |
| Cogullada | 0,11 | -0,25 | 0,94 | 1,04 | 0,50 | 1,46 | 1,21 | 0,46 | 1,62 | 1,11 | 0,43 | 1,30 |
| San Gregorio | -0,15 | -0,53 | 0,47 | 0,64 | 0,49 | 0,91 | 0,64 | 0,64 | 1,20 | 0,68 | 0,25 | 0,83 |

Tabla B.14 – Promedio de temperatura y anomalía de todos los sensores durante cada estación del año

2020. En naranja el valor máximo y en azul el mínimo.

| | INVIERNO | | | PRIMAVERA | | | VERANO | | | OTOÑO | | |
|------------------------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0:00 | 12:00 | 21:00 | 0:00 | 12:00 | 21:00 | 0:00 | 12:00 | 21:00 | 0:00 | 12:00 | 21:00 |
| Tª promedio [°C] | 7,84 | 9,55 | 9,28 | 14,18 | 17,61 | 16,72 | 22,29 | 26,86 | 26,06 | 14,49 | 17,83 | 16,24 |
| Anomalia promedio [°C] | 0,83 | -0,10 | 1,40 | 1,43 | 0,54 | 1,66 | 1,41 | 0,42 | 1,77 | 1,43 | 0,26 | 1,53 |

Tabla B.15 – Promedio de temperatura de cada mes durante el año 2020. En naranja el valor máximo

y en azul el mínimo.

| Mes | Tª promedio [°C] | Mes | Tª promedio [°C] |
|---------|------------------|------------|------------------|
| Enero | 6,04 | Julio | 26,11 |
| Febrero | 11,20 | Agosto | 25,95 |
| Marzo | 11,60 | Septiembre | 21,44 |
| Abril | 15,12 | Octubre | 15,06 |
| Mayo | 20,52 | Noviembre | 11,26 |
| Junio | 21,87 | Diciembre | 7,69 |