

TRABAJO FIN DE MÁSTER

VULNERABILIDAD FRENTE AL CALOR EN EL ENTRAMADO URBANO DE ZARAGOZA A PARTIR DE UN ÍNDICE MULTICRITERIO

Autora: Casandra González Clavería

Director: Miguel Ángel Saz Sánchez

Máster Universitario en

Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de
información geográfica y teledetección

Septiembre de 2024



Universidad
Zaragoza

Departamento de Geografía y
Ordenación del Territorio



Resumen

El estudio de la vulnerabilidad urbana frente a las olas de calor resulta crucial en el contexto actual de cambio climático, en el que los episodios extremos van a ser cada vez más frecuentes en las ciudades. A pesar de que el ayuntamiento de Zaragoza ha elaborado una serie de políticas de adaptación al cambio climático, no ha considerado la espacialización de la vulnerabilidad. El objetivo de este trabajo es analizar la vulnerabilidad urbana de Zaragoza frente a las olas de calor mediante un índice sintético multicriterio que categoriza las zonas más y menos vulnerables. Los datos se estructuran en un modelo SIG, lo que permite organizar y procesar la información procedente de diferentes fuentes. Los resultados muestran que los edificios más vulnerables se concentran en los barrios de Delicias, Casco Histórico, Oliver-Valdefierro, Las Fuentes, San José y Torrero mientras que en los espacios públicos las zonas verdes presentan una menor vulnerabilidad que las construidas. Estos mapas constituyen una herramienta útil para priorizar las intervenciones de adaptación de la ciudad y mejorar la calidad de vida de la población.

Palabras clave: eventos térmicos extremos, clima urbano, SIG, planificación urbana, adaptación al cambio climático, calidad de vida.

Abstract

The study of urban vulnerability to heat waves is crucial in the current context of climate change, where extreme episodes will become increasingly frequent in cities. Although the city council of Zaragoza has developed a series of climate change adaptation policies, it has not considered the spatialisation of vulnerability. The aim of this work is to analyse the urban vulnerability of Zaragoza to heat waves using a synthetic multi-criteria index that categorises the most and least vulnerable areas. The data is structured in a GIS model, which allows information from different sources to be organised and processed. The results show that the most vulnerable buildings are concentrated in the neighbourhoods of Delicias, Casco Histórico, Oliver-Valdefierro, Las Fuentes, San José and Torrero, while in public spaces, green areas are less vulnerable than built ones. These maps are a useful tool for prioritising interventions to adapt the city and improve the quality of life of the population.

Key words: extreme thermal events, urban climate, GIS, urban planning, climate change adaptation, quality of life.

ÍNDICE

1. Introducción.....	3
2. Área de estudio.....	6
2.1. Caracterización geográfica de la ciudad de Zaragoza.....	6
2.2. Estudios de clima urbano en Zaragoza.....	8
2.3. Adaptación de la ciudad al cambio climático.....	9
3. Fuentes de información y metodología.....	12
3.1. Revisión bibliográfica.....	12
3.2. Adaptación del índice de Quesada et al. (2023) para la ciudad de Zaragoza.....	14
3.3. Criterios e indicadores de vulnerabilidad.....	17
3.3.1. Vulnerabilidad de los edificios.....	17
3.3.2. Vulnerabilidad del espacio público.....	19
3.4. Datos empleados y cálculo de los indicadores.....	20
3.5. Cálculo del índice sintético de vulnerabilidad frente a olas de calor.....	22
4. Resultados.....	25
5. Discusión.....	33
6. Conclusiones.....	35
7. Bibliografía.....	37

1. Introducción

Uno de los retos más complejos a la vez que relevantes para la humanidad en las próximas décadas es el cambio climático. Según el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2023) se prevé un calentamiento global medio de entre 2,2°C y 3,5°C (intervalo muy probable) para el año 2100 así como un aumento de los eventos térmicos extremos, en especial de las olas de calor. A ello se suman cambios en otros fenómenos, como el incremento en la intensidad de las precipitaciones, que genera inundaciones más frecuentes; las sequías, que afectan al suministro de agua para usos urbanos e industriales; y el aumento del nivel del mar, que supone una problemática considerable para las zonas costeras.

Desde 2014 el IPCC indica de forma explícita que uno de los espacios del planeta más sensibles al cambio climático son las ciudades, que se van a ver especialmente afectadas por inundaciones y olas de calor. Las proyecciones climáticas mundiales apuntan sistemáticamente a un aumento del número, la frecuencia y la intensidad de las olas de calor (Meehl *et al.*, 2004; Schär *et al.*, 2004; De Ridder *et al.*, 2016) y han demostrado que es probable que veranos extremadamente calurosos como el de 2003 en Europa sean bastante comunes hacia finales de siglo.

Por ello, los estudios sobre el cambio del clima y sus efectos a escala urbana cobran cada vez más importancia, con investigaciones realizadas en ciudades como París (Lemonsu *et al.*, 2013), Lisboa (Alcoforado *et al.*, 2015), Madrid (Linares *et al.*, 2008) o Barcelona (Martín Vide *et al.*, 2015). Los resultados de dichos estudios muestran un aumento significativo de las temperaturas en las últimas décadas así como un incremento de los fenómenos extremos, principalmente de las olas de calor, lo que repercute directamente en la salud y en la calidad de vida de la población local (Barrao *et al.*, 2019).

Las ciudades transforman notablemente el medio natural en el que se desarrollan, constituyendo los espacios más antropizados del planeta. El proceso de urbanización conlleva una importante alteración del paisaje dado que desaparece la cubierta vegetal y se sustituyen los suelos permeables por superficies impermeables, modificando así la escorrentía, la humedad y el balance de radiación local. Además, las actividades humanas generan una gran cantidad de calor y de partículas contaminantes que son emitidas a la atmósfera, lo que altera su composición e, igualmente, modifica los balances locales de radiación (Saz *et al.*, 2021).

Todos estos cambios afectan de forma sustancial al clima de los entornos urbanos, generando como consecuencia el fenómeno de las isla de calor urbana (ICU), que se define por una mayor temperatura del aire en el centro de la ciudad en relación a la periferia no urbanizada (Oke,

1995). Las olas de calor no solo aumentan las temperaturas, sino que también intensifican el efecto de la ICU, incrementando las diferencias térmicas entre las áreas urbanas y rurales (Santamouris, 2019).

La ICU constituye un fenómeno de escala local que ha sido estudiado en multitud de ocasiones (Arnfield, 2003; Masson *et al.*, 2020; Oke, 1973, 1982; Stewart, 2011). Su intensidad se ha puesto en relación con el tamaño de la ciudad, la estructura urbana, los usos del suelo y el tipo de clima (Nastran *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2018; Yue *et al.*, 2019). A ello debe añadirse que la diferencia de temperatura se ha identificado como más acusada durante la noche, ya que es el momento en que la energía absorbida por los edificios y las superficies artificiales es emitida a la atmósfera en forma de calor (Saz *et al.*, 2021).

Los espacios urbanos ocupan un lugar clave en el proceso de desarrollo ya que desde 2007 albergan a más del 50% de la población mundial. De acuerdo con las Naciones Unidas (2019), en las ciudades reside actualmente el 55% de la población mundial y se prevé que esta cifra alcance los 5.000 millones de personas en 2028 y los 6.000 millones para 2041. La exposición de las zonas urbanas a eventos térmicos extremos cada vez más frecuentes las convierte en un verdadero reto para el próximo siglo y pone de manifiesto la necesidad de evaluar los riesgos que enfrentan, con el fin de priorizar estrategias de adaptación que impulsen un desarrollo hacia ciudades más resilientes (CMNUCC, 2015).

Entre estos riesgos cabe destacar el impacto del fenómeno de la isla de calor urbano (ICU) sobre la salud, un riesgo que se agrava durante las olas de calor deteriorando así la calidad de vida de la población urbana (Heaviside *et al.*, 2017; Royé *et al.*, 2020). Esta amplificación, combinada con el crecimiento de la superficie que ocupan las ciudades y el aumento de su población, afectará potencialmente a la mitad de la población mundial en el futuro (Zhao *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2019).

Dado que se esperan olas de calor cada vez más frecuentes y severas, resulta necesario destacar que las poblaciones urbanas van a enfrentarse a un potencial empeoramiento de su calidad de vida en el siglo XXI. Es por ello que se necesitan más estudios para comprender la heterogeneidad de este fenómeno y poder reducir tanto sus impactos como la vulnerabilidad de la población urbana (Barrao *et al.*, 2022). El papel crucial que pueden desempeñar las ciudades para aplicar políticas de mitigación y adaptación es reconocido a nivel internacional: la Agenda de las Naciones Unidas y el 11° Objetivo de Desarrollo Sostenible se centran en la resiliencia urbana, el clima y la sostenibilidad medioambiental de las ciudades; y dos de los cuatro retos identificados por el Programa Mundial de

Investigación Meteorológica de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) están relacionados con las ciudades: el clima de alto impacto, incluidos los impactos en las ciudades, y la urbanización.

El objetivo general de este trabajo es el de analizar la vulnerabilidad de los distintos espacios urbanos de la ciudad de Zaragoza frente a las olas de calor desarrollando mediante un índice sintético multicriterio una categorización de espacios más o menos vulnerables en función de sus condiciones socioeconómicas y ambientales. Con la finalidad de abordar un estudio completo de esta cuestión, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Determinar las variables necesarias para evaluar la vulnerabilidad frente a las olas de calor, tanto de los edificios como de los espacios públicos, considerando los datos disponibles para la ciudad de Zaragoza.
- Identificar, a partir del cálculo de un índice de vulnerabilidad en un sistema de información geográfica, los sectores de la ciudad más vulnerables frente a olas de calor.
- Analizar las diferencias obtenidas entre las distintas áreas de la ciudad y los factores que las condicionan a partir de las variables incluidas en el índice de vulnerabilidad.

2. Área de estudio

En este capítulo se explican las características geográficas de la ciudad, haciendo hincapié en aquellas cuestiones climáticas y urbanas más relevantes que permiten comprender la estructura de Zaragoza. A continuación, se exponen los antecedentes sobre estudios de clima urbano más significativos y, finalmente, se incluyen las iniciativas que se están llevando a cabo desde el Ayuntamiento de Zaragoza en relación a la adaptación de la ciudad al cambio climático.

2.1. Caracterización geográfica de la ciudad de Zaragoza

Zaragoza, situada en el cuadrante noreste de España, presenta una superficie de 967 km² y una población de 694.109 habitantes (Observatorio Municipal de Estadística, 2023). Se localiza en el centro de la depresión del Ebro, en la confluencia de tres ríos: el Ebro, que la atraviesa de oeste a este, y dos de sus afluentes, el Gállego y el Huerva, que desembocan en el río principal a su paso por la ciudad. Presenta una topografía sencilla, con una diferencia altitudinal inferior a 100 metros entre las zonas más bajas, situadas en el eje del río Ebro, y las más elevadas, al sur de la ciudad en el entorno de los Pinares de Venecia, a unos 280 metros sobre el nivel del mar.

La ciudad presenta un clima mediterráneo continental semiárido, muy condicionado por las características geográficas del centro de la depresión y de la dinámica general atmosférica de estas latitudes (Cuadrat *et al.*, 2007). De acuerdo con la clasificación de Köppen se trata de un clima de tipo BSk (según los datos del periodo 1971-2000), cuyo rasgo principal es el escaso volumen de precipitaciones (en torno a los 320 mm anuales), que además se encuentra sometido a una elevada variabilidad interanual y unos máximos de precipitación concentrados en primavera y otoño. Asimismo, tienen lugar importantes contrastes térmicos estacionales, con inviernos frescos de frecuentes nieblas y una temperatura media en enero de 6,2 °C, y veranos cálidos, con una temperatura media en julio de 24,3 °C y máximas que pueden superar durante varios días consecutivos los 30 °C e incluso 35 °C (Barrao *et al.*, 2021). Ambas estaciones presentan frecuentes situaciones anticiclónicas, de cielos despejados y vientos suaves o en calma que favorecen la formación de islas de calor (Saz *et al.*, 2021). No obstante, el viento es otra componente clave del clima de Zaragoza, con velocidades que en ocasiones superan los 100 km/h. Se origina debido a la distribución de la orografía, dado que los diferentes flujos de aire que llegan a la Península Ibérica se canalizan en el Valle del Ebro entre dos cadenas montañosas, los Pirineos al norte y el Sistema Ibérico al sur, adquiriendo el viento dos direcciones predominantes, NW y SE. (Saz *et al.*, 2022). Trabajos anteriores ya han mostrado la influencia del viento sobre la ICU en Zaragoza (Vicente-Serrano *et al.*, 2003).

Siguiendo el mismo proceso de urbanización que muchas otras ciudades mediterráneas, su crecimiento ha surgido a partir de un núcleo central histórico, con elevada densidad de edificaciones, calles estrechas y plazas sin forma definida. A partir de este núcleo, se desarrollaron ensanches durante el primer tercio del siglo XX, con mayor o menor planificación urbana, así como barrios que acogieron el éxodo rural de los años 60 y 70, también de características compactas. En las décadas de los 80 y 90, surgieron nuevas zonas de expansión, con menor densidad y mayor presencia de áreas verdes y en las dos últimas décadas se han urbanizado nuevos suelos en la periferia, principalmente residenciales y con una densidad entre baja y media (Saz *et al.*, 2022). Así, en estos espacios periféricos ha tenido lugar un notable desplazamiento de población joven, proveniente principalmente de los barrios centrales de la ciudad y con un nivel socioeconómico medio-alto. En contraposición, la mayor parte de la población extranjera se ha establecido en los barrios centrales, donde el envejecimiento ha dejado disponibles una gran cantidad de viviendas económicamente más asequibles pero más deterioradas, en comparación con las nuevas situadas en la periferia (Ebrópolis, 2019).

De acuerdo con Escolano-Utrilla *et al.* (2021), la ciudad de Zaragoza se puede estructurar en cuatro áreas socioespaciales (Figura 1): i) Centro urbano: recoge el espacio situado entre el río Ebro y el primer cinturón (muralla medieval), lo que comprende el Casco Histórico y los ensanches en los que vive la población con mayor estatus socioeconómico; en este espacio se encuentra el principal entorno comercial y de negocios de la ciudad; ii) Barrios populares de la margen derecha del río Ebro: se extienden desde el centro histórico hasta el cinturón Z-30, también se incluyen los barrios tradicionales del «extrarradio», Oliver y Valdefierro; iii) Barrios populares de la margen izquierda del río Ebro: se desarrollan en un espacio cercano al centro urbano, entre el río Ebro y el cinturón Z-30; y iv) Periferia próxima: corresponde al área urbana desarrollada entre los cinturones Z-30 y Z-40 y se distingue por su notable fragmentación espacial, la presencia de condominios de clase alta y la mezcla de usos del suelo y de densidades.

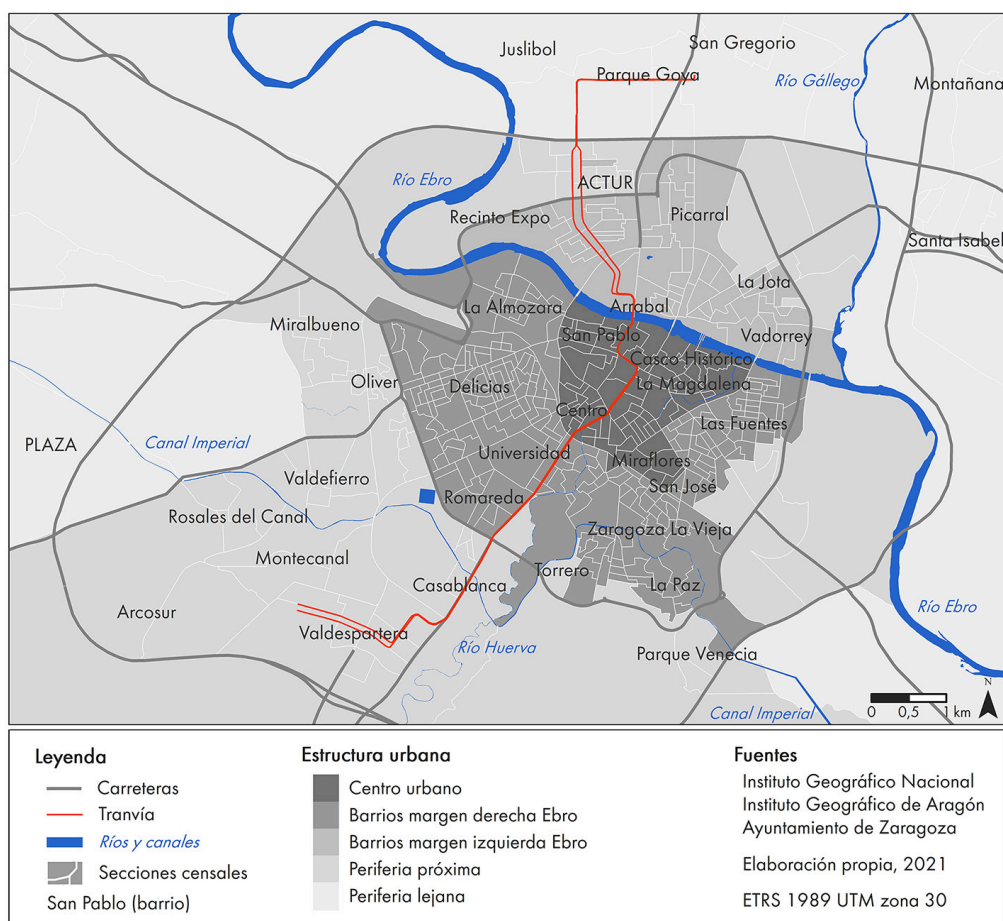


Figura 1. Estructura urbana de la ciudad de Zaragoza. Fuente: Escolano-Utrilla *et al.* (2021)

2.2. Estudios de clima urbano en Zaragoza

En la ciudad de Zaragoza se han llevado a cabo múltiples estudios sobre el clima urbano, inicialmente centrados en la relación entre el clima y la contaminación atmosférica (Ascaso, 1969). Durante la década de los 70, cambió el enfoque de estas investigaciones y se realizaron trabajos desde el punto de vista de las características bioclimáticas de la ciudad y el confort urbano (Calvo-Palacios, 1976).

Más recientemente, los estudios se han enfocado en el análisis de dos niveles diferentes: un primer nivel centrado en caracterizar la isla de calor de la ciudad y otro que ha estudiado la evaluación de los principales factores que condicionan el microclima de Zaragoza (Cuadrat *et al.*, 1993; De la Riva *et al.*, 1997; López Martín, 2011; Cuadrat *et al.*, 2005, 2014, 2015, 2020; Saz *et al.*, 2003; Vicente *et al.*, 2005).

Entre ellos se pueden destacar estudios como el de Cuadrat *et al.* (2005), en el que se analiza la relación entre las características espaciales de la ICU de Zaragoza y los principales factores

geográficos de la ciudad. Este trabajo pone de manifiesto la influencia en la ICU de la topografía, la densidad de edificios, la cubierta vegetal y la reflectividad de los materiales, así como de los vientos, dado que los del NW (cierzo) desplazan la isla de calor hacia el este y los del SE (viento de bochorno) la desplazan hacia el oeste. También resulta relevante para la ciudad el estudio de Cuadrat *et al.* (2022), en el que se analiza variabilidad temporal de la ICU en Zaragoza. Se indica que la ICU es más intensa en verano que en invierno, en situaciones de calma atmosférica frente a situaciones de viento y durante la noche que durante el día.

Asimismo, se han publicado informes estudiando episodios concretos de calor (Olcina *et al.*, 2016; Saz *et al.*, 2021, 2022) con el objetivo de mejorar tanto las medidas de adaptación a unas nuevas condiciones climáticas como las políticas de mitigación. Cabe mencionar sobre el trabajo de Olcina *et al.* (2016), en el que se evalúa la incidencia de la ICU sobre las temperaturas y la humedad durante una ola de calor que afectó a Zaragoza en el mes de julio de 2015, que el patrón de distribución de la humedad relativa es muy similar al de las diferencias de temperatura, de forma que existe una isla de sequedad en el centro urbano.

2.3. Adaptación de la ciudad al cambio climático

El Ayuntamiento de Zaragoza, consciente de la problemática que supone el cambio climático para los espacios urbanos tanto a nivel político como social y sanitario, ha puesto en marcha desde hace años medidas de mitigación y de adaptación con el objetivo de aumentar la resiliencia de la ciudad. Las medidas de mitigación aplicadas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han dado lugar a que la Comisión Europea elija a Zaragoza para la 'Misión de las 100 Ciudades Climáticamente Neutras para 2030: por y para los ciudadanos' en reconocimiento al trabajo que ha desarrollado para reducir sus emisiones, completando y ampliando la Estrategia de Cambio Climático, Calidad del Aire y Salud de Zaragoza (ECAZ 3.0) (Ayuntamiento de Zaragoza, 2023).

Igualmente, la ciudad está comprometida en términos de adaptación, con la ratificación de su compromiso con el Pacto de las Alcaldías para el Clima y la Energía al que se adhirió en 2018 y con la redacción del Plan de Adaptación al Cambio Climático de Zaragoza (PACCZ). El Pacto de las Alcaldías es una iniciativa que permite a los ayuntamientos comprometerse voluntariamente a implantar los objetivos climáticos y energéticos de la Unión Europea. Los firmantes del Nuevo Pacto de las Alcaldías comparten unas metas conjuntas para 2050: acelerar la descarbonización de sus territorios, fortalecer su capacidad para adaptarse a los impactos del cambio climático y asegurar el acceso de la ciudadanía a una energía segura, sostenible y asequible, para lo cual deben elaborar un Plan de Acción para el Clima y la Energía Sostenible (PACES) (Ayuntamiento de Zaragoza, 2023).

En 2018, el Gobierno de Zaragoza renovó la firma del Pacto Europeo de las Alcaldías para el Clima y la Energía, asumiendo los compromisos que ello conlleva. De esta forma la ciudad continúa con la trayectoria en materia de cambio climático iniciada en 2005. Como se puede observar en la Figura 2, se ha avanzado mediante la elaboración de diversas estrategias, planes y estudios relativos al medio ambiente y a la calidad del aire. En este contexto, el Plan de Adaptación al Cambio Climático de Zaragoza (PACCZ), prosigue con el trabajo iniciado en Zaragoza en cuestiones climáticas (Ayuntamiento de Zaragoza, 2023).

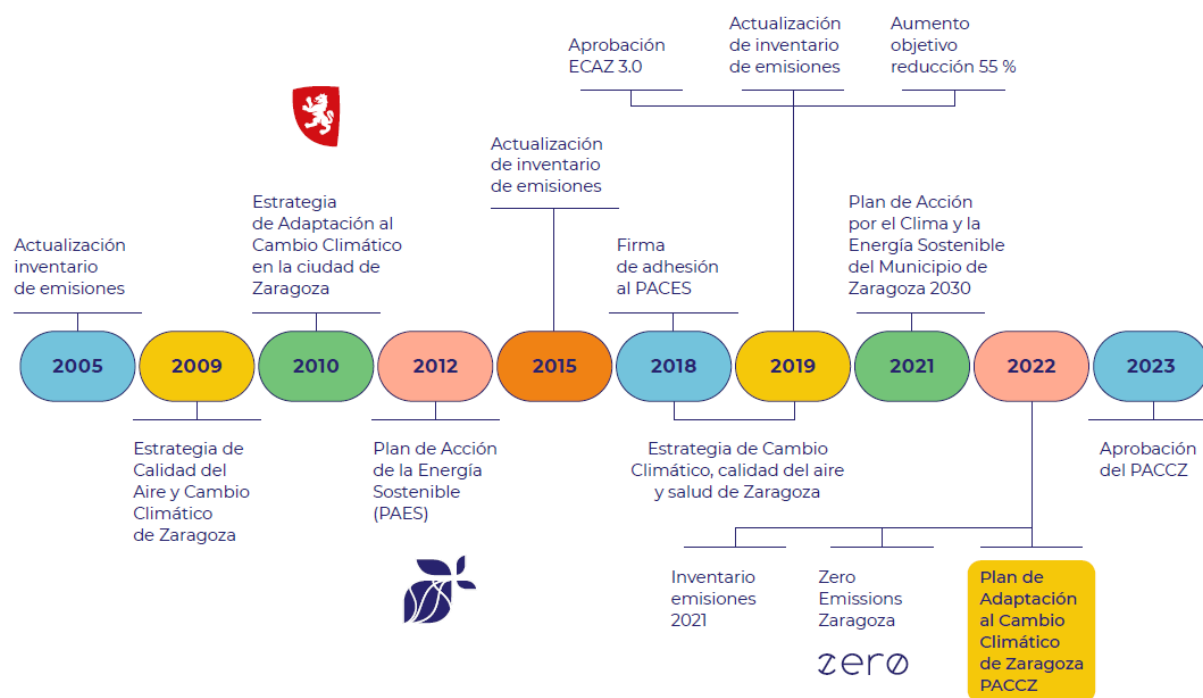


Figura 2. Evolución de iniciativas llevadas a cabo por el Ayuntamiento de Zaragoza. Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza (2023).

El PACCZ se compone de una visión de la ciudad a 2030, 5 objetivos estratégicos, 9 ámbitos de acción y 47 medidas para lograr que Zaragoza responda correctamente con el desafío climático. La visión de la ciudad para 2030 se sintetiza en el Resumen Ejecutivo del PACCZ de la siguiente manera:

“Zaragoza, ciudad inteligente y climáticamente neutra, resiliente y más adaptada a los impactos del cambio climático. Que fomenta una planificación urbana más sostenible con la inclusión de soluciones basadas en la naturaleza y se preocupa por la salud y el bienestar de su ciudadanía. Ciudad que convierte los impactos en oportunidades desarrollando una economía más sostenible basada en la innovación.” (Ayuntamiento de Zaragoza, 2023).

Para alcanzar esta visión a 2030, se han establecido en el PACCZ los siguientes objetivos estratégicos:

1. Diseñar una ciudad resiliente a los impactos debidos al cambio climático.
2. Mejorar la calidad de vida, el bienestar y la salud de la ciudadanía prestando especial atención a la población más vulnerable.
3. Integrar la adaptación al cambio climático en la planificación y gestión del municipio.
4. Posicionar la ciudad entre los líderes internacionales en materia de adaptación al cambio climático.
5. Desarrollar una economía sostenible y circular y fomentar la innovación que pueda hacer frente a los riesgos del cambio climático.

Para lograr estos objetivos estratégicos, se han definido en el PACCZ 9 ámbitos de acción, cada uno de los cuales incluye una serie de medidas. Los ámbitos de acción abarcan diversos aspectos, entre los que pueden destacarse la salud humana, la planificación urbana y energética, la gestión del agua, la infraestructura verde, la movilidad... Por último, las 47 medidas implican un cambio en el diseño y la gestión de la ciudad e involucran tanto a otras administraciones y entidades como a la sociedad civil.

A pesar de los esfuerzos que ha realizado el ayuntamiento para adaptar la ciudad al cambio climático, los planes desarrollados hasta ahora no han considerado la variabilidad espacial de la vulnerabilidad dentro de Zaragoza. Este trabajo aborda esta carencia al identificar las zonas más y menos vulnerables frente a las olas de calor, proporcionando una herramienta muy útil para mejorar la gestión de la ciudad. La espacialización de la vulnerabilidad ofrece una base para priorizar las intervenciones y los recursos en aquellas áreas más sensibles, con lo que se puede mejorar la eficacia de las estrategias de adaptación y, con ello, contribuir a una mayor calidad de vida, especialmente para la población más vulnerable.

3. Fuentes de información y metodología

En este capítulo se explica detalladamente el proceso metodológico que se ha llevado a cabo en este trabajo así como los datos que se han utilizado para ello. En primer lugar, se ha realizado una revisión bibliográfica de los índices de vulnerabilidad frente al calor existentes que ha permitido seleccionar el elaborado por Quesada *et al.* (2023), el cual se describe en profundidad. A continuación, se ha adaptado dicho índice de acuerdo con las variables disponibles en la ciudad de Zaragoza y se han calculado los indicadores establecidos para, finalmente, obtener el índice sintético planteado.

3.1. Revisión bibliográfica

Un enfoque frecuente para la caracterización de la vulnerabilidad y su posterior cartografía ha sido el desarrollo de índices de vulnerabilidad. El objetivo de estos índices consiste en localizar las zonas más vulnerables, de modo que puedan diseñarse estrategias específicas de mitigación y adaptación para reducir la probabilidad de que se produzcan efectos relacionados con un suceso, como muertes, enfermedades, pérdida de medios de subsistencia o daños a la propiedad y a las infraestructuras (Wolf *et al.*, 2013). Los índices de vulnerabilidad relacionados con determinados fenómenos ambientales, como las inundaciones o la sequía, han sido tradicionalmente el centro de atención de la comunidad científica, mientras que la vulnerabilidad frente al calor ha sido mucho menos estudiada.

No obstante, esta situación está cambiando, como pone de manifiesto el aumento gradual del número de estudios centrados en la comprensión de los factores climáticos y socioeconómicos que explican las variaciones intraurbanas de los impactos relacionados con el calor y el desarrollo de índices de vulnerabilidad frente al calor, aunque se han desarrollado principalmente en Norteamérica (Wolf *et al.*, 2013). Como consecuencia, en los últimos años han surgido una serie de estudios centrados en el desarrollo y la cartografía de los índices de vulnerabilidad frente al calor (Johnson *et al.*, 2009; Nayak *et al.*, 2018; Reid *et al.*, 2009; Tomlinson *et al.*, 2011; Uejio *et al.*, 2011; Wolf *et al.*, 2009).

Quesada *et al.* (2023) desarrollaron un índice de vulnerabilidad frente a olas de calor, aplicado en este caso al centro histórico de la ciudad de Bilbao. Dicho índice aplica una sólida metodología de evaluación de la vulnerabilidad, proporcionando información sobre los niveles de vulnerabilidad de los edificios y los espacios públicos. Según Quesada *et al.* (2023), la capacidad de la metodología para integrar diversas fuentes de datos y facilitar mediciones objetivas garantiza su

replicabilidad y aplicabilidad en otros contextos, por lo que ha sido utilizado para realizar el análisis de la vulnerabilidad frente a olas de calor en Zaragoza.

Este índice pondera la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación tanto de los edificios como de los espacios públicos que conforman el centro histórico de una ciudad. Para ello, se establecen una serie de criterios que se resuelven a partir de un conjunto de indicadores cada uno. Así, los indicadores consideran aspectos concretos y medibles mientras que los criterios definen aspectos más generales y cualitativos (Quesada, 2021).

Estos se valoran utilizando la metodología MIVES - una metodología de toma de decisiones multicriterio - e incorporando el concepto de función de valor. El método MIVES se utiliza para homogeneizar varios tipos de variables medidas con diversas unidades. Considera y compara relativamente variables cuantitativas y cualitativas transformándolas a una unidad comparable. Por lo tanto, proporciona un marco en el que los indicadores medioambientales, sociales, económicos y técnicos pueden compararse integrándolos en un único índice (Quesada *et al.*, 2023).

La evaluación de la vulnerabilidad incluye 11 indicadores para los edificios y 8 para los espacios públicos, que se evalúan mediante las funciones de valor ya que permiten obtener valores adimensionales de 0 a 1. En el caso de los edificios, se han dividido los indicadores en 5 criterios de vulnerabilidad y 2 de capacidad de adaptación (Figura 3). Para los espacios públicos se han establecido 3 criterios de vulnerabilidad y 2 de capacidad de adaptación (Figura 4).

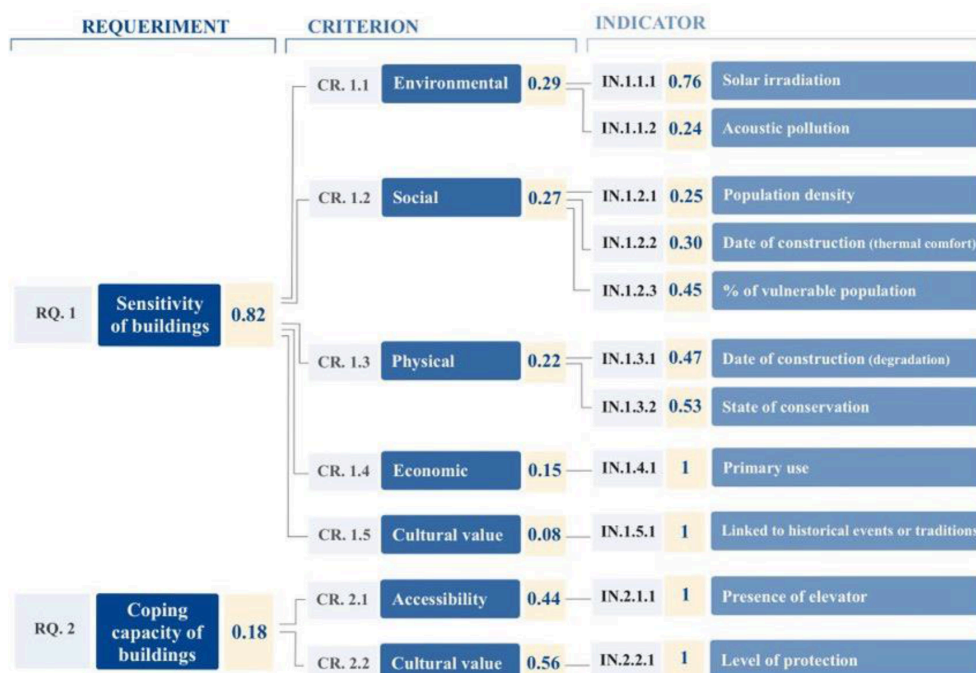


Figura 3. Árbol de decisión para los edificios con sus ponderaciones. Fuente: Quesada *et al.*, 2023

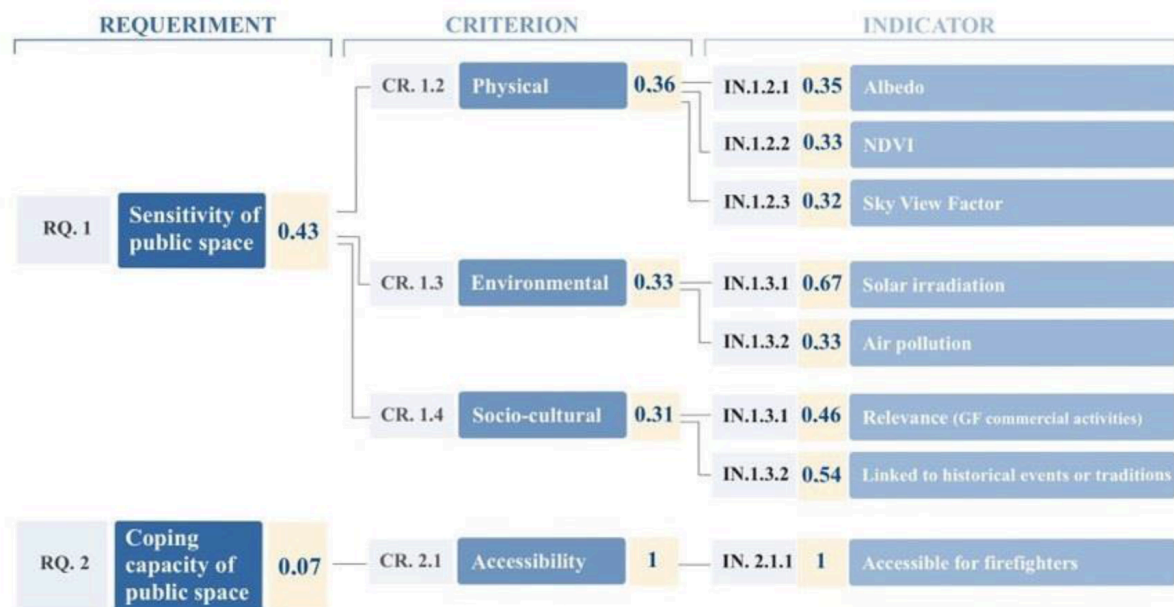


Figura 4. Árbol de decisión para los espacios públicos con sus pesos. Fuente: Quesada *et al.*, 2023

Un grupo de 20 expertos evaluó los criterios e indicadores así como sus funciones de valor. También establecieron ponderaciones para cada uno de los indicadores y se calculó su peso final como la media de sus respuestas. Dicho grupo de expertos estaba formado por profesionales de diversas disciplinas relevantes para el análisis (evaluación de riesgos, materiales, planificación urbana, geografía, resiliencia climática...), lo que permitió mejorar la precisión y solidez de la metodología de evaluación de la vulnerabilidad (Quesada *et al.*, 2023).

3.2. Adaptación del índice de Quesada *et al.* (2023) para la ciudad de Zaragoza

La disponibilidad de gran parte de los indicadores utilizados por Quesada *et al.* (2023) para Zaragoza ha facilitado significativamente la aplicación de este índice. No obstante, ha sido necesario realizar una adaptación en la que el primer paso ha consistido en establecer los indicadores a incluir en el índice. Se han realizado algunas modificaciones debido a que, en este caso, se ha aplicado el índice al conjunto de la ciudad de Zaragoza mientras que el original se utilizaba para el casco histórico de Bilbao. Todos los cambios realizados sobre el indicador original se hicieron de acuerdo con la autora para verificar que no había cambios en la filosofía general del índice. Así, la vulnerabilidad de los edificios se ha analizado en Zaragoza a través de cuatro criterios - ambiental, social, físico y económico - y se ha suprimido el cultural. La capacidad de adaptación de los edificios se ha estudiado mediante el criterio de accesibilidad y se ha eliminado el valor cultural. La decisión de suprimir ambos criterios se debe a que, a una escala de análisis que acoge todo el entramado

urbano de la ciudad, las variables culturales pierden peso con respecto a un análisis centrado únicamente en el casco histórico.

En cuanto a los indicadores, se han modificado algunos de ellos en los criterios social, físico y de accesibilidad, en función de los datos disponibles. La densidad de población se ha sustituido por la superficie media de uso residencial por persona y vivienda ya que ambos permiten medir el espacio disponible para las personas. Además, el confort térmico se mide en el caso de Bilbao a partir del año de construcción debido a la calidad del aislamiento del edificio, y en el caso de Zaragoza a partir del nivel de renta, ya que a mayor renta, mayor disponibilidad de medios para enfriar la vivienda. Asimismo, el porcentaje de población vulnerable (mayores de 65 años) se ha sustituido por el total de personas en edad vulnerable frente a olas de calor, que son los mayores de 75 años y los menores de 5 años. En cuanto al criterio físico, el estado de conservación se mide indirectamente a través del año de la última reforma del edificio y, finalmente, en el criterio de accesibilidad, en lugar de tratarse de un indicador binario en el que el edificio cuenta o no con ascensor, se contabilizan las personas que viven en una segunda planta o superior y que no disponen de ascensor.

Dado que se han eliminado dos criterios del análisis de los edificios, la ponderación del cultural se ha repartido proporcionalmente entre los otros 4 criterios que analizan la vulnerabilidad y, en el caso del valor cultural, el total del peso se ha ponderado para la accesibilidad. La Tabla 1 sintetiza los cambios que se han realizado con respecto a los edificios para adaptar el índice.

	CRITERIOS BILBAO	INDICADORES BILBAO
VULNERABILIDAD (0,82)	AMBIENTAL (0,29)	Radiación (0,76)
		Contaminación acústica (0,24)
	SOCIAL (0,27)	Densidad de población (0,25)
		Año de construcción (confort térmico) (0,30)
		Porcentaje de población vulnerable (mayores de 65 años) (0,45)
	FÍSICA (0,22)	Año de construcción (degradación) (0,47)
		Estado de conservación (0,53)
	ECONÓMICA (0,15)	Uso dominante (1)
CULTURAL (0,08)	Ligado a eventos históricos (1)	
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN (0,18)	ACCESIBILIDAD (0,44)	Presencia de ascensor (0,44)
	VALOR CULTURAL (0,56)	Nivel de protección (0,56)

	CRITERIOS ZARAGOZA	INDICADORES ZARAGOZA
VULNERABILIDAD (0,82)	AMBIENTAL (0,31)	Radiación (0,76)
		Contaminación acústica (0,24)
	SOCIAL (0,29)	Superficie media de uso residencial por persona y vivienda (0,25)
		Renta media por unidad de consumo y hogar (0,30)
		Número de personas mayores de 75 años y menores de 5 años (0,45)
	FÍSICA (0,24)	Año de construcción (0,47)
		Año de última reforma (0,53)
ECONÓMICA (0,16)	Uso dominante de la superficie construida en planta (1)	
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN (0,18)	ACCESIBILIDAD (1)	Personas empadronadas sin ascensor en una segunda planta o superior en el edificio (1)

Tabla 1. Criterios e indicadores aplicados al análisis de los edificios. Elaboración propia.

También se han realizado las modificaciones oportunas con respecto al análisis del espacio público (Tabla 2). De los tres criterios aplicados al estudio de la vulnerabilidad, se ha suprimido el socio-cultural debido a su escasa importancia para el conjunto de la ciudad de Zaragoza. Los indicadores de los criterios ambiental y físico se han mantenido, con el matiz de que como contaminación atmosférica únicamente se ha contemplado la contaminación por ozono (O₃). En cuanto a la capacidad de adaptación, se ha modificado el indicador debido a la disponibilidad de datos y se ha medido la accesibilidad a través de la superficie construida en planta.

	CRITERIOS BILBAO	INDICADORES BILBAO
VULNERABILIDAD (0,86)	AMBIENTAL (0,33)	Radiación (0,67)
		Contaminación atmosférica (0,33)
	FÍSICA (0,36)	Albedo (0,35)
		NDVI (0,33)
		SVF (0,32)
	SOCIO-CULTURAL (0,31)	Relevancia (0,46)
		Ligado a eventos históricos (0,54)

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN (0,14)	ACCESIBILIDAD (1)	Accesible para bomberos (1)
	CRITERIOS ZARAGOZA	INDICADORES ZARAGOZA
VULNERABILIDAD (0,86)	AMBIENTAL (0,48)	Radiación (0,67)
		Contaminación atmosférica por ozono (0,33)
	FÍSICA (0,52)	Albedo (0,35)
		NDVI (0,33)
SVF (0,32)		
CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN (0,14)	ACCESIBILIDAD (1)	Superficie construida en planta en la celda (1)

Tabla 2. Criterios e indicadores aplicados al análisis del espacio público. Elaboración propia.

3.3. Criterios e indicadores de vulnerabilidad

Dado que el índice se compone de múltiples criterios e indicadores tanto para el análisis de la vulnerabilidad de los edificios como de los espacios públicos, a continuación se explica la importancia de cada uno de ellos.

3.3.1. Vulnerabilidad de los edificios

El nivel de vulnerabilidad de un edificio indica el grado en que este se ve afectado por una ola de calor, que será mayor o menor en función de sus características. Por ello, teniendo en cuenta las características de los edificios, se establecen cuatro criterios a evaluar: medioambiental, social, físico y económico.

La vulnerabilidad ambiental de un edificio hace referencia a las características de su entorno más próximo ya que afectan al comportamiento térmico del edificio y, por tanto, al confort térmico de la población que se encuentra en su interior. Los indicadores que miden la vulnerabilidad ambiental son la radiación solar, ya que afecta directamente a la temperatura del edificio, y la contaminación acústica, dado que reduce la disposición de los habitantes a abrir las ventanas y, por tanto, la capacidad de ventilar el interior del edificio durante las horas de menos calor (Núñez-Peiró *et al.*, 2021).

La vulnerabilidad social tiene en cuenta las características de los habitantes que residen en él y que los hacen más sensibles a los impactos de las olas de calor. Se han definido tres indicadores: la superficie media de uso residencial por persona y vivienda, ya que una menor superficie disponible para cada habitante supone una mayor concentración del calor generado por las propias personas

que habitan en la vivienda y las actividades que llevan a cabo en ella (Quesada, 2021); la renta media por unidad de consumo y hogar, dado que condiciona el gasto que se podrá realizar en sistemas de enfriamiento de la vivienda; y población vulnerable, referida a los mayores de 75 años y los menores de 5 años. Múltiples estudios señalan el envejecimiento, especialmente a partir de los 75 años, como factor de salud determinante que contribuye a la vulnerabilidad frente a los efectos del calor (Koppe *et al.*, 2004; Wolf *et al.*, 2010), presentando además un exceso de mortalidad durante las olas de calor de más del 30% (Kovats *et al.*, 2006). Por otro lado, también se ha estudiado que, debido a sus características fisiológicas, metabólicas y de comportamiento, los niños son más sensibles al calor que los adultos, de forma que los menores de un año corren un riesgo muy alto de mortalidad relacionada con el calor y un riesgo alto los menores de 5 años (Xu *et al.*, 2012).

La vulnerabilidad física considera el nivel de degradación del edificio y se mide mediante su año de construcción y de última reforma. Ambos indicadores proporcionan información sobre los materiales de construcción, que pueden ser más o menos sensibles a la degradación por temperaturas y humedades, así como a la calidad del aislamiento del edificio (Quesada, 2021).

La vulnerabilidad económica se refiere al tipo de actividad económica que se lleva a cabo en el edificio. En este caso, se ha definido un único indicador: uso dominante de la superficie construida en planta, lo que permite evaluar la importancia del servicio que presta el edificio y, por consiguiente, la perturbación que implicaría una reducción del confort térmico. Se ha aplicado una modificación de los pesos establecidos por Quesada (2021), tal y como se muestra en la Tabla 3, teniendo en cuenta que el valor máximo se otorga al uso considerado más crítico y, por tanto, más vulnerable.

PONDERACIONES APLICADAS EN EL CASO DE BILBAO (Quesada, 2021)		PONDERACIONES APLICADAS EN EL CASO DE ZARAGOZA	
Uso residencial	0,82	Uso residencial	0,82
Uso industrial	0,48	Uso industrial	0,48
Uso público (social/cultural)	0,84	Servicios públicos y comercios	0,84
Uso turístico	0,43	Oficinas	0,50

Tabla 3. Ponderaciones aplicadas a los usos de los edificios. Elaboración propia.

La capacidad de adaptación de los edificios indica su capacidad para asumir el potencial impacto de un fenómeno extremo, una ola de calor en este caso, en un periodo muy corto de tiempo. Se compone en este caso de un solo criterio, la accesibilidad, que se obtiene mediante el

número de personas sin ascensor en una segunda planta o superior. Se trata de un indicador de gran relevancia ya que la falta de ascensor supone una barrera arquitectónica dado que, en situaciones de olas de calor, aumenta el esfuerzo físico requerido para salir a la calle y, por consiguiente, incrementa el aislamiento social de las personas que habitan en estas viviendas (Díez *et al.*, 2014).

3.3.2. Vulnerabilidad del espacio público

El nivel de vulnerabilidad de los espacios públicos, como las plazas y las calles, se encuentra condicionado por sus características ambientales y físicas. Dichas características afectan al confort térmico y, por consiguiente, al uso que la población hace del espacio público. Por tanto, ambas características se han establecido como criterios a evaluar.

La vulnerabilidad ambiental del espacio público contempla como indicadores la radiación solar y la contaminación atmosférica por ozono. Por un lado, cuántas más horas de radiación solar directa reciba un espacio y mayor sea su intensidad, menor será el confort térmico de la población al transitarlo. Por otro lado, un aumento de los niveles de ozono en condiciones como altas temperaturas, radiaciones solares intensas y largas horas de sol, todas ellas características meteorológicas específicas vinculadas a las olas de calor (Pyrgou *et al.*, 2018), dan lugar a que los altos niveles de ozono resulten más peligrosos para la salud humana (Stedman, 2004).

El criterio de vulnerabilidad física se compone de tres indicadores que responden a las principales características físicas del espacio: albedo, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y Sky View Factor (SVF). El albedo es la fracción de la radiación incidente que refleja una superficie, con valores de 0 a 1 para la reflexión más baja y más alta, respectivamente (Andrés-Anaya *et al.*, 2021). El NDVI es un indicador utilizado para analizar mediciones de teledetección, en este caso a partir de imágenes de satélite de Landsat 8, que evalúa la presencia y la densidad de la vegetación en una zona. Por último, el SVF es un parámetro que indica la proporción de un espacio urbano relacionada con el almacenamiento de calor (Dirksen *et al.*, 2019).

Para analizar la capacidad de adaptación del espacio público se aplica el criterio de accesibilidad con el objetivo de medir la capacidad de respuesta en caso de una emergencia provocada por las condiciones de una ola de calor. Se ha utilizado el indicador de superficie construida en planta ya que permite saber si el espacio es accesible para los vehículos como las ambulancias en caso de necesidad de evacuar a una persona víctima de un golpe de calor o de problemas de salud similares causados por las condiciones de ola de calor (Rasilla *et al.*, 2003).

3.4. Datos empleados y cálculo de los indicadores

Para obtener los 16 indicadores - 10 para los edificios y 6 para los espacios públicos - se han utilizado datos procedentes de diferentes fuentes. A continuación se explica qué datos se han empleado y la fuente de información de la que provienen, dividiéndolos según los 5 criterios establecidos previamente.

Los datos utilizados en el criterio ambiental, tanto en el caso de los edificios como en el del espacio público, proceden de diferentes fuentes. La información relativa a la contaminación acústica se ha obtenido del Mapa del Ruido de viales urbanos de Zaragoza, de la API del Ayuntamiento de Zaragoza (2016). Se ha descargado la información relativa a la media diaria en formato vectorial y posteriormente se ha rasterizado en píxeles de 100x100 metros. La información de contaminación atmosférica por ozono se ha obtenido del Informe de Situación de la Calidad del aire en la ciudad de Zaragoza en el año 2022 (Ayuntamiento de Zaragoza, 2023). Dicho informe proporciona los datos de máximo promedio horario anual de las ocho estaciones remotas presentes en Zaragoza, cuyos valores se han interpolado mediante el método kriging, que realiza una predicción muy válida de la variación espacial de los datos (Borrough *et al.*, 1998), obteniendo un raster de 100x100 metros. Por otro lado, la radiación se ha calculado en ArcGIS Pro a partir de un Modelo Digital de Superficie (MDS) descargado del CNIG. Para ello, se ha empleado el MDS más reciente disponible, tratándose de 6 archivos tif de 2016 con una resolución de píxel de 2x2 metros. Con los 6 archivos se ha construido un mosaico y se ha recortado para la zona de estudio, de forma que la radiación solar incidente de cada celda se ha calculado directamente sobre este área. Finalmente, se ha ajustado la resolución para que coincida con el resto de información de forma que se han remuestreado los píxeles a un tamaño de 100x100 metros.

Los datos utilizados en el criterio ambiental y el económico de los edificios proceden del catastro municipal, del padrón municipal y del Atlas de Distribución de Renta de los Hogares elaborado por el INE. Todos ellos han sido facilitados por el Grupo de Estudios de Ordenación del Territorio (GEOT) en una malla vectorial de 100x100 metros que se ha rasterizado en el software ArcGIS Pro. Cabe destacar que la población vulnerable ha sido calculada como la suma de las personas mayores de 75 años y las menores de 5 años.

Por otro lado, los datos utilizados para obtener las variables físicas de los edificios provienen del catastro municipal aunque han sido igualmente proporcionados por el GEOT en la misma malla vectorial de 100x100 metros que también se ha transformado en formato raster. Los indicadores físicos relativos al espacio público han sido calculados de diferentes maneras. En primer lugar, se ha

empleado el mosaico del MDS para la zona de estudio elaborado previamente para calcular el SVF en el software SAGA Gis. A continuación, se ha utilizado Google Earth Engine para calcular el NDVI y el albedo mediante imágenes tomadas por el satélite Landsat 8 en el área de estudio durante el año 2022. Se han empleado todas las imágenes tomadas desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre y se les ha aplicado una máscara de nubes y de sombras de nubes. Para calcular el NDVI, se han utilizado las bandas 4 y 5, correspondientes al rojo y al infrarrojo próximo respectivamente, y se ha obtenido el promedio del índice de todas las imágenes para cada uno de los píxeles. Para calcular el albedo, se ha procedido de la misma manera: se ha calculado el parámetro para aquellos píxeles sin nubes mediante la aplicación de una máscara y se ha obtenido el promedio de todas las imágenes del periodo de tiempo establecido. La ponderación de las bandas empleada se corresponde con la aplicada por Carmona. F. *et al.* (2019):

$$a_{sup} = (0,356 b_2 + 0,130 b_4 + 0,373 b_5 + 0,085 b_6 + 0,02 b_7 - 0,018)$$

Finalmente, los datos empleados en el criterio de accesibilidad, tanto de los edificios como de los espacios públicos, proceden del catastro y del padrón municipal y han sido igualmente facilitados por el GEOT en la misma malla vectorial, también rasterizada en píxeles de 100x100 metros. La Tabla 4 muestra una síntesis de los datos que se han utilizado y la fuente de información de la que proceden.

CRITERIOS	DATOS	VARIABLES CALCULADAS	FUENTES DE INFORMACIÓN
Ambiental	Modelo Digital de Superficie (MDS)	Radiación	CNIG (2016)
	Contaminación acústica	-	Ayuntamiento de Zaragoza (2016)
	Contaminación por ozono	-	Ayuntamiento de Zaragoza (2022)
Físico	Año de construcción de los edificios	-	Catastro (2022), proporcionado por GEOT
	Año de última reforma de los edificios	-	Catastro (2022), proporcionado por GEOT
	Imágenes de Landsat 8	Albedo	Google Earth Engine (2022)
	Imágenes de Landsat 8	Índice de Vegetación	Google Earth Engine

		de Diferencia Normalizada (NDVI)	(2022)
	Modelo Digital de Superficie (MDS)	Sky View Factor (SVF)	CNIG (2016)
Socioeconómico	Superficie media de uso residencial por persona y vivienda	-	Catastro (2022), proporcionado por GEOT
	Renta media por unidad de consumo y hogar	-	Atlas de Distribución de Renta de los Hogares del INE (2020), proporcionado por GEOT
	Número de menores de 5 años	Población vulnerable	Padrón municipal (2022), proporcionado por GEOT
	Número de personas de 75 años y más		
	Uso dominante de la superficie construida en planta	-	Catastro, proporcionado por GEOT
Accesibilidad	Personas empadronadas sin ascensor en una segunda planta o superior en el edificio	-	Catastro y padrón municipal (2022), proporcionado por GEOT
	Superficie construida en planta en la celda (m ²)	-	Catastro (2022), proporcionado por GEOT

Tabla 4. Síntesis de las variables incorporadas en el índice de vulnerabilidad. Elaboración propia.

3.5. Cálculo del índice sintético de vulnerabilidad frente a olas de calor

Las variables se han obtenido inicialmente para un área de estudio muy amplia, que coincide con el límite de la red de sensores termohigrométricos instalados por el Grupo de Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, en colaboración con el Servicio de Medioambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza. No obstante, dado que el análisis de los edificios sólo tiene sentido en aquellos píxeles que se sitúan sobre áreas construidas y el de los espacios públicos sobre su entorno más cercano, posteriormente se ha reducido el área de estudio a la zona urbanizada de la ciudad. A

continuación, se ha creado una máscara que contiene todos los píxeles de edificios y se ha aplicado a los indicadores oportunos. La superficie que queda entre el área de estudio deseada y los píxeles de edificios se corresponde con los espacios públicos. Se ha aplicado a los indicadores de los espacios públicos la siguiente expresión para obtener únicamente los píxeles deseados:

$$raster_indicador_EP_recortado = Con(IsNull("mascara_edificios"), "raster_indicador_EP")$$

Una vez calculadas y adecuadamente delimitadas todas las variables, se han normalizado en ArcGIS Pro para poder compararlas e integrarlas en el índice final, lo que simplifica el proceso de creación de funciones de valor para los nuevos indicadores integrados en el índice de Zaragoza. Para ello se ha utilizado el método MinMax, que distribuye todos los valores en una escala de 0 a 1, de forma que se obtienen igualmente variables adimensionales mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$MinMax = \frac{valor - valor.mínimo}{valor.máximo - valor.mínimo}$$

Finalmente, se han aplicado en el mismo software SIG las ponderaciones establecidas previamente a cada indicador, teniendo en cuenta que en el resultado final del índice, los valores más altos mostrarán zonas más vulnerables y los más bajos zonas menos vulnerables. Por ello, los indicadores correspondientes con características desfavorables ponderan de forma positiva y los indicadores correspondientes con características favorables de cara a una ola de calor ponderan negativamente. Las Figuras 5 y 6 muestran los criterios e indicadores utilizados para el cálculo del índice así como la ponderación de cada uno de ellos. En las cartografías resultantes se han reclasificado los datos en cinco categorías de vulnerabilidad mediante el método de cuantiles, que divide el conjunto de los datos en intervalos iguales de forma que cada uno contiene el 20% de los valores.

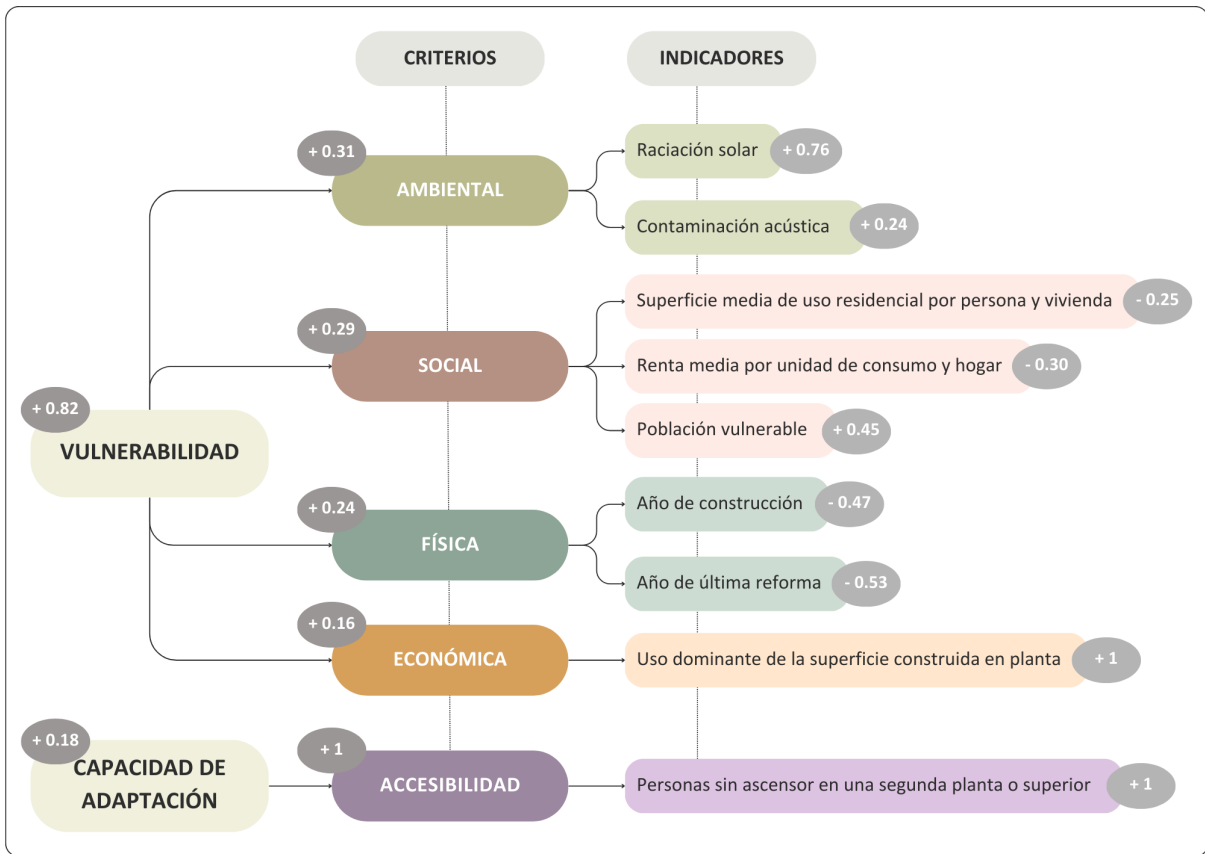


Figura 5. Árbol de los indicadores de los edificios utilizados para el cálculo del índice. Elaboración propia.

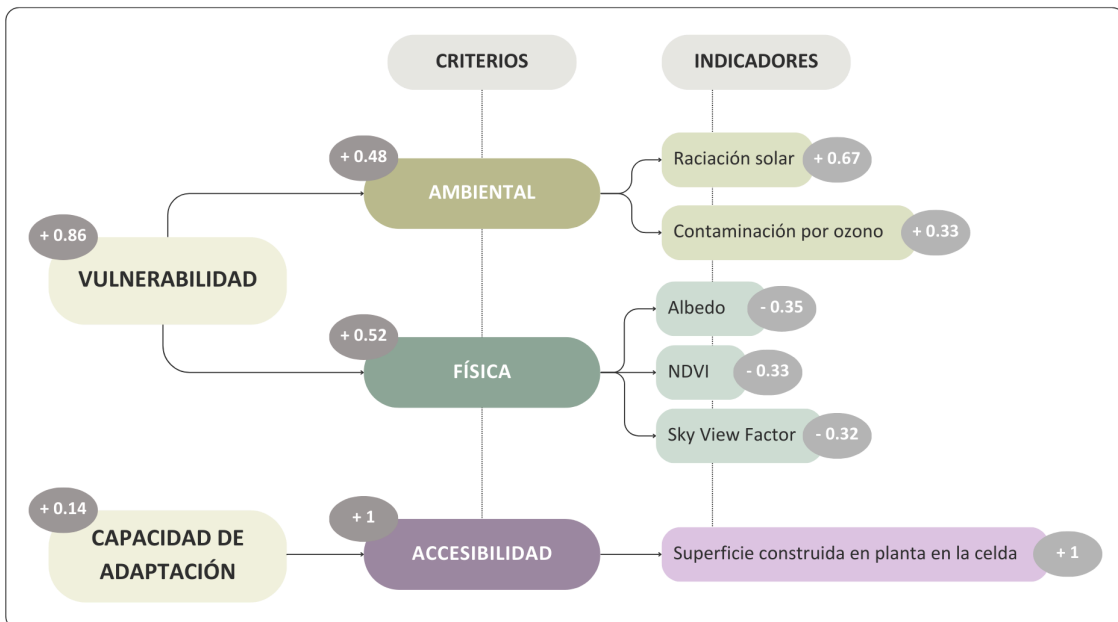


Figura 6. Árbol de los indicadores del espacio público utilizados para el cálculo del índice. Elaboración propia.

4. Resultados

En este capítulo se exponen los mapas intermedios y finales obtenidos de la aplicación del índice sintético. Se muestra primeramente la distribución de cada criterio establecido y, después, la distribución del índice de vulnerabilidad, tanto en el caso de los edificios como en el de los espacios públicos.

La Figura 7 muestra los mapas de los cinco criterios aplicados a los edificios. Por un lado, mientras que la vulnerabilidad ambiental de los edificios apenas presenta diferencias entre unos sectores y otros de la ciudad, el criterio de vulnerabilidad social es claramente determinante, pues los valores más críticos se localizan en los barrios de Delicias, San José, Las Fuentes, Torrero y los sectores previamente mencionados de la Almozara y El Rabal.

Por otro lado, la vulnerabilidad física se acentúa desde el casco histórico hacia las afueras, mostrando así el proceso de urbanización que se ha llevado a cabo en Zaragoza e incrementando la vulnerabilidad de la zona más antigua de la ciudad. Asimismo, es en el centro histórico donde se concentran los valores más críticos de vulnerabilidad económica, debido a la presencia mayoritaria de servicios públicos y actividad comercial.

Finalmente, el criterio de accesibilidad valorado en la capacidad de adaptación de los edificios refuerza la distribución obtenida en el análisis de vulnerabilidad social, ya que aquellos edificios con más personas habitando en viviendas sin ascensor coinciden con los edificios de menor renta de la ciudad, en los que viven más personas mayores de 75 años y que habitan en hogares más pequeños.

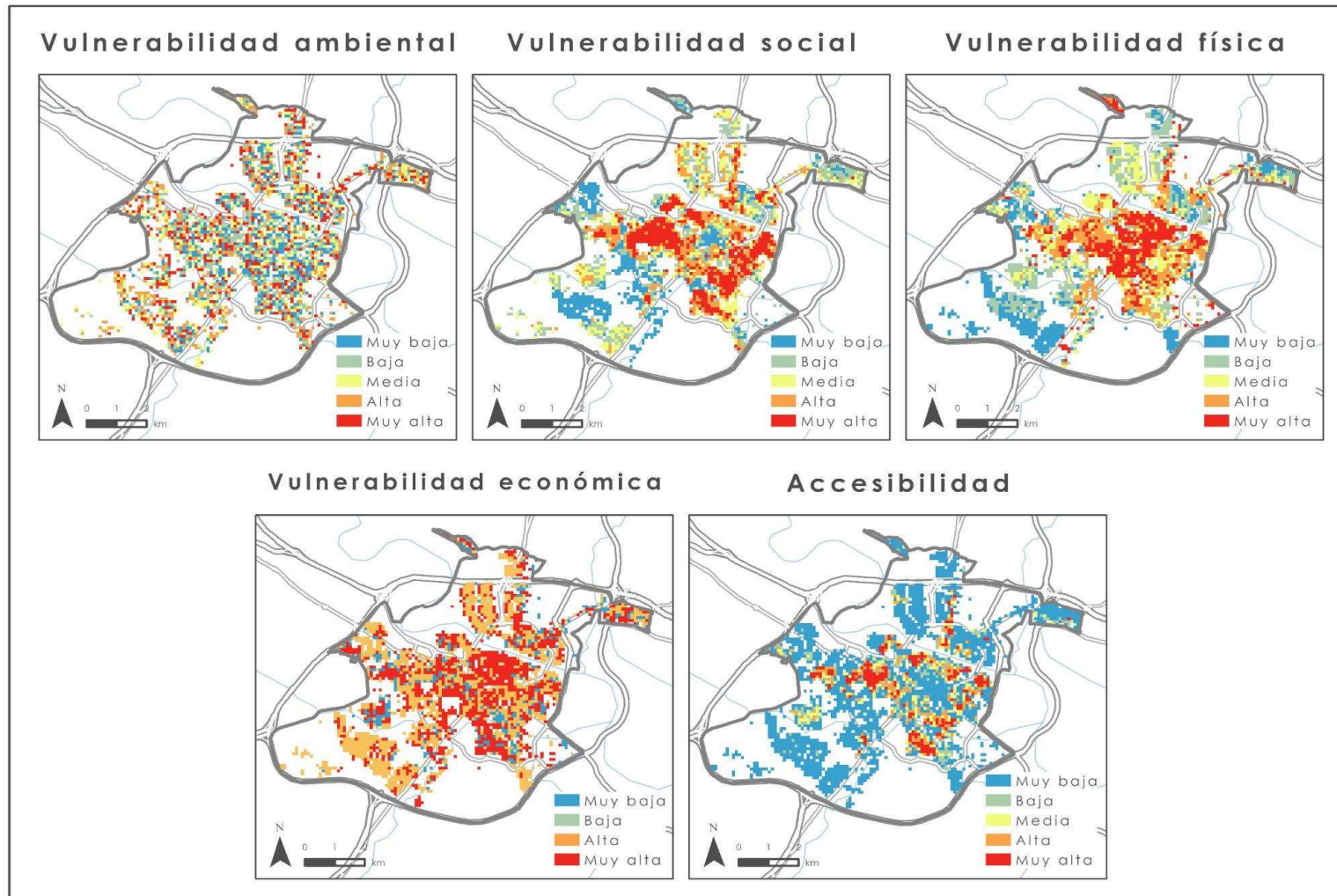


Figura 7. Mapas de los 5 criterios aplicados a los edificios. Elaboración propia.

La Figura 8 muestra el mapa resultante de aplicar el índice sintético, que engloba la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación, a los edificios de Zaragoza. Su distribución responde a los patrones espaciales obtenidos en los cinco criterios que se han analizado. Por consiguiente, los edificios más vulnerables se concentran en los barrios de Delicias, Casco Histórico, Oliver-Valdefierro, Las Fuentes, San José y Torrero, destacando el primero de ellos por agrupar la mayor cantidad de píxeles con edificios en los valores más altos de vulnerabilidad. En menor medida, también pueden encontrarse zonas vulnerables en el sector sureste de El Rabal y al oeste de la Almozara mientras que en el Actur, Juslibol, Universidad y Casablanca los resultados del índice de vulnerabilidad son muy favorables.

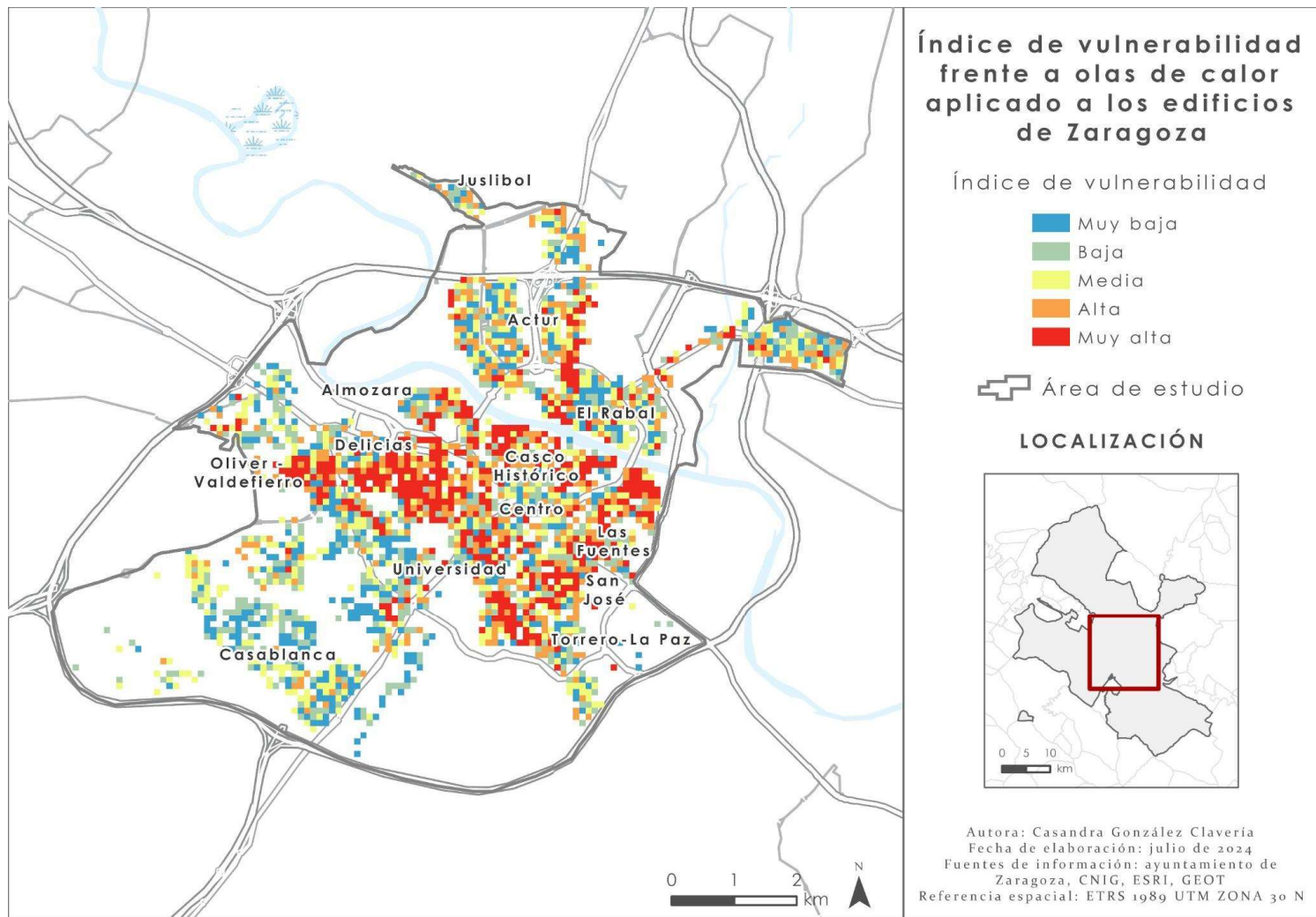


Figura 8. Mapa de vulnerabilidad de los edificios de Zaragoza frente a olas de calor. Elaboración propia.

La Tabla 5 muestra la cantidad de población que reside en cada una de las clases que se han obtenido en la cartografía. Se observa una distribución desigual de la población en función del nivel de vulnerabilidad al que se encuentran expuestos los habitantes. En las zonas de vulnerabilidad muy baja y baja residen en total unos 185.000 ciudadanos mientras que la mayor concentración de población se localiza en las zonas de mayor riesgo, con más de 275.000 habitantes viviendo en áreas de vulnerabilidad alta y muy alta.

NIVEL DE VULNERABILIDAD	POBLACIÓN
Muy baja	91.856
Baja	93.491
Media	106.793
Alta	109.266
Muy alta	168.729

Tabla 5. Población por nivel de vulnerabilidad. Elaboración propia.

La Figura 9 muestra los mapas de los tres criterios aplicados a los espacios públicos. Por un lado, la vulnerabilidad ambiental es más reducida en el entorno del Parque Grande, los Pinares de Venecia y el polígono de Cogullada, y muy superior en el resto de la ciudad mientras que la vulnerabilidad física actúa al revés, es mayor en el Parque Grande, los Pinares de Venecia, el polígono de Cogullada y la ribera del Ebro. Sin embargo, esto último se debe a que de los tres indicadores escogidos - NDVI, albedo y SVF - los dos primeros presentan valores muy bajos para las superficies de agua. No obstante no se trata de una zona realmente vulnerable ya que aquellos píxeles que coinciden únicamente con la vegetación de ribera presentan valores muy favorables. Finalmente, el criterio de accesibilidad resulta determinante ya que incrementa la vulnerabilidad de todas las superficies construidas, coincidiendo con espacios comerciales, industriales y de servicios públicos presentes en ambas márgenes del río Ebro (polígono de Cogullada, campus Río Ebro, estación Delicias, centro comercial Augusta y centro comercial Puerto Venecia).

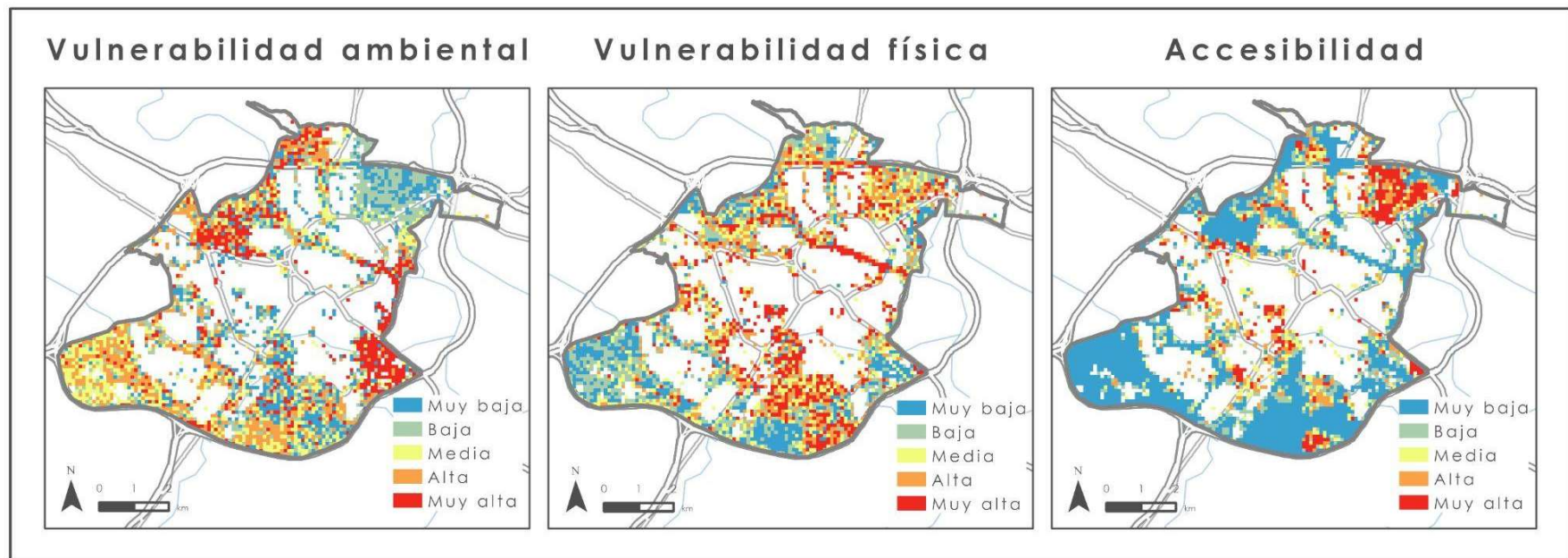


Figura 9. Mapas de los 3 criterios aplicados a los espacios públicos. Elaboración propia.

La Figura 10 muestra el mapa resultante de aplicar el índice sintético, que engloba la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación, a los espacios públicos de Zaragoza. En la mitad sur de la ciudad se localizan valores más bajos del índice y se corresponden con el barrio de Arcosur, el camino que discurre a lo largo del Canal Imperial, el Parque Grande y los Pinares de Venecia. En estos últimos puede observarse una combinación de zonas sin vulnerabilidad con áreas muy críticas debido a la presencia de algunas infraestructuras (como el Punto Limpio de Torrero, el Parque de Atracciones o el centro comercial Puerto Venecia). Asimismo, el entorno de San José también presenta valores muy elevados de vulnerabilidad, lo que se corresponde con una zona no construida pero con escasa vegetación.

Los espacios públicos de la mitad norte de la ciudad presentan valores mucho más críticos, particularmente en los espacios construidos (el polígono de Cogullada, el Campus Río Ebro, el Parking Sur Expo, la estación Delicias y el centro comercial Augusta). No obstante, esta zona también cuenta con áreas que disminuyen notablemente la vulnerabilidad, como el Parque del Agua y la ribera del Gállego, ya que presentan abundante vegetación.

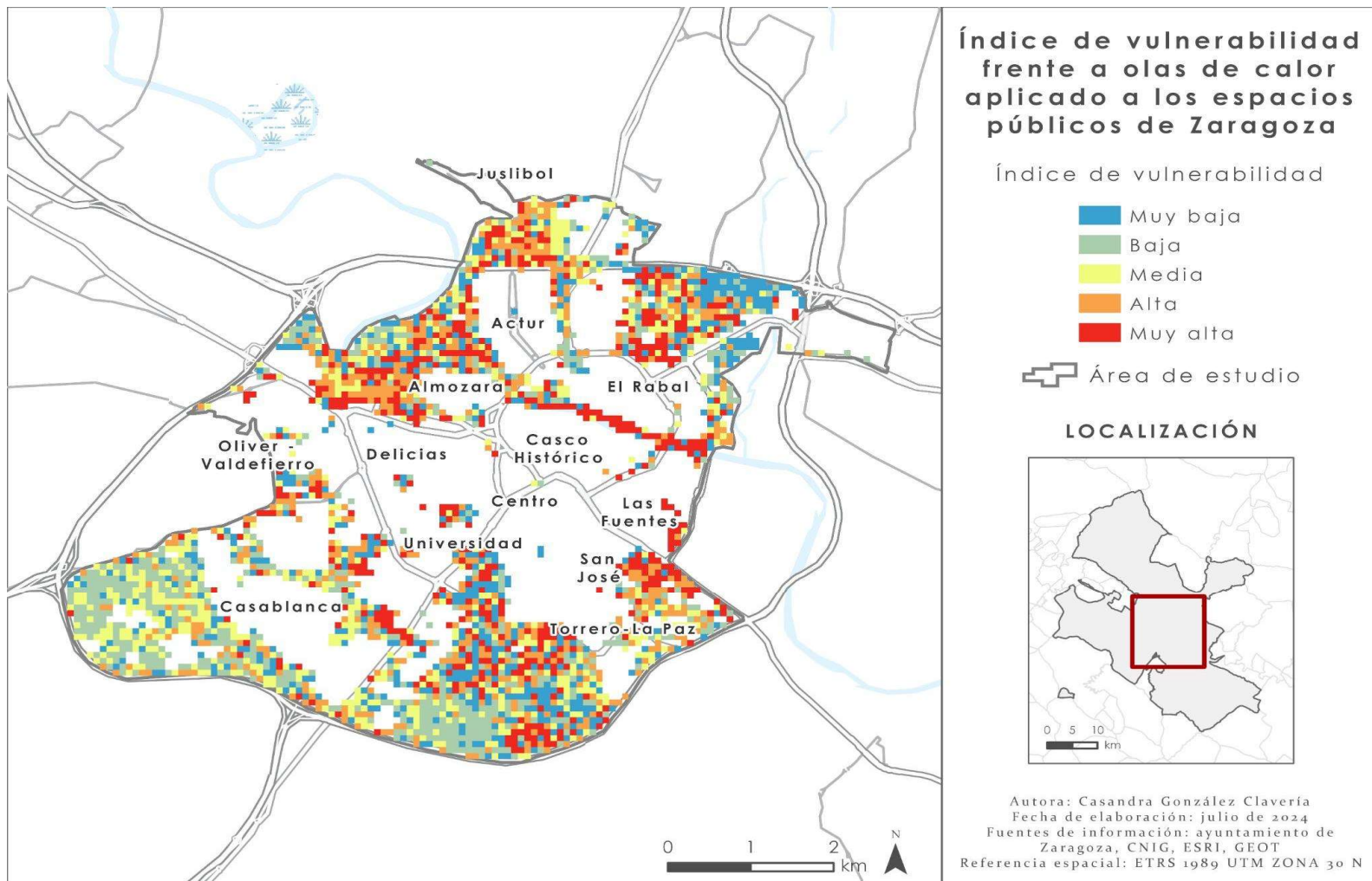


Figura 10. Mapa de vulnerabilidad de los espacios públicos de Zaragoza frente a olas de calor. Elaboración propia.

5. Discusión

La cartografía final combina la vulnerabilidad con la capacidad de adaptación, presentando valores diferentes para los edificios y los espacios públicos. Mientras que el 39,59 % de los píxeles correspondientes con edificios presenta una vulnerabilidad muy baja o baja, el 39,30 % revela una vulnerabilidad alta o muy alta, presentando la mayor cantidad de píxeles una vulnerabilidad media (504 píxeles). Los niveles más elevados de vulnerabilidad se concentran en las zonas más esperables de la ciudad de acuerdo con otros estudios. Según León-Casero (2018), el Mapa de Riesgo Social de Zaragoza (MRSZ) destaca como barrios más vulnerables las Delicias, San Pablo, Las Fuentes, Torrero y San José debido a su alta vulnerabilidad social (que contempla: envejecimiento, bajo nivel educativo, escasos equipamientos según la densidad de población, nivel de renta) y a una edificación más temprana, lo que coincide espacialmente con los sectores que presentan unos valores de vulnerabilidad más altos en el índice sintético aplicado en este trabajo.

En el caso de los espacios públicos, el 41,16 % de los píxeles presentan una vulnerabilidad muy baja o baja y el 38,88 % alta o muy alta, encontrando la mayor cantidad de píxeles en la clase “muy baja” (612 píxeles). Conviene señalar que más del 20% de los píxeles de la clase “muy alta” coinciden con la ribera del Ebro, por lo que en futuros trabajos con este índice debería aplicarse un tratamiento diferente a los indicadores físicos para contemplar la presencia de superficies de agua, lo cual podría hacerse a partir de la información de usos del suelo.

En próximos trabajos podría matizarse también la precisión de este índice considerando la temperatura de la ciudad. La variabilidad térmica dentro de Zaragoza, acentuada por el fenómeno de la ICU, implica que ciertos sectores experimentan temperaturas significativamente más altas que otros, especialmente durante las noches de verano (Barrao *et al.*, 2021). Esto incrementa los impactos negativos de las olas de calor sobre la población por lo que resultaría interesante integrar en el índice sintético la variabilidad de la temperatura de la ciudad. De acuerdo con Cuadrat *et al.* (2005), los valores máximos de la ICU se localizan en la margen derecha del río Ebro, en la zona centro y Las Fuentes, y disminuyen progresivamente hacia la periferia de la ciudad. Esto implica que dos de los sectores más vulnerables de la ciudad se encuentran más afectados por la ICU promedio que otras zonas que, según el índice sintético aplicado en este trabajo, presentan valores similares de vulnerabilidad. Asimismo, resultaría interesante incorporar la variabilidad de la temperatura de la ciudad durante episodios concretos de ola de calor, lo que podría realizarse a partir de la información que proporciona la red de sensores termohigrométricos de la Universidad de Zaragoza.

Por otro lado, las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático que ha llevado a cabo el ayuntamiento de Zaragoza hasta ahora no incorporan las diferencias espaciales de vulnerabilidad que existen en la ciudad, lo cual ha limitado la capacidad de las instituciones para desarrollar estrategias más precisas y efectivas que protejan a la población más expuesta durante episodios de calor extremo. Un ejemplo de ello son las siguientes medidas contempladas en el PAC CZ 2030:

- Mejorar las acciones preventivas, los sistemas de alerta e información, las redes sociales de cuidados y los proyectos actuales frente a los impactos en salud de las temperaturas extremas, sobre todo en personas y grupos sociales en situación de vulnerabilidad. Por ejemplo, personas mayores que viven solas.
- Diseñar, crear y mantener una red de refugios climáticos en diferentes equipamientos y espacios verdes de la ciudad que permitan a las personas resguardarse ante episodios climáticos extremos, como olas de calor y frío extremo, y que reduzcan el impacto negativo en la salud de las personas.
- Mejorar el confort térmico de los equipamientos urbanos, y de las actividades que realizan, de tal manera que sean flexibles y adaptables a las variaciones atípicas del clima local producidas por el cambio climático.
- Definir criterios de diseño adaptado al cambio climático del ambiente construido, especialmente del espacio público, así como promover buenas prácticas de adaptación durante la construcción y uso de espacios públicos, privados y comunitarios.

Estas medidas ponen de manifiesto que, si bien el ayuntamiento dedica esfuerzos para mitigar los impactos de los episodios de calor extremo, no contempla la variabilidad intraurbana de la vulnerabilidad. Esto limita la capacidad de la ciudad para avanzar en términos de desarrollo sostenible y para mejorar la calidad de vida de los habitantes.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un análisis detallado de la vulnerabilidad frente al calor en el entramado urbano de Zaragoza, abordando así una carencia significativa en el conocimiento de la ciudad para poder desarrollar una planificación urbana más eficiente. A pesar de la cantidad de estudios de clima urbano que se han realizado sobre Zaragoza y de los esfuerzos que el ayuntamiento ha llevado a cabo en materia de adaptación al cambio climático, las políticas actuales no han contemplado las diferencias de vulnerabilidad dentro de la ciudad, lo que resulta clave para mejorar la calidad de vida de los habitantes. Este trabajo ha tratado de cubrir esta necesidad mediante la aplicación de un índice sintético multicriterio que integra variables ambientales y socioeconómicas, ofreciendo una visión más completa y precisa de la realidad urbana de Zaragoza. Dicho índice ha permitido identificar las zonas más y menos vulnerables frente a los episodios de calor extremo, proporcionando una herramienta útil para la toma de decisiones y la priorización de intervenciones.

Para la aplicación del índice multicriterio, en primer lugar se han identificado y analizado las variables necesarias para evaluar la vulnerabilidad de los edificios y espacios públicos frente a las olas de calor, teniendo en cuenta otros índices existentes y su replicabilidad de acuerdo con la información disponible para la ciudad de Zaragoza. El cálculo del índice de vulnerabilidad en un entorno SIG ha facilitado la estructuración de los datos en un modelo que organiza y procesa la información procedente de diferentes fuentes. La metodología aplicada ha permitido comparar los datos entre sí e identificar con claridad las zonas más vulnerables de la ciudad.

Asimismo, el análisis de las diferencias entre las distintas áreas urbanas ha permitido conocer los factores que condicionan la vulnerabilidad en cada zona, corroborando ciertos patrones espaciales estudiados en trabajos previos. Las diferencias espaciales intraurbanas se han reflejado a través de la categorización de la vulnerabilidad en cinco niveles, lo que supone un enriquecimiento del conocimiento sobre la vulnerabilidad ante el cambio climático.

Para enfrentar eficazmente impactos del cambio climático tan relevantes para los espacios urbanos como las olas de calor, resulta crucial que las ciudades no solo elaboren planes de adaptación, sino que también incorporen la variabilidad espacial de la vulnerabilidad en su planificación. Este trabajo subraya la necesidad de priorizar las medidas de adaptación en las zonas de mayor riesgo. Identificar las áreas urbanas más sensibles a los eventos térmicos extremos permite una gestión más eficaz de los recursos y una mejor protección de la población más vulnerable, mejorando así el desarrollo sostenible, la resiliencia y calidad de vida urbana en un contexto de cambio global.

En conclusión, este trabajo ha identificado las áreas de mayor vulnerabilidad frente a las olas de calor en Zaragoza y ha puesto de manifiesto la necesidad de integrar su variabilidad espacial en las políticas de adaptación al cambio climático. Por tanto, proporciona una herramienta útil para la planificación y gestión urbana, contribuyendo a una posible elaboración de estrategias futuras que protejan a la población más expuesta, mejorando así la resiliencia de la ciudad frente a los futuros episodios térmicos extremos.

7. Bibliografía

Alcoforado, M. J., Lopes, A. y Andrade, H. (2015). "Urban Climatic maps in Portugal, Lisbon". En: Ng, E. y Ren, C. (Eds.). *The Urban Climatic Map – A Methodology for Sustainable Urban Planning*, pp. 209-236. ISBN: 978-13-157-1761-6

Andrés-Anaya, P., Sánchez-Aparicio, M., Pozo, S. y Lagüela, S. (2021). "Correlation of Land Surface Temperature with IR Albedo for the Analysis of Urban Heat Island". *Engineering Proceedings*, 8 (1), pp. 9. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/engproc2021008009> [última consulta: julio 2024]

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, pp. 1–26. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/joc.859> [última consulta: julio 2024]

Ascaso, A. (1969). "Contaminación y contaminadores atmosféricos. El problema en Zaragoza". *Las Ciencias*, 1, pp. 22-34.

Ayuntamiento de Zaragoza. (2017). *Mapa del Ruido de viales urbanos de Zaragoza*. Oficina de Transparencia y Gobierno Abierto. Zaragoza. Disponible en: <https://www.zaragoza.es/sede/portal/datos-abiertos/servicio/catalogo/1880> [última consulta: junio 2024]

Ayuntamiento de Zaragoza. (2023). Plan de Adaptación al Cambio Climático de Zaragoza 2030. Servicio de Medio Ambiente y Sostenibilidad. Disponible en: https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/adaptacion/PACCZ_2030_Documento.pdf [última consulta: agosto 2024]

Ayuntamiento de Zaragoza. (2023). Plan de Adaptación al Cambio Climático de Zaragoza 2030. Dossier informativo. Servicio de Medio Ambiente y Sostenibilidad. Disponible en: https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/adaptacion/PACCZ_dossier_abril2023.pdf [última consulta: agosto 2024]

Ayuntamiento de Zaragoza. (2023). Plan de Adaptación al Cambio Climático de Zaragoza 2030. Resumen ejecutivo. Servicio de Medio Ambiente y Sostenibilidad. Disponible en: https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/adaptacion/PACCZ_2030_Resumen_ejecutivo_070823.pdf [última consulta: agosto 2024]

Ayuntamiento de Zaragoza. (2023). Situación de la Calidad del aire en la ciudad de Zaragoza en el año 2022. Servicio de Medio Ambiente y Sostenibilidad. Disponible en:

<https://www.zaragoza.es/cont/paginas/catalogopublicaciones/doc/12282.pdf> [última consulta: julio 2024]

Barrao, S., Cuadrat, J. M., Saz, M. A., Serrano-Notivoli, R. y Tejedor, E. (2019). "Olas de calor y olas de frío en la ciudad de Zaragoza (España) y sus efectos sobre las enfermedades cardiorrespiratorias, 2011-2015". Crisis y espacios de oportunidad. Retos para la Geografía. Comunicaciones del XXVI Congreso de la Asociación Española de Geografía. Tomo II: El cambio global y la sostenibilidad, pp. 343-357.

Barrao, S., Serrano-Notivoli, R., Saz, M. A. y Cuadrat, J. M. (2021). "Análisis comparado de la temperatura de superficie y temperatura del aire de la isla de calor urbano de Zaragoza". Geografía, cambio global y sostenibilidad. Comunicaciones del XXVII Congreso de la Asociación Española de Geografía. Tomo I: Naturaleza, transformación territorial y paisaje, pp. 399-415.

Barrao, S., Serrano-Notivoli, R., Cuadrat, J. M., Tejedor, E. y Saz, M. A. (2022). "Characterization of the UHI in Zaragoza (Spain) using a quality-controlled hourly sensor-based urban climate network". *Urban Climate*, 44. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101207> [última consulta: junio 2024]

Borrough, P. A. y McDonnell R. A. (1998). "Principles of Geographical Information Systems". *Oxford University Press*, Oxford.

Calvo-Palacios, J. L. (1976). "Aportación metodológica al estudio geográfico del microclima urbano". *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, 42, pp. 95-110.

Carmona, F., Rivas, R., Faramiñán, A. M. G., Mancino, C., Bayala, M. y Pérez, W. (2019). "Estudio del proceso de evaporación en el Salar Tres Quebradas por medio de medidas *in situ* y datos de satélite". *Revista de Teledetección*, 54, pp. 1-14. Disponible en: <https://doi.org/10.4995/raet.2019.12264> [última consulta: junio 2024]

CMNUCC. (2015). "Paris Agreement". París.

Cuatrat, J. M., De la Riva, J., López, F. y Marti, A. (1993). "El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la "isla de calor"". *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 13, pp. 127-138.

Cuatrat, J. M., Vicente-Serrano, S. M. y 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 Asociación*

de *Geógrafos Españoles*, 40, pp. 311-327. Disponible en: <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/2019> [última consulta: julio 2024]

Cuadrat, J. M., Saz, M. A. y Vicente-Serrano, S. M. (2007). Atlas climático de Aragón. Gobierno de Aragón.

Cuadrat, J. M., Saz, M. A., Serrano-Notivoli, R. y Tejedor, E. (2014). "El clima del término municipal de Zaragoza en el contexto del cambio global". Ayuntamiento de Zaragoza. Agenda 21. Zaragoza.

Cuadrat, J. M., Vicente, S., Saz y M. A. (2015). "Influence of different factors on relative air humidity in Zaragoza, Spain". *Frontiers in Earth Science*, 3 (10). Disponible en: <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00010> [última consulta: julio 2024]

Cuadrat, J. M., Barrao, S., Serrano, R., Saz, M.A. y Tejedor, E. (2022). "Variabilidad temporal de la isla de calor urbana de la ciudad de Zaragoza (España)". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 48. Disponible en: <http://doi.org/10.18172/cig.5022> [última consulta: agosto 2024]

De La Riva, J., Cuadrat, J. M., López, F. y Martí, A. (1997). "Aplicación de las imágenes Landsat TM al estudio de la isla de calor térmica de Zaragoza". *Geographicalia*, 35, pp. 24-36. Disponible en: https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1997351701 [última consulta: julio 2024]

Díez, E., Dabana, F., Pasarína, M., Artazcoza, L., Fuertesa, C., López, M. J. y Calzada, N. (2014). "Evaluación de un programa comunitario para reducir el aislamiento de personas mayores debido a barreras arquitectónicas". *Gaceta Sanitaria*, 28(5), pp. 386-388. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2014.04.013> [última consulta: julio 2024]

Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E. y Pagani, G. A. (2019). "Sky View Factor Calculations and Its Application in Urban Heat Island Studies". *Urban Climate*, 30, 100498. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498> [última consulta: julio 2024]

Ebrópolis. (2019). *Estrategia Zaragoza +20*. Disponible en: <https://www.zaragoza.es/contenidos/agenda-urbana/Estrategia-Zaragoza20-Ebropolis-2019.pdf> [última consulta: junio 2024]

Escolano-Utrilla, S., López-Escolano, C. y Pueyo, A. (2021). "Movilidad residencial intraurbana de los españoles y extranjeros en Zaragoza (España): diferentes espacios, distintos procesos". *Investigaciones Geográficas*, 76, pp. 75-95. Disponible en: <https://doi.org/10.14198/INGEO.18397> [última consulta: junio 2024]

Heaviside, C., Macintyre, H. y Vardoulakis, S. (2017). "The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment". *Current Environmental Health Reports*, 4, pp. 296-305. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3> [última consulta: junio 2024]

Huang, K., Li, X., Liu, X. y Seto, K. (2019). "Projecting Global Urban Land Expansion and Heat Island Intensification through 2050". *Environmental Research Letters*, 14. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4b71> [última consulta: junio 2024]

IPCC. 2014a. "Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Reino Unido y Nueva York, NY, EEUU. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf [última consulta: julio 2024]

IPCC. (2023). "Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Longer Report". Interlaken, Suiza. Disponible en: https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf [última consulta: julio 2024]

Johnson, D. P. y Wilson, J. S. (2009). "The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: The case of heat-related deaths in Philadelphia". *Applied Geography*, 29(3), pp. 419-434. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.11.004> [última consulta: agosto 2024]

Koppe, C., Kovats, S., Jendritzky, G. y Menne, B. (2004). "Heat-waves: risks and responses". Health and Global Environmental Change. Series Nº 2. World Health Organization. Copenhagen.

Kovats, R. S., Johnson, H. y Griffith, C. (2006). "Mortality in southern England during the 2003 heat wave by place of death". *Health Statistics Quarterly*, 29, pp. 6-8. Disponible en: <https://europepmc.org/article/med/16523675> [última consulta: julio 2024]

Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Desplat, J., Salagnac, L. y Masson, V. (2013). "Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate". *Climatic Change*, 116, pp. 679-692. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0521-6> [última consulta: julio 2024]

León-Casero, J. (2018). "Mapa de Riesgo Social de Zaragoza: herramientas complementarias para medir el potencial regenerativo de zonas vulnerables". *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales*, 197, pp. 503-516. Disponible en: <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/76679/46995> [última consulta: agosto 2024]

Linares, C. y Díaz, J. (2008). "Impact of high temperatures on hospital admissions: comparative analysis with previous studies about mortality (Madrid)". *European Journal of Public Health*, 18(3), pp. 317-322. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckm108> [última consulta: julio 2024]

López-Martín, F. (2011). "Clima urbano y ciudad. El caso de Zaragoza". *Colegio de Geógrafos*, pp. 118. Zaragoza. ISBN: 978-84-615-2098-5

Martín-Vide, J., Artola, V. M., Cordobill, M. J. y Moreno, M. C. (2015). "La isla de calor en el Área Metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático". *Metrobs 2015*. Direcció de Serveis Ambientals de l'AMB. Àrea Metropolitana de Barcelona.

Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J. y Voogt, J. (2020). "Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, pp. 411–444. Disponible en: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623> [última consulta: julio 2024]

Meehl, G. y Tebaldi, C. (2004). "More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century." *Science*, 305, pp. 994-997. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.1098704> [última consulta: julio 2024]

Naciones Unidas. (2019). "World Urbanization Prospects. The 2018 Revision". Nueva York, EEUU. Disponible en: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf> [última consulta: julio 2024]

Nastran, M., Kobal, M. y Eler, K. (2019). "Urban heat islands in relation to green land use in European cities". *Urban Forestry and Urban Greening*, 37, pp. 33-41. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2018.01.008> [última consulta: julio 2024]

Nayak, S. G., Shrestha, S., Kinney, P. L., Ross, Z., Sheridan, S. C., Pantea, C. I., Hsu, W. H., Muscatiello, N. y Hwang, S. A. (2018). "Development of a heat vulnerability index for New York State". *Public Health*, 161, pp. 127-137. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.09.006> [última consulta: agosto 2024]

Núñez, M., Sánchez, C., Sanz-Fernández, A., Heredia, M., López-Bueno, J., Neila, J., Linares, C., Díaz, J., y Muñoz, G. (2021). "Exposure and Vulnerability Toward Summer Energy Poverty in the City of Madrid: A Gender Perspective". En: Bisello, A., Vettorato, D., Ludlow, D., Baranzelli, C. (Eds.). *Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions*, pp. 481–495. ISBN: 978-3-030-57331-7

Observatorio Municipal de Estadística (2023). *Cifras de Zaragoza*. Disponible en: <https://www.zaragoza.es/contenidos/estadistica/CifrasZaragoza2023.pdf> [última consulta: junio 2024]

Oke, T. R. (1973). "City size and the urban heat island". *Atmospheric Environment*, 7(8), pp. 769–779. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6) [última consulta: julio 2024]

Oke, T. (1982). "The energetic basis of the urban heat island". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), pp. 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502> [última consulta: julio 2024]

Oke, T. R. (1995). "The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects". En: Cermak, J. E., Davenport, A. G., Plate, E. J., Viegas, D. X. (Eds.). *Wind Climate in Cities*, pp. 81-107. ISBN: 978-94-017-3686-2

Olcina Cantos, J., Rico Amorós, A. M., Moltó Mantero, E., Tejedor, E., Cuadrat, J. M., Saz, M. A., Serrano-Notivoli, R., López, N. y Aladrén, M. (2016). "Islas de calor y confort térmico en Zaragoza durante la ola de calor de julio de 2015". *Asociación Española de Climatología*, pp. 141–151. Disponible en: <https://doi.org/10.14198/xcongresoaealicante2016-13> [última consulta: agosto 2024]

Peng, J., Jia, J., Liu, Y., Li, H. y Wu, J. (2018). "Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas". *Remote Sensing of Environment*, 215, pp. 255-267. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.06.010> [última consulta: julio 2024]

Pyrgou, A., Hadjinicolaou, P. y Santamouris, M. (2018). "Enhanced Near-Surface Ozone under Heatwave Conditions in a Mediterranean Island". *Scientific Reports*, 8 (1). Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-27590-z> [última consulta: julio 2024]

Quesada, L. (2021). "Heat waves risk assessment of historic urban areas: historic buildings and their urban environment". Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco. Bilbao.

Quesada, L., Garmendia, L., Álvarez, I. y Roji, E. (2023). "Vulnerability assessment and categorization against heat waves for the Bilbao historic area". *Sustainable Cities and Society*, 98. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104805> [última consulta: julio 2024]

Rasilla, D.F. y Fernández, P. (2003). “La ola de calor de 2003 en la CAPV: caracterización bioclimática e impactos sobre la mortalidad humana”. *Aemet*. Disponible en: https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/8526/1/AEC2010_RASILLA.pdf [última consulta: julio 2024]

Reid, C. E., O’Neill, M. S., Gronlund, C. J., Brines, S. J., Brown, D. G, Diez-Roux, A. V. y Schwartz, J. (2009). “Mapping community determinants of heat vulnerability”. *Environmental Health Perspectives*, 117, pp. 1730-1736. Disponible en: <https://doi.org/10.1289/ehp.0900683> [última consulta: agosto 2024]

Ridder, K. De., Maiheu, B., Lauwaet, D., Daglis, I., Keramitsoglou, I., Kourtidis, K., Manunta, P. y Paganini, M. (2016). “Urban Heat Island Intensification during Hot Spells - The Case of Paris during the Summer of 2003.” *Urban Science*, 1(1), pp. 3. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/urbansci1010003> [última consulta: julio 2024]

Royé, D., Codesido, R., Tobías, A. y Taracido, M. (2020). “Heat wave intensity and daily mortality in four of the largest cities of Spain”. *Environmental Research*, 182. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109027> [última consulta: julio 2024]

Santamouris, M. (2019). “Chapter 3 - Urban Heat Island and Local Climate Change.” En: Matthaios, B. T. (Eds.). *Minimizing Energy Consumption, Energy Poverty and Global and Local Climate Change in the Built Environment: Innovating to Zero*, pp. 65-102. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811417-9.00003-9> [última consulta: julio 2024]

Saz, M. A, Vicente, S. y Cuadrat, J. M. (2003). “Spatial patterns estimation of urban heat island of Zaragoza (Spain) using GIS”. 5th Int. Conf. Urban Clim. 4.

Saz, M. A., Barrao, S., Cuadrat, J. M., Virto, A., López-Marqués, N., De Luis, M., Campillos, M., Serrano-Notivoli, R. y Tejedor, E. (2021). “Informe del estudio del clima de la ciudad de Zaragoza, años 2020- 2021: efectos del cambio climático y mejora de la resiliencia”. Ayuntamiento de Zaragoza. Agenda Urbana. Zaragoza.

Saz, M. A., Barrao, S., Cuadrat, J. M., Virto, A., López-Marqués, N., De Luis, M., Campillos, M., Serrano-Notivoli, R. y Tejedor, E. (2022). “Excepcionalidad térmica del verano de 2022 en la ciudad de Zaragoza”. Ayuntamiento de Zaragoza. Agenda Urbana. Zaragoza.

Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A. y Appenzeller, C. (2004). “The Role of Increasing Temperature Variability in European Summer Heatwaves”. *Nature*, 427, pp. 332-336. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nature02300> [última consulta: julio 2024]

Stedman, J. R. (2004). "The Predicted Number of Air Pollution Related Deaths in the UK during the August 2003 Heatwave". *Atmospheric Environment*, 38 (8), pp. 1087-1090. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.11.011> [última consulta: julio 2024]

Stewart, I. (2011). "A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature". *International Journal of Climatology*, 31, pp. 200-217. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/joc.2141> [última consulta: julio 2024]

Tomlinson, C., Chapman, L., Thornes, J. y Baker, C. (2011). "Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: a case study for Birmingham, UK". *International Journal of Health Geographics*, 10, pp. 42. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/1476-072X-10-42> [última consulta: agosto 2024]

Uejio, C. K., Wilhelmi, O. V., Golden, J. S., Mills, D. M., Gulino, S. P. y Samenow, J.P. (2011). "Intra-urban societal vulnerability to extreme heat: the role of heat exposure and the built environment, socioeconomics, and neighborhood stability". *Health Place*, 17, pp. 498-507. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2010.12.005> [última consulta: agosto 2024]

Vicente, S. M., Cuadrat, J. M. y Saz, M. A. (2005). "Spatial patterns of the urban heat island in Zaragoza (Spain)". *Climate Research*, 30, pp. 61-69. Disponible en: <https://doi.org/10.3354/cr030061> [última consulta: julio 2024]

Wolf, T., McGregor, G. y Analitis, A. (2009). "Assessing vulnerability to heat stress in urban areas. The example of Greater London". *Epidemiology*, 20(6), pp. S24. Disponible en: <https://10.1097/01.ede.0000362249.11577.19> [última consulta: agosto 2024]

Wolf, J., Adger, W. N., Lorenzoni, I., Abrahamson, V. y Raine, R. (2010). "Social capital, individual responses to heat waves and climate change adaptation: An empirical study of two UK cities". *Global Environmental Change*, 20(1), pp. 44-52. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.09.004> [última consulta: julio 2024]

Wolf, T. y McGregor, G. (2013). "The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom". *Weather and Climate Extremes*, 1, pp. 59-68. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.07.004> [última consulta: agosto 2024]

Xu, Z., Etzel, R. A., Su, H., Huang, C., Guo, Y. y Tong, S. (2012). "Impact of ambient temperature on children's health: a systematic review". *Environmental Research*, 117, pp. 120-131. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.07.002> [última consulta: julio 2024]

Yue, W., Liu, X., Zhou, Y. y Liu, Y. (2019). "Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China mega-cities". *Science of The Total Environment*, 671, pp. 1036-1046. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.03.421> [última consulta: julio 2024]

Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J., Ebi, K., Bou-Zeid, E., Guan, K. y Liu, X. (2018). "Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves". *Environmental Research Letters*, 13(3). Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73> [última consulta: julio 2024]