

ENTREGABLE E.3.1.

INFORME DE IMPACTO DE RESILIENCIA SOBRE VARIABLES CLIMÁTICAS VINCULADO A ACCIÓN A.3.1. MONITORIZACIÓN DE IMPACTOS SOBRE VARIABLES CLIMÁTICAS

PROYECTO INTERREG POCTEP 027_ADAPT_CLIMA_CENCYL_3_E.

Este proyecto está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) en el marco del programa Interreg VI-A España-Portugal 2021-2027 (POCTEP)

Las opiniones vertidas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor que las emite. La Comisión Europea y las Autoridades del Programa no se hacen responsables del uso que pueda hacerse de la información contenida en el mismo.

1. **RESUMEN**
2. **INTRODUCCIÓN**
3. **OBJETIVO**
4. **SEGMENTACIÓN DE ÁREAS**
5. **PROCESADO DE DATOS GEOESPACIALES**
6. **CÁLCULO DE LA ISLA DE CALOR URBANA Y ZONAS VERDES**
 - 6.1. **EVALUACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA**
 - 6.1.1. TEMPERATURA EN SUPERFICIE
 - 6.1.2. COMPACIDAD URBANA
 - 6.1.3. ORIENTACIÓN DE LAS CALLES
 - 6.1.4. CALIDAD DEL AIRE
 - 6.1.5. VEGETACIÓN URBANA
 - 6.1.6. PROXIMIDAD A MASAS DE AGUA
 - 6.1.7. EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS MAPAS
 - 6.2. **ZONAS VERDES**
 - 6.2.1. DELIMITACIÓN DE ZONAS VERDES POR TIPOLOGÍA
 - 6.3. **ANÁLISIS DE REFUGIOS CLIMÁTICOS**
7. **MATRIZ DE RIESGOS CLIMÁTICOS**
 - 7.1. **METODOLOGÍA**
 - 7.1.1. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS
 - 7.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL LA PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE LOS PELÍGROS CLIMÁTICOS
 - 7.1.3. MATRIZ DE RIESGOS
 - 7.2. **RESULTADOS**
 - 7.2.1. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
 - 7.2.2. PROBABILIDADES ACTUALES Y FUTURAS DEBIDO AL INCREMENTO DE TEMPERATURAS
 - 7.2.3. MATRIZ DE RIESGOS
 - 7.3. **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
 - 7.3.1. CONCLUSIONES
 - 7.3.2. RECOMENDACIONES
8. **INDICADORES DE VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN CLIMÁTICA**
9. **CONCLUSIONES**
10. **RELACIÓN DE ENTREGABLES ASOCIADOS**

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Ubicación de los municipios y puntos de muestro
- Figura 2. Temperatura superficial (resolución 10m) para la ciudad de Valladolid en el día 22 de agosto de 2023
- Figura 3. Densidad edificatoria en la ciudad de Salamanca
- Figura 4. Orientación de las calles para la ciudad de Aveiro
- Figura 5. Concentración de PM10 para la ciudad de Salamanca en el año 2023
- Figura 6. Mapa de vegetación para la ciudad de Coimbra
- Figura 7. Mapa de distancia a los cursos de agua en la ciudad de Salamanca
- Figura 8. Valores normalizados para la temperatura en superficie en Ciudad Rodrigo
- Figura 9. Valores normalizados para la compacidad urbana en Salamanca
- Figura 10. Rosa de los vientos con direcciones predominantes para Valladolid (izquierda) y Salamanca (derecha)
- Figura 11. Rosa de los vientos con direcciones predominantes para Ciudad Rodrigo (izquierda) y Almeida (derecha)
- Figura 12. Rosa de los vientos con direcciones predominantes para Aveiro (izquierda) y Coimbra (derecha)
- Figura 13. Rosa de los vientos con direcciones predominantes para Guarda (izquierda) y Viseu (derecha)
- Figura 14. Valores normalizados para la dirección del viento en Salamanca
- Figura 15. Valores normalizados para la calidad del aire en Viseu
- Figura 16. Valores normalizados para la vegetación arbórea a partir de su fracción de cabida cubierta para Aveiro
- Figura 17. Valores normalizados según la distancia a masas de agua para Valladolid
- Figura 18. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Almeida
- Figura 19. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Aveiro
- Figura 20. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Ciudad Rodrigo
- Figura 21. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Coimbra
- Figura 22. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Guarda
- Figura 23. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Salamanca
- Figura 24. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Valladolid
- Figura 25. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Viseu
- Figura 26. Mapas de LAI (a), máscara de DLT (b), LAI con solo áreas arbolada (c) y FCC (d) para Ciudad Rodrigo
- Figura 27. Fracción de Cabida Cubierta para Ciudad Rodrigo
- Figura 28. Zonificación de las tipologías para las áreas verdes diferenciando entre arbolado, matorral y herbazal
- Figura 29. Mapas de refugios climáticos iniciales (a), refugios climáticos con áreas > 500 m² (b), y refugios climáticos con áreas >500 m² y FCC > 50% (c) para el municipio de Almeida
- Figura 30. Mapas de puntos representativos de los refugios climáticos (a), buffer de 1 km desde el punto central (b) y puntos de refugios climáticos incluidos en el buffer (c) para Almeida
- Figura 31. Gráficos de la distancia entre el punto central de Guarda y los refugios 1 (a) y 24 (b)
- Figura 32. Mapa de los refugios climáticos en Almeida
- Figura 33. Mapa de los refugios climáticos en Aveiro
- Figura 34. Mapa de los refugios climáticos en Ciudad Rodrigo
- Figura 35. Mapa de los refugios climáticos en Coimbra
- Figura 36. Mapa de los refugios climáticos en Guarda
- Figura 37. Mapa de los refugios climáticos en Salamanca
- Figura 38. Mapa de los refugios climáticos en Valladolid
- Figura 39. Mapa de los refugios climáticos referidos al punto central de Barrio Pajarillos en Valladolid
- Figura 40. Mapa de los refugios climáticos en Viseu
- Figura 41. Comparativa de la superficie arbolada afectada por incendios en los municipios y concejos analizados
- Figura 42. Cambios en la NPP por año, municipio y tipología de masa arbolada, parte 1
- Figura 43. Cambios en la NPP por año, municipio y tipología de masa arbolada, parte 2
- Figura 44. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Almeida
- Figura 45. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Aveiro

- Figura 46. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Ciudad Rodrigo
- Figura 47. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Coimbra
- Figura 48. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Guarda
- Figura 49. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Salamanca
- Figura 50. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Valladolid
- Figura 51. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Viseu
- Figura 52. Evolución de la temperatura media anual (TMA)
- Figura 53. Evolución de la temperatura en superficie para los tres días más cálidos del año
- Figura 54. Evolución de la temperatura media en superficie a partir de datos de los tres días más cálidos del año
- Figura 55. Evolución del número de olas de calor (NOC)
- Figura 56. Evolución de la precipitación media anual (PMA)
- Figura 57. Evolución de la evapotranspiración potencial media anual (ETP)
- Figura 58. Evolución de los días potenciales de precipitación torrencial (Precipitación media mayor 25 mm) (NEI)
- Figura 59. Evolución del número de sequías al año (NES)
- Figura 60. Evolución anual del número de incendios declarados (NIFD)
- Figura 61. Evolución anual del número de días con riesgo de incendio (NDRI)
- Figura 62. Evolución anual del número de episodios de contaminación al año (NEC) . Datos de Almeida, Guarda y Ciudad Rodrigo, fueron estimados a partir de los datos de las estaciones de Coimbra, Salamanca y Viseu
- Figura 63. Evolución anual del número de episodios de contaminación al año (NEC) (O3). Datos de Aveiro, Almeida, Guarda y Ciudad Rodrigo, estimados a partir de las estaciones de Coimbra, Salamanca y Viseu
- Figura 64. Evolución anual del número de días de calima (NDC)
- Figura 65. Evolución anual de la superficie verde en el entorno urbano (SVEU) a partir del índice NDVI
- Figura 66. Evolución anual de la superficie verde en el entorno urbano afectada por sequías y olas de calor (SVAS) a partir del índice NDVI

LISTA DE TABLAS

Tabla 1:	Ubicación de los puntos de muestreo por municipio. EPSG: 4326 para las coordenadas
Tabla 2:	Fechas con los días más cálidos para el año 2023 por municipio
Tabla 3:	Pesos definidos por variable para la generación del Mapa de la Isla de Calor urbana. 28
Tabla 4:	Definición de las categorías de confort térmico
Tabla 5:	Superficie por tipología (arbolado, matorral y herbazal) para cada municipio y desagregada para la superficie delimitada como urbana
Tabla 6:	Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Almeida.
Tabla 7:	Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Aveiro
Tabla 8:	Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Ciudad Rodrigo
Tabla 9:	Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Coimbra
Tabla 10:	Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Guarda
Tabla 11:	Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Salamanca
Tabla 12:	Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Valladolid
Tabla 13:	Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto central del Barrio Pajarillos así como los tiempos de acceso para el municipio de Valladolid
Tabla 14:	Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Viseu
Tabla 15:	Coeficiente de ajuste de la ecuación para cuantificar el cambio en la concentración de CO ₂
Tabla 16:	Valores de temperatura media anual (Tmed, °C) y concentración de CO ₂ (ppm) por municipio
Tabla 17:	Densidad y precio de la madera utilizados para la cuantificación
Tabla 18:	Superficie arbolada (ha) por municipio y tipología de bosque
Tabla 19:	Superficie arbolada (ha) por municipio en el entorno urbano
Tabla 20:	Número de días por municipio con velocidad del viento por encima de los 8 m/s
Tabla 21:	Variables y costes empleados en la cuantificación del impacto de los incendios
Tabla 22:	Superficie afectada por incendios según tipología de uso para los municipios españoles.
Tabla 23:	Perdida de superficie arbolada total y como consecuencia de incendios para los municipios portugueses
Tabla 24:	Matriz de riesgos
Tabla 25:	Cambios estimados en la Producción Primaria Neta (kg C/ha) y estimación de los costes ocasionados
Tabla 26:	Pérdidas o ganancias estimadas para la NPP entre años en función de las variaciones en el clima
Tabla 27:	Pérdidas o ganancias (€) estimadas para cada año en función de las variaciones en el clima
Tabla 28:	Pérdidas (€) estimadas para cada año en función de las velocidades del viento
Tabla 29:	Superficie afectada por incendios y estimación de los costes ocasionados
Tabla 30:	Probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Almeida
Tabla 31:	Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Aveiro
Tabla 32:	Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Ciudad Rodrigo
Tabla 33:	Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Coimbra
Tabla 34:	Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Guarda
Tabla 35:	Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Salamanca

Tabla 36. Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Valladolid

Tabla 37. Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Viseu

Tabla 38. Nivel de riesgo para los municipios evaluados

Tabla 39. Indicador 1: Temperatura media anual

Tabla 40. Indicador 2: Temperatura en superficie

Tabla 41. Indicador 3: Número de olas de calor al año

Tabla 42. Indicador 4: precipitación media anual

Tabla 43. Indicador 5: Evapotranspiración potencial media anual

Tabla 44. Indicador 6: Número de eventos extremos asociados a inundaciones

Tabla 45. Indicador 7: Número de eventos extremos asociados a sequías

Tabla 46. Indicador 8: Número de días con riesgo de incendios forestales

Tabla 47. Indicador 9: Número de incendios forestales declarados

Tabla 48. Indicador 10: Número de episodios de contaminación del aire al año (PM10)

Tabla 49. Indicador 11: Número de episodios de contaminación del aire al año (O3)

Tabla 50. Indicador 12: Número de días de calima por episodios africanos

Tabla 51. Indicador 13: Superficie verde en el entorno urbano

Tabla 52. Indicador 14: Superficie verde urbana afectada por sequías y olas de calor

Tabla 53. Indicador 15: Superficie verde urbana afectada por temporales de viento

Tabla 54. Indicador 16: Superficie verde urbana afectada por inundaciones

Tabla 55. Indicador 17: Superficie verde urbana afectada por incendios

1. RESUMEN

El presente documento, aborda la monitorización de la resiliencia y la adaptación al cambio climático en áreas urbanas y rurales de ciudades españolas y portuguesas, con un enfoque particular en el efecto de la isla de calor urbana. Este fenómeno, en el que las áreas urbanas alcanzan temperaturas significativamente más altas que las rurales, se atribuye a situaciones como la sustitución de superficies naturales por materiales como asfalto u hormigón, así como los efectos asociados a las actividades humanas.

El análisis del efecto de la isla de calor urbana, se ha llevado a cabo en ocho ciudades de la red CENCYL (Valladolid, Salamanca, Ciudad Rodrigo, Almeida, Aveiro, Guarda, Coímbra y Viseu) mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para integrar y procesar diversas variables geolocalizadas que tienen alta influencia en las temperaturas de las áreas urbanas. En la evaluación del efecto isla de calor, se ha incluido variables como la temperatura superficial, la compacidad urbana, la vegetación, la calidad del aire y la proximidad a masas de agua. Los resultados permitieron identificar zonas críticas y diseñar mapas de confort térmico que clasifican el impacto del clima urbano en seis niveles.

De forma complementaria, al análisis de la isla de calor urbana, se desarrolló una cartografía de zonas verdes basada en la Fracción de Cobertura Vegetal (FCC), empleando índices de área foliar y capas de vegetación de alta resolución que ha permitido identificar refugios climáticos y caracterizar las distancias y tiempos de acceso desde las áreas de mayor carga térmica en el entorno urbano. El análisis de refugios climáticos junto con los mapas de confort térmico, nos dan una visión general del estado del municipio lo que puede ayudar en la toma de decisiones para implementar medidas de mitigación y resiliencia frente al cambio climático, promoviendo desarrollos urbanos más sostenibles y habitables.

Además de la evaluación del efecto isla de calor, se caracterizó el riesgo asociado al aumento de las temperaturas mediante la evaluación de los cambios en las probabilidades de tres amenazas asociadas a los cambios en el clima: días cálidos, días muy cálidos y olas de calor. La probabilidad de estos eventos asociados al cambio en las temperaturas junto con el impacto cuantificado para el periodo 2021-2023 mediante datos estadísticos y variaciones en el clima de los municipios, ha permitido elaborar la matriz de riesgo la cual nos da información sobre los municipios con mayor riesgo y las amenazas climáticas que ocasionarán mayores impactos en cada uno de los municipios.

Finalmente, se han desarrollado indicadores para la evaluación y monitorización de la vulnerabilidad de los municipios. Estos indicadores, se definen en tablas donde se incluye su ecuación de cálculo y las fuentes de datos de utilidad para su cuantificación. Los indicadores, se han monitorizado en los últimos tres años con datos estadísticos (periodo 2021-2023) obteniendo una visión general del estado de vulnerabilidad de los municipios frente a los riesgos que el aumento de las temperaturas pueda ocasionar.

2. INTRODUCCIÓN

La isla de calor urbana se refiere al fenómeno en el cual las áreas urbanas registran temperaturas más elevadas que sus zonas rurales circundantes. Este incremento térmico es consecuencia de la sustitución de superficies naturales por materiales impermeables como asfalto u hormigón, que absorben y retienen más calor que las zonas vegetadas. Además, las actividades humanas, como el transporte o la industria, también tienen un efecto muy notable en el aumento de las emisiones térmicas en las ciudades.

La mitigación de la isla de calor urbana es esencial para mejorar la habitabilidad de las ciudades, especialmente en climas cálidos y secos. Estrategias como el incremento de la vegetación arbórea, el uso de materiales de alto albedo y la implementación de techos y cubiertas verdes pueden ayudar a reducir las temperaturas urbanas y mejorar el confort térmico.

Hay que destacar que la isla de calor urbana es un fenómeno complejo que resulta de la interacción entre el grado de urbanización, la distribución del área urbana y zonas verdes, y las condiciones climáticas locales. Su análisis y comprensión es fundamental para desarrollar estrategias de mitigación efectivas frente a los efectos que pueda ocasionar, para de este modo promover ciudades más sostenibles y habitables.

Este documento, establece la caracterización y desarrollo del mapa de la isla de calor urbana para ocho ciudades españolas y portuguesas que forman parte de la red de ciudades CENCYL. Las ocho ciudades integradas en esta red y en las cuales se ha evaluado el efecto isla de calor son: Valladolid, Salamanca, Ciudad Rodrigo, Almeida, Aveiro, Guarda, Coímbra y Viseu. Además, el documento evalúa los refugios climáticos y el riesgo de cada municipio frente a las principales amenazas derivadas del aumento de las temperaturas. Finalmente, se establecen indicadores que permiten la monitorización y seguimiento de la vulnerabilidad de los municipios frente al aumento de las temperaturas.

3. OBJETIVO

El objetivo de este estudio, es la medición del efecto isla de calor urbana y la definición de diversos parámetros de monitorio climático utilizando una metodología y un sistema de indicadores comunes, lo que permitirá evaluar las necesidades y los resultados en cuanto a la adaptación al cambio climático y la resiliencia de cada ciudad. Para conseguir este objetivo general, se han definido una serie de objetivos específicos destacando los siguientes:

- Identificación de áreas de estudio y definición de límites geográficos.
- Recolección de datos históricos para la evaluación y distribución de zonas verdes, masas de agua y áreas urbanas.
- Evaluar parámetros de la calidad del aire y su comportamiento en el efecto isla de calor.
- Definir el estado del clima actual y futuro analizando el impacto del cambio climático sobre cada una de las áreas de estudio.
- Definición y cálculo de la isla de calor urbana utilizando imágenes de satélite como punto de partida para la evaluación de la temperatura en superficie.
- Definición e implementación de una cartografía de zonas verdes.
- Evaluar la resiliencia climática mediante la identificación de refugios climáticos.
- Desarrollo de matrices de riesgos considerando tanto la vulnerabilidad de las zonas de cada caso de estudio.
- Definición de indicadores de vulnerabilidad y capacidad de adaptación frente al cambio climático. Implementación de fichas técnicas por indicador y gráficas con su evolución temporal.

4. SEGMENTACIÓN DE ÁREAS

Para determinar el mapa de la isla de calor urbana en cada uno de los municipios objeto de estudio, el primer paso, fue determinar y segmentar las áreas de interés sobre las que evaluar en detalle el aumento de la temperatura como consecuencia del efecto de las variables del medio físico que se relacionan con el aumento de la temperatura en entornos urbanos. Estas áreas, fueron definidas de forma conjunta con el órgano de contratación, seleccionando los contornos de los municipios y puntos de muestro como áreas de interés. En la Tabla 1, se detallan las coordenadas de los puntos de monitorización empleados como zonas sobre las que evaluar en detalle el efecto de la isla de calor urbana.

Tabla 1: Ubicación de los puntos de muestreo por municipio. EPSG: 4326 para las coordenadas.

Municipio	Nomenclatura	Longitud	Latitud
Almeida	Almeida	-6,99	40,49
Aveiro	Aveiro	-8,64	40,64
Ciudad Rodrigo	Ciudad Rodrigo	-6,55	40,60
Coímbra	Coímbra I	-8,42	40,21
	Coímbra II	-8,50	40,23
Guarda	Guarda	-7,24	40,55
Salamanca	Salamanca	-5,66	40,97
Viseu	Viseu I	-7,91	40,64
	Viseu II	-7,92	40,64

En el caso de Valladolid, no se seleccionó una ubicación en punto de muestreo, sino que se seleccionó el barrio de Pajarillos como unidad de análisis en detalle. Por ello, al no ser un dato vectorial en formato punto sino que se definió mediante un polígono, no se ha incluido en la tabla anterior. Estas ubicaciones, se emplearán a lo largo de este documento para reportar salidas gráficas de detalle de las variables geográficas en estas áreas.

De forma complementaria, se han extraído los límites o contornos de los municipios para ser empleados como zonas de procesado y evaluación en la generación de la cartografía para determinar el efecto de la isla de calor. Estos límites municipales, se han obtenido de fuentes públicas. En el caso de los municipios portugueses, la información se ha extraído del Portal de

Datos Abiertos de la Administración Pública¹, mientras que para los municipios españoles, los límites municipales fueron descargados del Instituto Geográfico Nacional (IGN)². La Figura 1, presenta de forma gráfica la ubicación de los municipios objeto de evaluación y los puntos de muestro seleccionados.

¹ <https://datos.gov.pt/es/datasets/concelhos-de-portugal/>

² <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

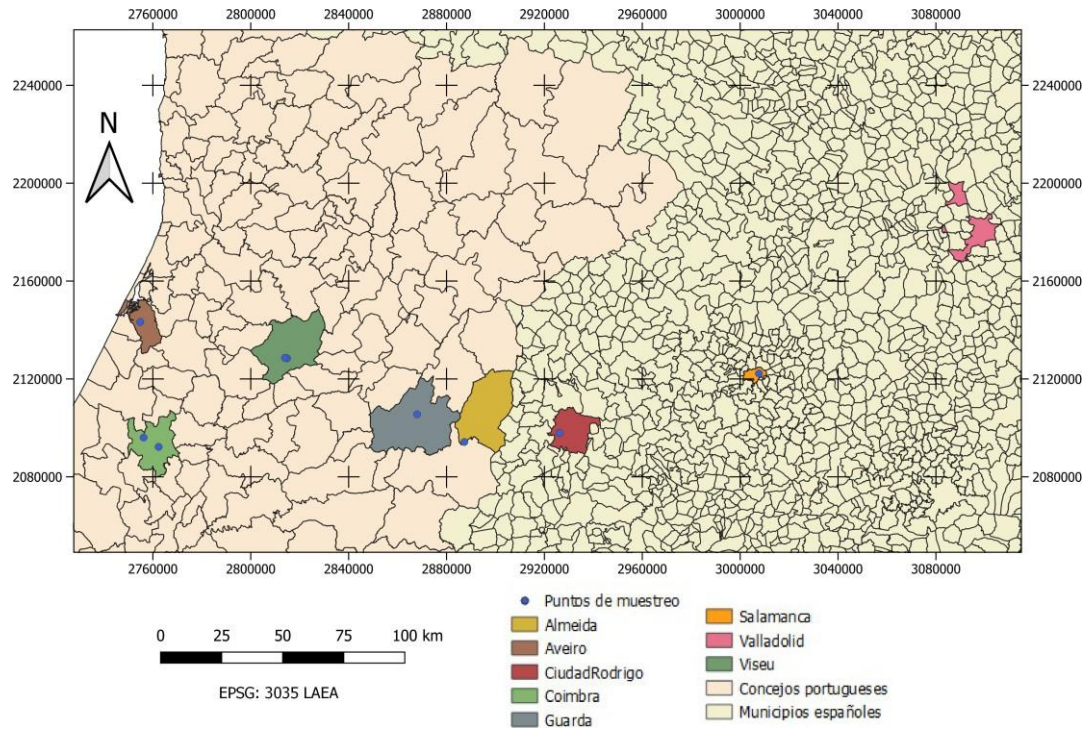


Figura 1. Ubicación de los municipios y puntos de muestro

5. PROCESADO DE DATOS GEOESPACIALES

La caracterización de la isla de calor urbana y la generación de Mapa de la Isla de Calor urbana se ha abordado mediante la integración de diferentes capas geolocalizadas que contienen información relevante de variables con influencia directa en su cuantificación. El problema, se ha abordado mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) dado la componente geográfica de las variables. Los SIG, se apoyan en el uso de archivos ráster y vectoriales.

Los archivos vectoriales representan elementos geográficos mediante tres estructuras básicas: puntos, líneas y polígonos, utilizando coordenadas para definir la posición de los vértices. Por otro lado, los archivos ráster consisten en una red de celdas o píxeles, donde cada celda almacena una propiedad o característica espacial, como color o altitud.

La principal diferencia entre ambos modelos radica en su estructura: mientras que el modelo vectorial se basa en puntos y líneas como elementos fundamentales, el modelo ráster utiliza celdas como unidad básica. Además, los archivos vectoriales almacenan coordenadas, mientras que los ráster contienen valores asociados a cada píxel.

Para llevar a cabo la evaluación de la isla de calor urbana de cada municipio, se ha seleccionado el formato ráster debido a su mejor capacidad para representar la realidad, permitiendo salidas gráficas más realistas que los modelos vectoriales integrando la componente tridimensional. A continuación se detallan las técnicas empleadas para la transformación de datos vectoriales a ráster así como otras técnicas utilizadas para homogeneizar los datos con el objetivo de disponer de la información requerida para la evaluación a nivel municipal.

Rasterización: es el proceso de convertir datos vectoriales (polígonos, líneas o puntos) en una cuadrícula ráster con una resolución espacial determinada. En el caso del análisis de la isla de calor urbana, se ha empleado una resolución espacial de 10 metros para generar los archivos ráster con resolución suficiente como para permitir la caracterización de la isla de calor urbana.

Interpolación IDW (Inverse Distance Weighting): se trata de un método de interpolación espacial que estima valores para ubicaciones desconocidas utilizando valores conocidos de puntos cercanos. El método, se basa en la idea de que los puntos más cercanos al lugar de interés tienen mayor influencia que los más lejanos. Es ampliamente utilizado para crear superficies ráster a partir de datos puntuales en aplicaciones basadas en datos geográficos. Este proceso, se utilizó para crear un ráster para toda la superficie del municipio integrando los datos puntuales de contaminación en cada una de las estaciones de medición.

Reclasificación: es el proceso de reasignar los valores de sus celdas a nuevos valores según reglas definidas. Este proceso es común en el análisis geoespacial para simplificar datos, agrupar rangos de valores o preparar un ráster para cálculos posteriores. La reclasificación se emplea a lo largo del proceso de evaluación para agrupar valores y normalizar variables de cara a su integración.

Obtención de vectores de orientación: en el caso de las calles, se ha trabajado con vectores para determinar la orientación del vector respecto al norte geográfico. Una vez determinada la orientación del vector, se rasteriza y reclasifica según la rosa de los vientos para obtener un ráster con información relevante para comprender el efecto de los vientos como agentes que ayudan a disipar el calor urbano.

Análisis de proximidad: representa el conjunto de técnicas geoespaciales utilizadas para evaluar la cercanía o distancia entre objetos o características geográficas en un espacio determinado. Este tipo de análisis es clave para comprender el efecto de las zonas con agua en la reducción de la temperatura. En el análisis planteado, se utilizó la distancia euclidiana para llevar a cabo el análisis de proximidad. Este método, calcula la distancia directa (en línea recta) desde un punto o conjunto de puntos a todas las ubicaciones de un ráster.

Generación de una malla con ocupación edificada: las huellas de los edificios, se han sometido a un proceso de intersección con una malla de cuadrados de 10 metros, calculando en cada cuadrado de la malla el porcentaje de superficie ocupada por edificios. Una vez determinado el porcentaje de ocupación, se ha rasterizado para generar el archivo ráster requerido en el proceso.

Tras aplicar estos procesos, se obtienen para cada uno de los municipios, los siguientes archivos ráster, los cuales conforman la base de datos geoespaciales para la cuantificación del Mapa de las Isla de Calor urbana:

- Temperatura en superficie.
- Orientación de las calles.
- Compacidad urbana.
- Vegetación urbana.
- Contaminantes atmosféricos: $PM_{2.5}$, PM_{10} y O_3 .
- Distancia a masas de agua.

Todos estos ráster, se emplearán a lo largo del proceso de caracterización de la isla de calor urbana y formarán parte de la entrega correspondiente a la evaluación de este efecto en los municipios objetos de estudio. En cada sección específica donde se presenta más en detalle el efecto de las variables, se añade información sobre su proceso de cálculo.

6. CÁLCULO DE LA ISLA DE CALOR URBANA Y ZONAS VERDES

El objetivo principal de la evaluación de la isla de calor urbana y de las zonas verdes, es la generación de mapas analíticos del clima urbano (Mapa de Isla de Calor) para cada uno de los municipios objeto de estudio y mapas de vegetación que permitan definir los refugios climáticos o áreas donde los efectos de la temperatura serán de menor magnitud.

6.1. EVALUACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA

A continuación, se describe de forma detallada el proceso desarrollado para la obtención del Mapa de la Isla de Calor para cada una de las ciudades junto con los recursos cartográficos y datos georreferenciados utilizados en su determinación.

El periodo analizado para la cuantificación del mapa de la isla de calor, es el correspondiente a las temperaturas en superficie para el año 2023. Para optimizar el proceso de evaluación, se han seleccionado las temperaturas en superficie de los tres días más calurosos del año a partir de las temperaturas medias diarias. Para cada día seleccionado, se ha considerado la temperatura en superficie tanto diurna como nocturna de modo que se pueda evaluar la variabilidad zonal de la temperatura en cada momento del día. Los días utilizados en cada una de las ciudades objeto de estudio, se presentan en la Tabla 2. En algún caso, fue necesario elegir fechas alternativas a las inicialmente seleccionadas debido a la presencia de nubes en las imágenes Sentinel-3 de temperatura.

Tabla 2: Fechas con los días más cálidos para el año 2023 por municipio.

Municipio	Día 1	Día 2	Día 3
Valladolid	22/08/2023	23/08/2023	24/08/2023
Salamanca	21/08/2023	22/08/2023	23/08/2023
Ciudad Rodrigo	22/08/2023	23/08/2023	24/08/2023
Almeida	09/08/2023	22/08/2023	23/08/2023
Aveiro	08/08/2023	21/08/2023	23/08/2023
Coimbra	08/08/2023	22/08/2023	23/08/2023
Guarda	21/08/2023	22/08/2023	23/08/2023
Viseu	21/08/2023	22/08/2023	23/08/2023

La determinación del Mapa de la Isla de Calor urbana, se basa en el análisis espacial de diferentes variables con fuerte influencia en su caracterización. Las variables empleadas son: temperatura en superficie, compacidad urbana, orientación de las calles, calidad del aire, vegetación urbana y proximidad a masas de agua. A continuación, se detalla cada una de estas variables a partir de su influencia en la isla de calor, de donde se ha obtenido (datos y/o referencias) y cómo se ha procesado para los fines requeridos en el estudio.

6.1.1. TEMPERATURA EN SUPERFICIE

La temperatura en superficie, tiene una relación directa con la intensidad de la isla de calor urbana. Los materiales como el asfalto o las cubiertas de los edificios, absorben y almacenan calor durante el día para luego emitirlos durante la noche. Este efecto, contribuye al aumento de la temperatura en superficie. Otras variables como la rugosidad térmica, hacen que como consecuencia de una

mayor superficie expuesta a la radiación solar se aumente la absorción de calor. Además, las áreas urbanas tienen una menor emisividad de calor durante la noche por lo que no son capaces de evacuar calor regulando la temperatura en superficie.

6.1.1.1. Selección de imágenes satelitales

Para determinar la temperatura en superficie, se ha trabajado con imágenes satelitales Sentinel- 2 y Sentinel-3. El primero, es un satélite multispectral que recoge datos de alta resolución espacial (10-60 metros) con el fin de monitorizar la superficie terrestre mientras que el segundo, es un satélite multi-instrumental que incorpora un radiómetro para medir las temperaturas superficiales tanto terrestres como marinas con una resolución espacial de 1000 metros. Ambos satélites, son operados por la Agencia Espacial Europea (ESA) y forman parte del sistema Copernicus para la monitorización de la Tierra.

Sentinel-3, realiza dos mediciones de temperatura al día, una por la mañana y otra por la noche, siendo de gran utilidad para monitorizar el efecto de la isla de calor. Sin embargo, su resolución espacial puede no ser adecuada para análisis de detalla. Por ello, su relación con las imágenes Sentinel-2 es de gran relevancia para proveer de una temperatura con alta resolución. Hay que tener en cuenta que la temperatura medida por Sentinel-3, está directamente relacionada con las imágenes multispectrales de Sentinel-2 a través de la reflectancia de los elementos de la superficie terrestre, siendo esta reflectancia indispensable para la corrección y determinación de la temperatura en superficie.

Para la determinación de la temperatura en superficie, se emplearán mediciones de temperatura diurna y nocturna de Sentinel-3 para los tres días más calurosos del año, para de este modo, integrar en el proceso de evaluación las características más desfavorables en cuenta a temperatura diurna y nocturna en el análisis del efecto isla de calor. Para la selección de los días, se ha trabajado con las temperaturas medias para el año 2023, seleccionando los tres días con la temperatura media más elevada.

6.1.1.2. Procesado y tratamiento de las imágenes

El tratamiento de los datos, ha consistido en la reducción de escala de las temperaturas superficiales obtenidas de la misión Sentinel-3 utilizando predictores de las bandas multispectrales de Sentinel-2. Los predictores seleccionados fueron las bandas 2, 3, 4 y 8 de las imágenes y su relación a través del índice de diferencia de vegetación normalizado (NDVI). Este índice, relaciona las bandas 4 y 8 para obtener un valor entre 0 y 1 que puede asociarse al estado de la vegetación. Valores próximos a 1, indican vegetación vigorosa mientras que valores próximos a 0, son indicadores de áreas urbanas o terrenos desprovistos de vegetación.

Para conseguir un valor de temperatura superficial a alta resolución (10 metros), se ha empleado el algoritmo `downscale-satelliteLST`³. Este algoritmo, permite mejorar la resolución de la temperatura superficial mediante métodos estadísticos que se basan en las relaciones entre la temperatura superficial y los predictores de ajuste empleados. El algoritmo, evalúa la relación entre los predictores y la temperatura superficial, descartando del proceso aquellas relaciones en las que el valor R-cuadrado supera el umbral de 0,5 como límite de tolerancia para el ajuste. La Figura 2,

³ <https://github.com/pansism/downscale-satelliteLST>

muestra la temperatura superficial obtenida por Sentinel-3 y el resultado tras el proceso de aumento de resolución.

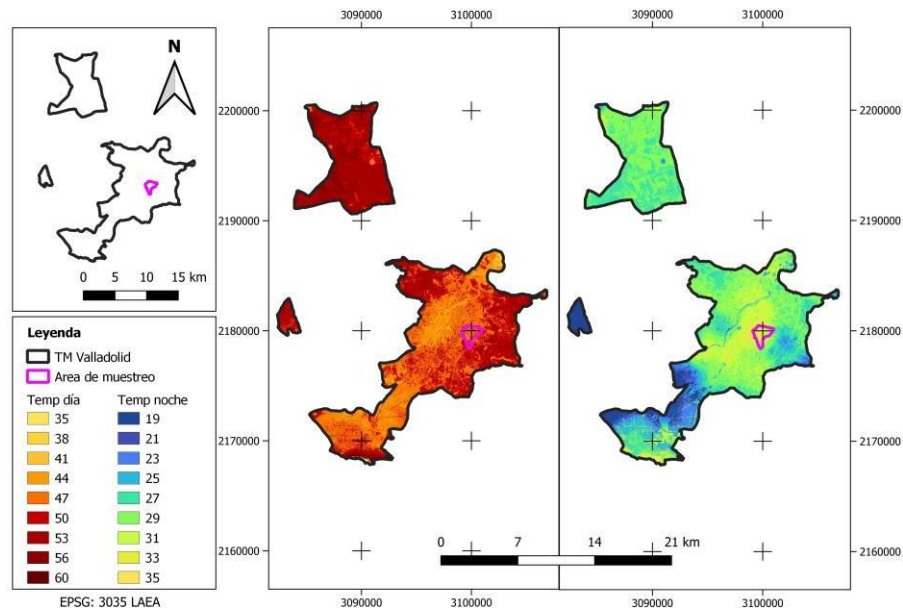


Figura 2. Temperatura superficial (resolución 10m) para la ciudad de Valladolid en el día 22 de agosto de 2023.

Como se puede ver en la imagen anterior, la temperatura en superficie, se comporta de forma muy distinta si la medición corresponde al día o a la noche. En el caso de la medición diurna, las zonas edificadas y baldías, son las que tienen una mayor temperatura en superficie, mientras que por la noche, las zonas vegetadas o con superficie sellada reducida, tienden a disipar mejor en calor en superficie. Este efecto tan visible en la temperatura en superficie, se integrará en el proceso de evaluación a través de la integración de ambas imágenes para la generación de grupos con un comportamiento similar frente a altas temperaturas.

6.1.2. COMPACIDAD URBANA

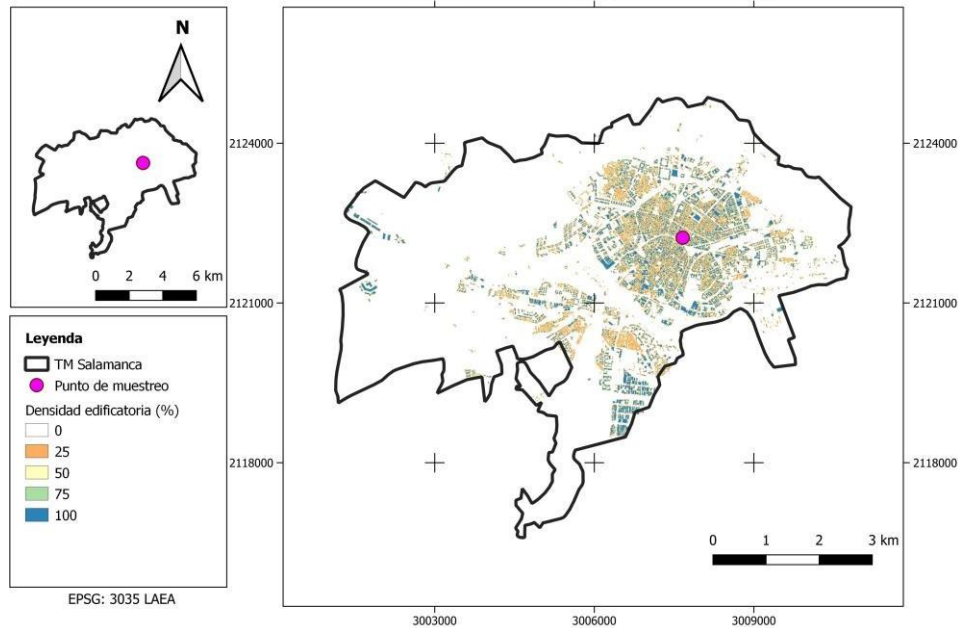
La densidad urbana así como la forma de desarrollo, tiene un impacto muy notable en la isla de calor urbana. En áreas densas y con edificios altos, se forman zonas donde se atrapa el calor y se reduce la ventilación amplificando la acumulación de calor sobre todo durante la noche. Además, las áreas compactas, tienen menor espacio de superficie no sellada lo que disminuye la capacidad de infiltración y por lo tanto la capacidad para enfriarse por evaporación del agua contenido en el suelo y la vegetación. Finalmente, el albedo de las áreas densas suele ser bajo, siendo síntoma de mayor absorción de calor.

Para determinar la compacidad urbana, se han generado mapas de densidad edificatoria por ciudad a partir de los datos geométricos de catastro en el caso de las ciudades españolas y mediante las huellas de edificios globales proporcionadas por Bing Maps⁴ para el caso de las ciudades portuguesas. En la Figura 3, se muestra un ejemplo de los mapas de densidad edificatoria generados

⁴ <https://github.com/microsoft/GlobalMLBuildingFootprints>

para
integrar

la



compacidad en la generación del Mapa para la isla de calor urbana de las ciudades objeto de estudio.

Figura 3. Densidad edificatoria en la ciudad de Salamanca.

6.1.3. ORIENTACIÓN DE LAS CALLES

La orientación de las calles, tiene influencia directa en como las áreas urbanas interactúan con el sol y el viento. Por un lado, las calles orientadas en dirección este-oeste, suelen recibir más radiación solar durante el día, lo que hace que se caliente de forma más notable. Si las calles están alineadas con los vientos dominantes, se mejora el flujo de aire y por lo tanto se disipa el calor acumulado. El efecto contrario ocurre cuando las calles se orientan de forma perpendicular al viento, lo cual favorece que se acumule el calor debido a la falta de ventilación.

Para determinar la orientación de las calles, se ha trabajado con las geometrías en formato línea extraídas de OpenStreetMap (OSM)⁵. Estas geometrías lineales, se han transformado a formato ráster, determinado la orientación de cada segmento respecto al norte. En la Figura 4, se muestra un ejemplo de los mapas de orientación de las calles generados para integrar el efecto de los vientos en la dispersión de calor y su impacto en el desarrollo del Mapa para la isla de calor urbana de las ciudades objeto de estudio.

⁵ <https://www.openstreetmap.org/#map=11/40.6692/-6.7319>

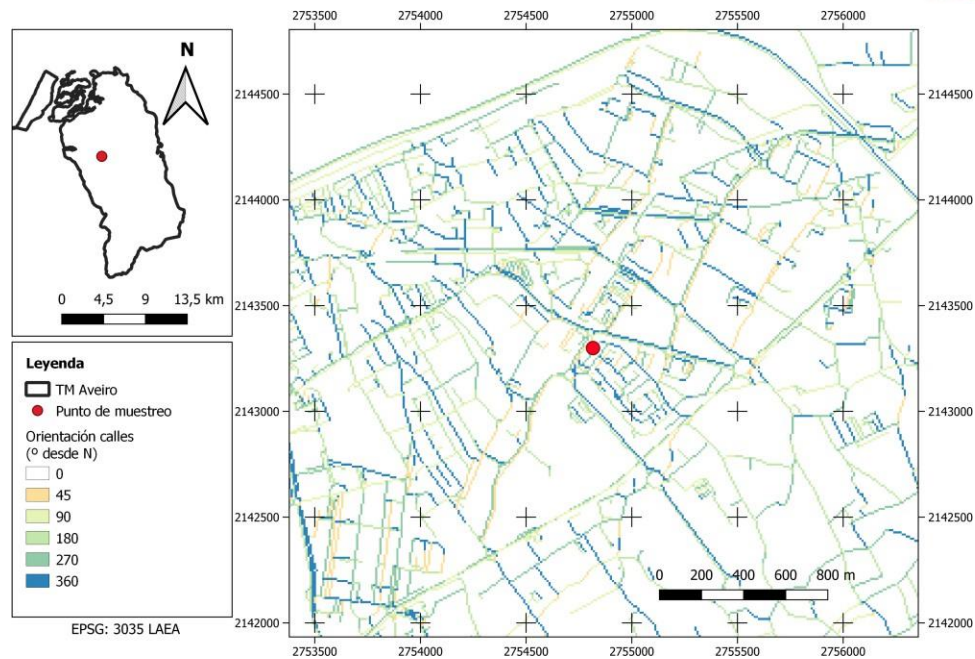


Figura 4. Densidad edificatoria en la ciudad de Salamanca.

6.1.4. CALIDAD DEL AIRE

La contaminación atmosférica influye en el balance energético de la isla de calor urbana. Las partículas suspendidas y los gases contaminantes atrapan la radiación infrarroja emitida por la superficie, intensificando el calentamiento local. Además, la contaminación puede reducir la cantidad de radiación reflejada hacia la atmósfera, aumentando la absorción de calor. También hay que tener en cuenta que un aire más denso y contaminado tiende a ser menos móvil, lo cual intensifica la acumulación de calor en zonas urbanas.

En el caso de la calidad del aire, se ha considerado el efecto del ozono y de las partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀). Los datos empleados en el análisis, se han extraído de las mediciones de las estaciones de monitorización a nivel local proporcionados por la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA)⁶. Estas mediciones puntuales se han sometido a un proceso de interpolación IDW (distancia inversa ponderada) para generar un ráster continuo sobre toda la superficie del municipio con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG). El resultado obtenido, puede verse en la Figura 5 con un ejemplo de uno de los tres contaminantes evaluados en una de las áreas objeto de estudio.

⁶ <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/air-quality-statistics-dashboards>

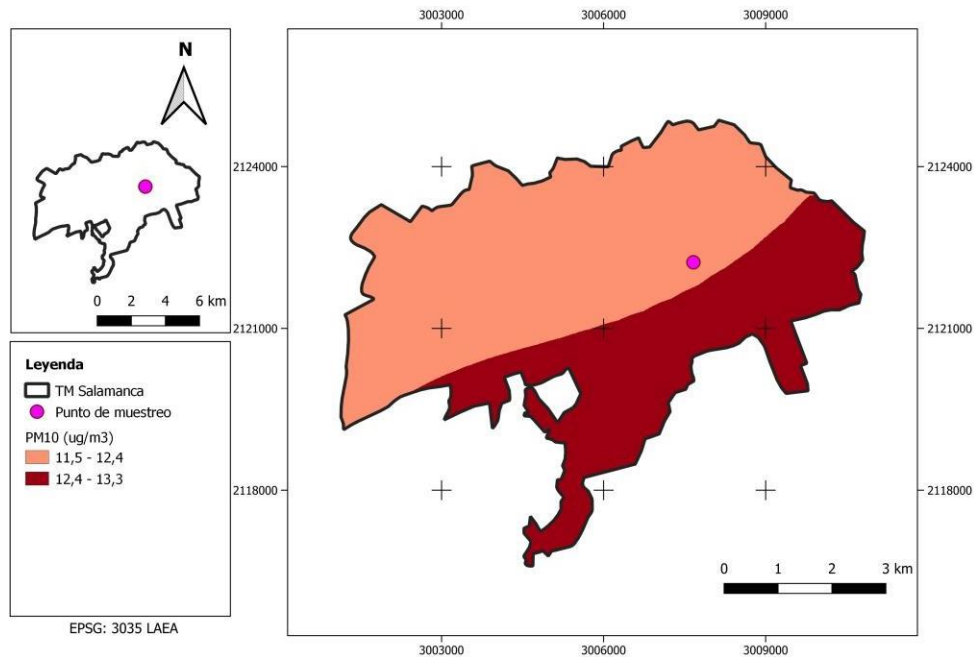


Figura 5. Concentración de PM₁₀ para la ciudad de Salamanca en el año 2023.

6.1.5. VEGETACIÓN URBANA

La vegetación desempeña un papel crítico en mitigar la isla de calor urbana. Los árboles, bloquean la radiación solar, reduciendo las temperaturas en superficie y liberando vapor de agua, lo que enfría el aire del entorno de manera efectiva. Además, hay que destacar que las áreas verdes tienen mayor capacidad para disipar el calor rápidamente en comparación con superficies artificiales. Su densidad es fundamental ya que si la vegetación es dispersa o insuficiente, su capacidad para enfriar grandes áreas es muy limitada.

En el análisis para determinar el Mapa de la Isla de Calor urbana, se ha considerado la Fracción de Cobertura de la Vegetación (FCC), siendo este un indicador clave de la cobertura ocupada por masas arbóreas. Su determinación, se ha llevado a cabo mediante la integración de las superficies arboladas y el índice de área foliar (LAI). Ambas variables se han obtenido del servicio Copernicus de Monitorización de la Tierra (CLMS)⁷ en formato ráster. Para determinar la FCC de forma correcta, fue necesario transformar el LAI en FCC y aplicar una máscara con el arbolado para disponer únicamente de las áreas arboladas. El resultado obtenido, puede verse en la Figura 6 con el ejemplo de uno de los municipios objeto de evaluación.

⁷ <https://land.copernicus.eu/en>

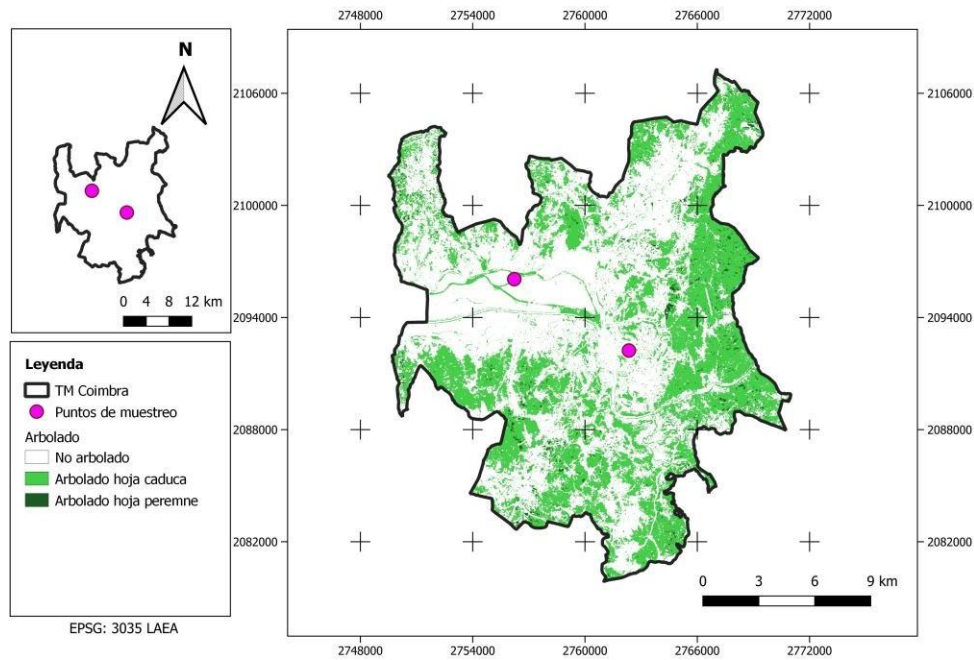


Figura 6. Mapa de vegetación para la ciudad de Coimbra.

6.1.6. PROXIMIDAD A MASAS DE AGUA

La cercanía a masas de agua (ríos, lagos, estanques, etc.) tiene un efecto moderador en las temperaturas urbanas. El agua tiene alta capacidad térmica, lo que significa que se calienta y enfría más lentamente que la tierra, estabilizando las temperaturas en áreas cercanas. Además, las zonas con agua, contribuyen al enfriamiento mediante la evaporación, especialmente en climas cálidos y secos, y generan brisas frescas que ayudan a contrarrestar el calor acumulado en el entorno urbano.

La determinación de las áreas ocupadas por agua, se ha llevado a cabo a partir de los datos proporcionados por el Corine Land Cover⁸, el cual clasifica los usos del suelo en diferentes categorías. En nuestro caso, se han seleccionado las clases correspondientes a zonas con agua, las cuales se emplearán para implementar un mapa de distancia que permita integrar el efecto termorregulador asociado a la proximidad a una masa de agua. En el caso de los municipios de Castilla y León, se empleó información más detallada a partir de la zonificación de las masas de agua proporcionada por la Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León (IDECyL)⁹. El resultado obtenido, pudo verse en la Figura 7 con el ejemplo de uno de los municipios objeto de evaluación.

⁸ <https://land.copernicus.eu/en>

⁹ <https://idecyl.jcyl.es/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/SPAGOB CYLCITDTSHYMAR>

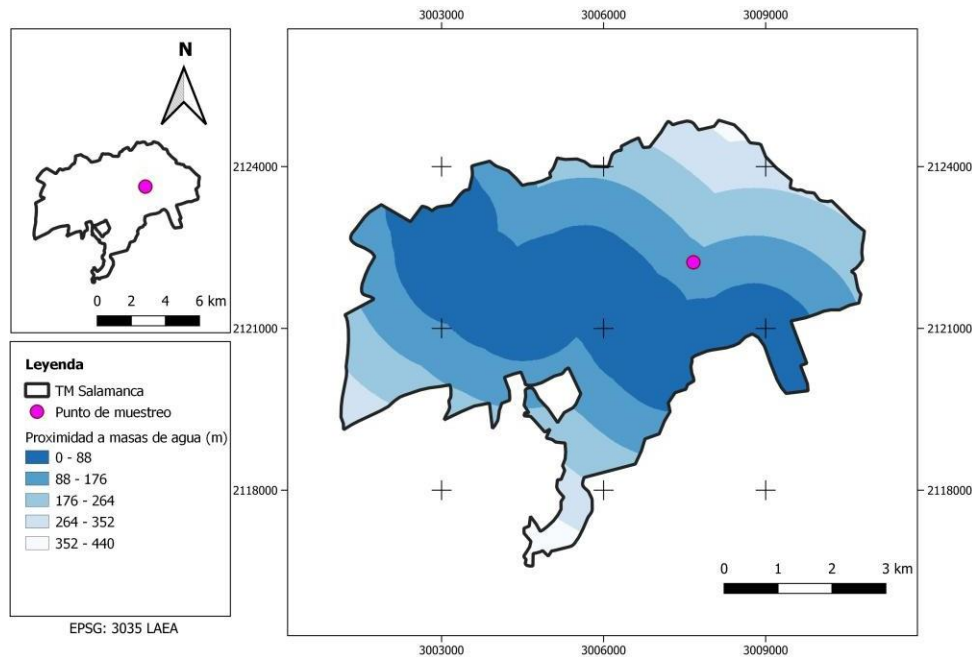


Figura 7. Mapa de distancia a los cursos de agua en la ciudad de Salamanca.

6.1.7. EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS MAPAS

Para determinar el Mapa de la Isla de Calor en cada uno de los casos de estudio, se ha implementado un análisis de decisión multicriterio (MCDA). Este análisis, consiste en un conjunto de métodos y técnicas diseñadas para ayudar en la toma de decisiones cuando hay múltiples criterios que deben ser considerados. Permite seleccionar, clasificar o priorizar alternativas en base a diferentes criterios que pueden tener diferentes niveles de importancia o pesos. Para su desarrollo, se han seguido los siguientes pasos:

- Definición del problema mediante la identificación de las alternativas y los criterios relevantes a utilizar en el análisis.
- Estandarización de los criterios mediante la definición de una escala común para poder compararlos. Esta etapa, permitirá normalizar el valor de los criterios.
- Definición de la importancia relativa de cada criterio a través de su peso específico.
- Comparación de alternativas con respecto a cada criterio.
- Combinación de las evaluaciones y los pesos para obtener una puntuación final para cada alternativa, utilizando la suma o media ponderada como método de agregación.
- Selección de la alternativa con la mejor puntuación.

La aplicación de este proceso de evaluación multicriterio, nos permite determinar el mapa de la isla de calor considerando las diversas variables que pueden tener un impacto específico sobre su cuantificación. A continuación se detalla el proceso desarrollado para implementar la evaluación multicriterio de la isla de calor urbana.

6.1.7.1. Categorización y normalización de las variables

Cada una de las variables que intervienen en la generación del efecto isla de calor y que se han presentado y analizado anteriormente, se han normalizado mediante la aplicación de un algoritmo de agrupamiento (clustering) así como la definición de los cuartiles. Dependiendo de la variable analizada y su capacidad para generar grupos homogéneos, se seleccionó una de las dos técnicas para la categorización y normalización de los datos por variable.

Se eligió el algoritmo de agrupamiento K-means únicamente en el caso de las temperaturas. Este algoritmo, se puede definir como un método de agrupamiento no supervisado que se utiliza para dividir un conjunto de datos en un número específico de grupos atendiendo a variables métricas como la distancia o las relaciones entre las variables que conforman la muestra a evaluar. Su resultado fue óptimo para generar grupos homogéneos de las temperaturas diurnas y nocturnas evaluadas, sin embargo, su aplicación para generar grupos en el resto de las variables no era adecuada, requiriendo una normalización mediante el empleo de cuartiles.

Mediante la aplicación de estos métodos de categorización y normalización, se consigue normalizar cada variable con influencia en la isla de calor urbana con el objetivo de determinar el impacto que cada una genera en la mitigación del clima urbano en cada una de las ciudades objeto de estudio.

6.1.7.1.1. Temperatura en superficie

La temperatura en superficie, es el indicador principal del efecto de la isla de calor. Para integrar el impacto de la temperatura en la cuantificación del mapa de la isla de calor urbana, se han agrupado y normalizado los valores en la escala de 1 a 4, donde 4 representa las áreas con mayores valores de temperatura y 1 las áreas con temperaturas sensiblemente más bajas considerando en ambos casos el efecto tanto diurno como nocturno. En la Figura 8, se puede ver la reclasificación y normalización de la temperatura para uno de los municipios evaluados.

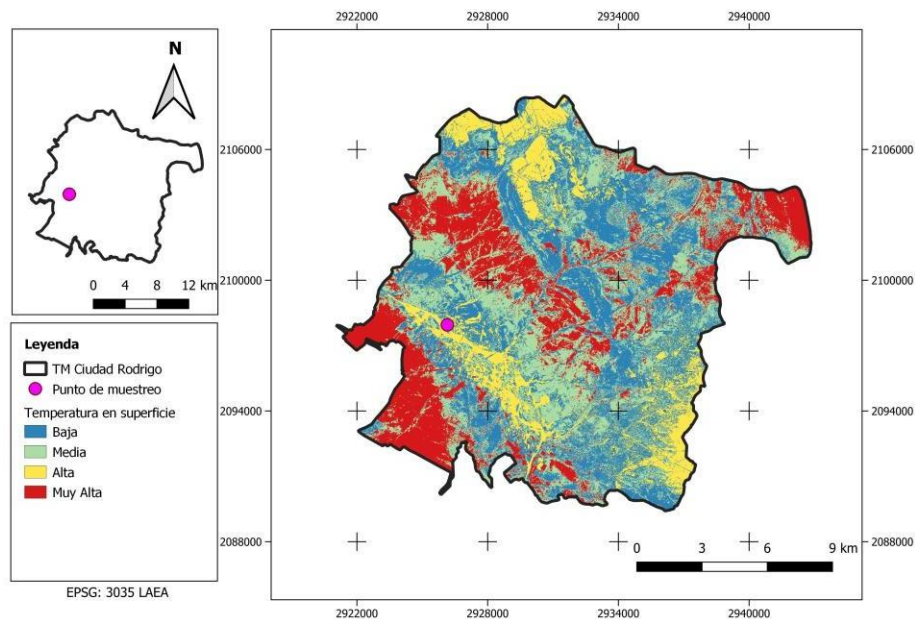


Figura 8. Valores normalizados para la temperatura en superficie en Ciudad Rodrigo.

6.1.7.1.2. Compacidad urbana

El análisis de la compacidad urbana es clave para determinar su efecto en el aumento de la temperatura urbana. Por lo general, las zonas urbanas más compactas, disipan peor el calor. Este efecto asociado a la distribución edificatoria, se ha considerado mediante la agrupación y normalización de los valores de porcentaje de superficie edificada por pixel. Al igual que para el caso anterior, se empleó una escala de 1 a 4, donde 4 representa las áreas con mayor porcentaje de superficie construida por unidad de superficie y 1 las áreas con menor porcentaje de superficie construida por unidad de superficie. En la Figura 9, se puede ver la reclasificación y normalización de la compacidad urbana para uno de los municipios evaluados.

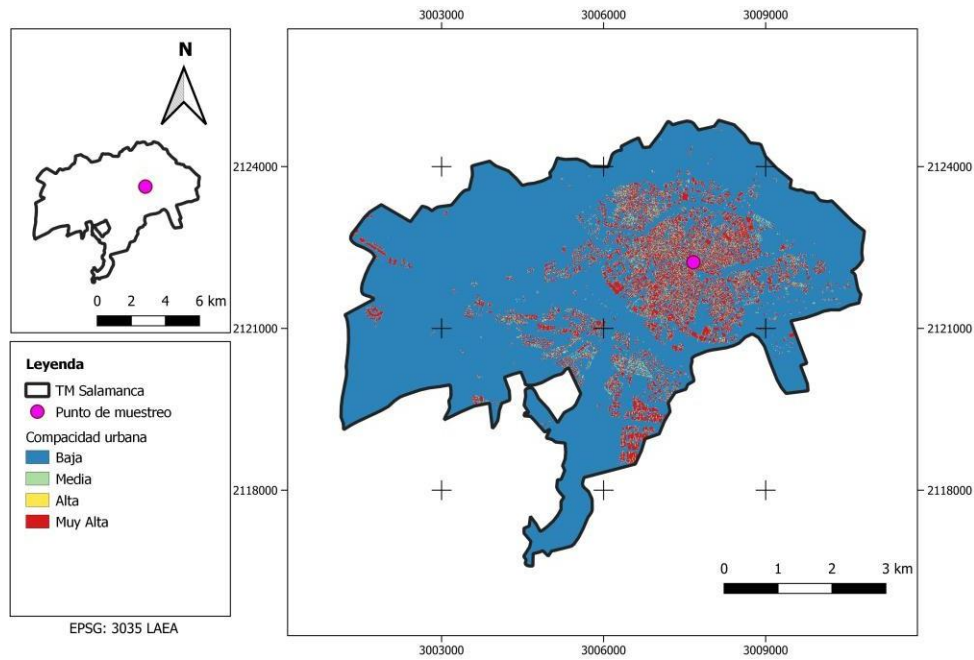


Figura 9. Valores normalizados para la compacidad urbana en Salamanca.

6.1.7.1.3. Orientación de las calles

Como se comentó en la sección anterior, la orientación de las calles es fundamental para evaluar el impacto de los vientos en la disipación del calor urbano. Para definir la orientación de las calles, se han empleado las direcciones predominantes de los vientos representadas en las rosas de los vientos obtenidas de servicio meteorológico Meteoblue¹⁰. Las orientaciones de los vientos predominantes, se emplean para definir la normalización de las variables, considerando las direcciones predominantes como las más favorables (valor 1) y las menos representadas como las más desfavorables (valor 4), utilizando los valores 2 y 3 para las clases intermedias. La Figura 10, Figura 11, Figura 12 y Figura 13, muestran las rosas de los vientos recopiladas de la web de Meteoblue para los municipios analizados.

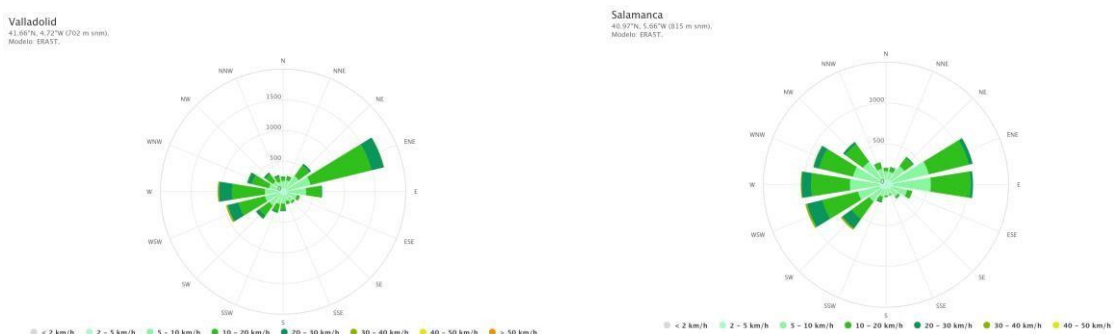


Figura 10. Rosa de los vientos con direcciones predominantes para Valladolid (izquierda) y Salamanca (derecha).

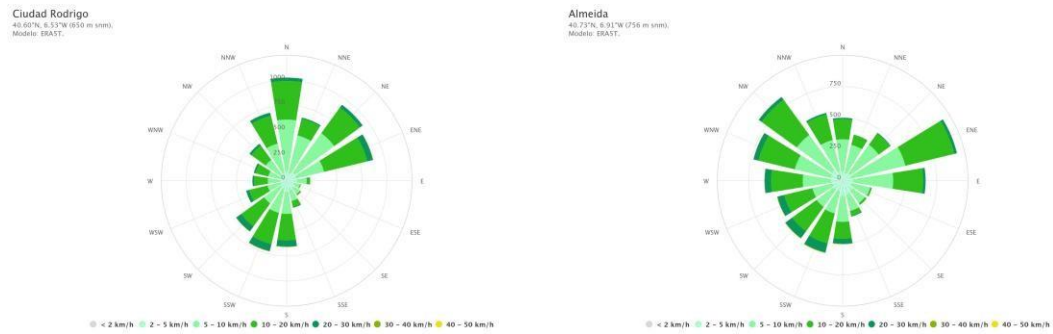


Figura 11. Rosa de los vientos con direcciones predominantes para Ciudad Rodrigo (izquierda) y Almeida (derecha).

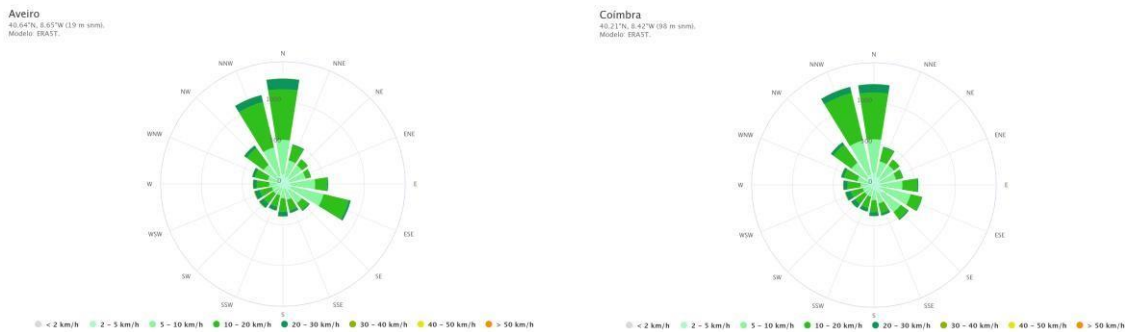


Figura 12. Rosa de los vientos con direcciones predominantes para Aveiro (izquierda) y Coimbra (derecha).

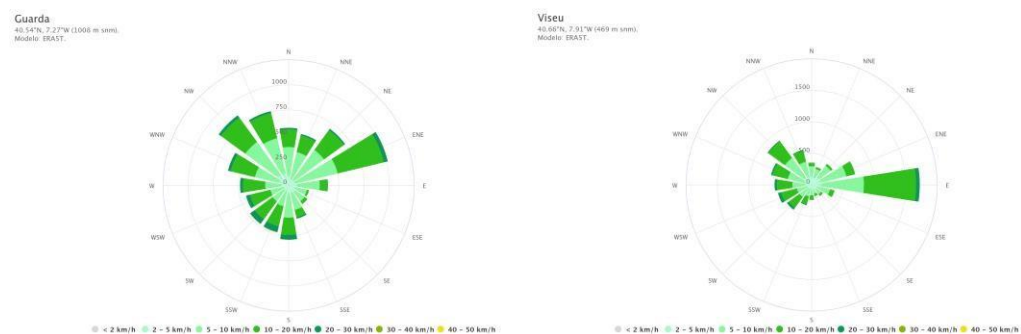


Figura 13. Rosa de los vientos con direcciones predominantes para Guarda (izquierda) y Viseu (derecha).

Tras aplicar los valores de normalización, se obtiene un ráster normalizado con la orientación de las calles de la ciudad frente a los vientos más dominantes. La Figura 14, muestra un ejemplo del ráster final empleado en el proceso de evaluación con el valor normalizado de las calles según los vientos predominantes para uno de los municipios objeto de estudio.

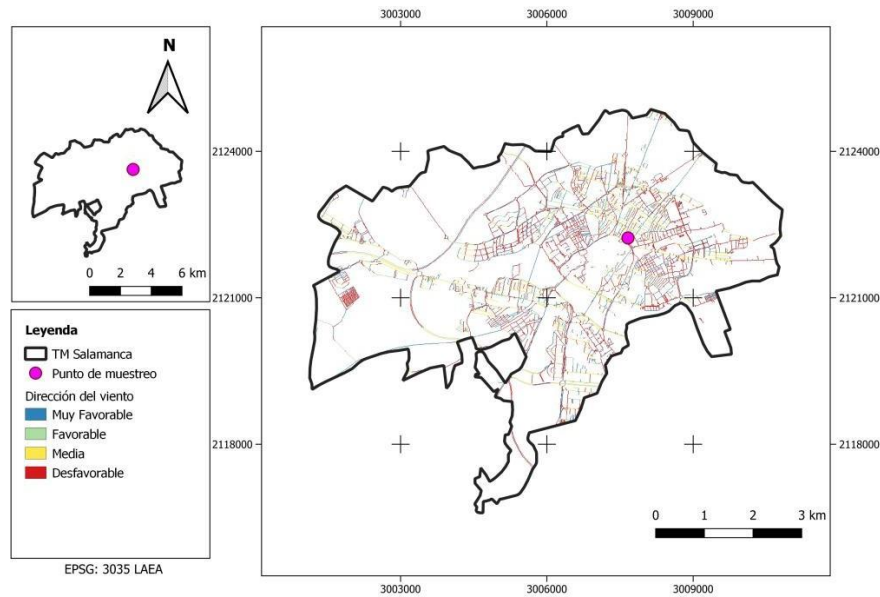


Figura 14. Valores normalizados para la dirección del viento en Salamanca.

6.1.7.1.4. Calidad del aire

El papel de la calidad del aire en el efecto isla de calor, es vital ya que actúa como un elemento que ayuda a evitar la salida del calor hacia la atmósfera. Para integrar su impacto en la cuantificación del mapa de la isla de calor urbana, se han agrupado los valores para los tres contaminantes seleccionados (PM2.5, PM10 y O3) y normalizado los valores en la escala de 1 a 2, donde 2 representa las áreas con mayores niveles de contaminación y 1 las áreas con menores niveles de contaminantes. Se optó por utilizar solo dos valores debido a que en la variabilidad de los datos de contaminación es muy pequeña a lo largo de los municipios y por tanto, el impacto del nivel de cada contaminante en la temperatura sería similar en todo el municipio. En la Figura 15, se puede ver la reclasificación y normalización de los contaminantes para uno de los municipios evaluados.

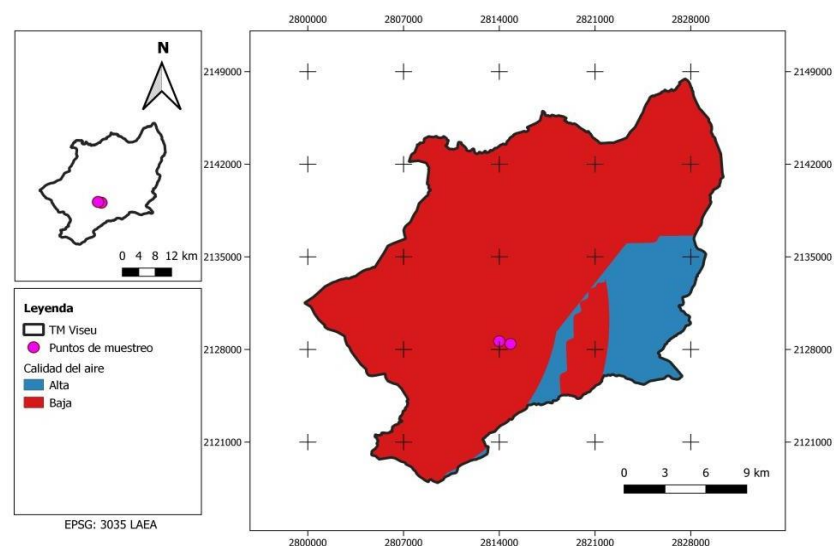


Figura 15. Valores normalizados para la calidad del aire en Viseu.

6.1.7.1.5. Vegetación urbana

La vegetación tanto urbana como rural, tiene un papel fundamental a la hora de amortiguar las altas temperaturas. Está comprobado que la temperatura siempre es más baja en áreas con vegetación. Para integrar su efecto en la zonificación de la isla de calor, se ha normalizado el valor de la fracción de cabida cubierta para las áreas con vegetación arbórea en la escala de 1 a 4, donde 4 representa las áreas con una fracción de cabida cubierta muy baja o sin vegetación y 1 las áreas con una fracción de cabida cubierta muy alta y que por lo tanto pueden tener influencia en la regulación de la temperatura. En la Figura 16, se puede ver la reclasificación y normalización en función de la fracción de cabida cubierta para uno de los municipios evaluados.

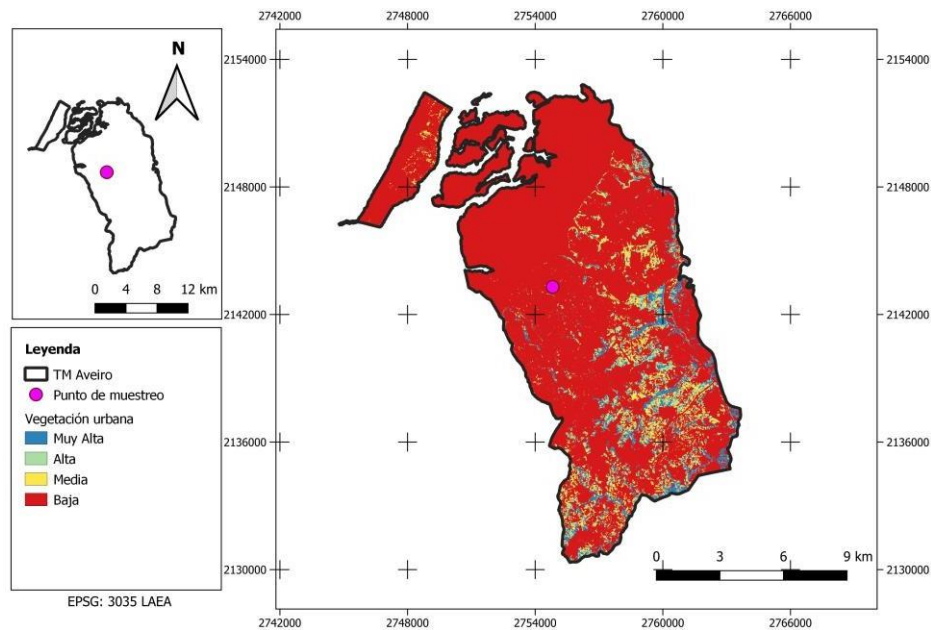


Figura 16. Valores normalizados para la vegetación arbórea a partir de su fracción de cabida cubierta para Aveiro.

6.1.7.1.6. Proximidad a masas de agua

La proximidad a masas de agua es un factor a considerar debido a su efecto en la atenuación de la temperatura. Para integrar este efecto en el proceso de cálculo, se ha desarrollado un cálculo de distancias y normalizado sus valores en la escala de 1 a 4, donde 4 representa las áreas alejadas más de 300 metros de las masas de agua y 1 las áreas que se sitúan a menos de 100 metros de una masa de agua y que por lo tanto pueden tener influencia en la regulación de la temperatura. En la Figura 17, se puede ver la reclasificación y normalización en función de la distancia a las masas de agua para uno de los municipios evaluados.

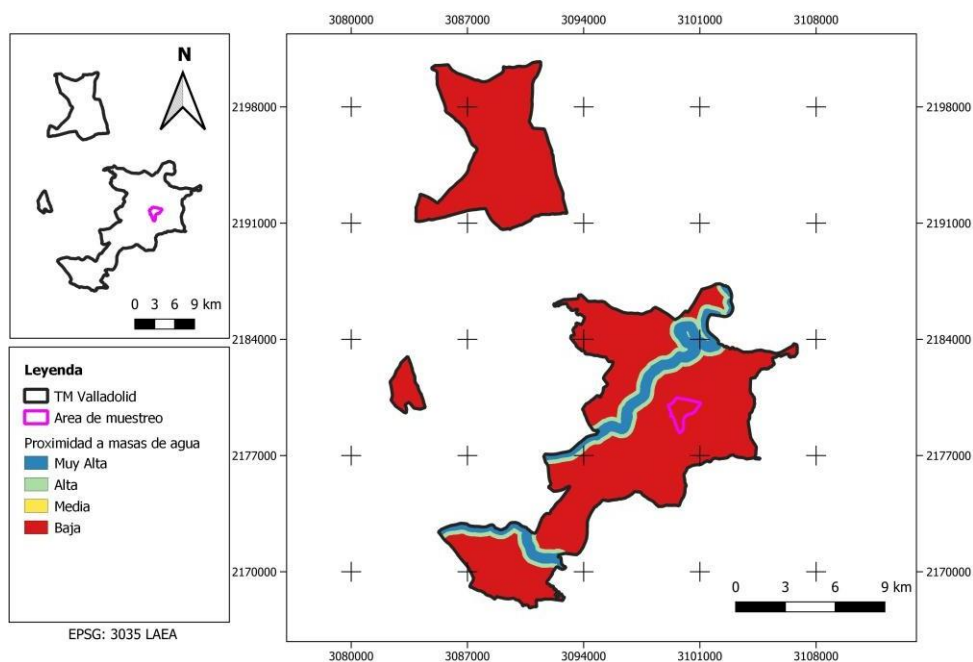


Figura 17. Valores normalizados según la distancia a masas de agua para Valladolid.

6.1.7.2. Definición de pesos y normalización

Una vez normalizadas y categorizadas cada una de las variables con influencia en la isla de calor urbana, será necesario llevar a cabo una evaluación ponderada, empleando todas y cada una de las variables, para determinar su grado de influencia en el análisis global de la Isla de Calor Urbana. La ponderación se realiza de acuerdo con el grado de importancia establecido para cada variable considerando la evidencia científica relativa a todas las variables que generan impacto en el aumento de la temperatura en el ámbito urbano. De este modo, se han considerado los pesos específicos por variable definidos en la Tabla 3.

Para el caso de la evaluación de la Isla de calor de los municipios de la red CENCYL, se tienen en cuenta las siguientes variables: (1) la temperatura en superficie caracterizada a partir de imágenes Sentinel-3 tanto diurnas como nocturnas, (2) la presencia de contaminantes atmosféricos a partir de los datos de las estaciones de medición, (3) la vegetación arbolada tanto en el entorno urbano como en las zonas rurales, (4) la compacidad urbana que representa el porcentaje de área edificada, (5) la orientación de las calles respecto a los vientos dominantes y (6) la distancia a las masas de agua. Como se puede observar en la Tabla 3, se ha otorgado el menor peso al efecto del viento debido a que por norma general, en los días más cálidos del año, los vientos suelen tener magnitudes muy bajas. Por el contrario, se ha considerado la temperatura en superficie como el elemento que más impacto genera en el aumento del efecto isla de calor para el entorno urbano.

Tabla 3: Pesos definidos por variable para la generación del Mapa de la Isla de Calor urbana.

Variable	Peso (%)
Temperatura en superficie	30
Contaminantes atmosféricos	10
Vegetación arbolada	25
Compacidad urbana	20
Orientación de las calles respecto a vientos dominantes	5
Distancia a masas de agua	10

Finalmente, para implementar el análisis y definición del Mapa de la isla de calor urbana, se ha llevado a cabo una superposición ponderada empleando los pesos definidos en la tabla anterior. La superposición ponderada de las variables, tiene como entrada las capas normalizadas, las cuales se multiplican por los pesos específicos de cada una de las variables y se suman para obtener una salida ráster que nos proporcione un valor del confort térmico en cada una de las zonas del municipio.

6.1.7.3. Mapa analítico del clima urbano

Una vez realizada la superposición ponderada de todas las variables, se obtiene una media para el año 2023 que representa el mapa de la isla de calor urbana. El resultado de la superposición ponderada, se normaliza y reclasifica en función de la intensidad del clima urbano obteniendo distintos niveles de confort térmico. Se han definido seis niveles de impacto en el confort térmico que serían los siguientes: bajo, neutro, suave, moderado, alto y muy alto. En la Tabla 4, se presentan y describen estos niveles de confort térmico.

Tabla 4: Definición de las categorías de confort térmico.

Categoría	Confort térmico	Descripción
1	Bajo	Carga térmica ligeramente negativa y buen potencial dinámico
2	Neutro	Baja carga térmica y buen potencial dinámico
3	Suave	Carga térmica esporádica e igual potencial dinámico
4	Moderado	Carga térmica moderada y esporádico potencial dinámico
5	Alto	Alta carga térmica y bajo potencial dinámico
6	Muy alto	Carga térmica muy alta y bajo potencial dinámico

A continuación (Figura 18 a Figura 25), se presenta el mapa analítico de la isla de calor urbana obtenido para cada uno de los municipios objeto de estudio, el cual define el punto de partida para comprender el estado actual del municipio en cuanto a carga térmica.

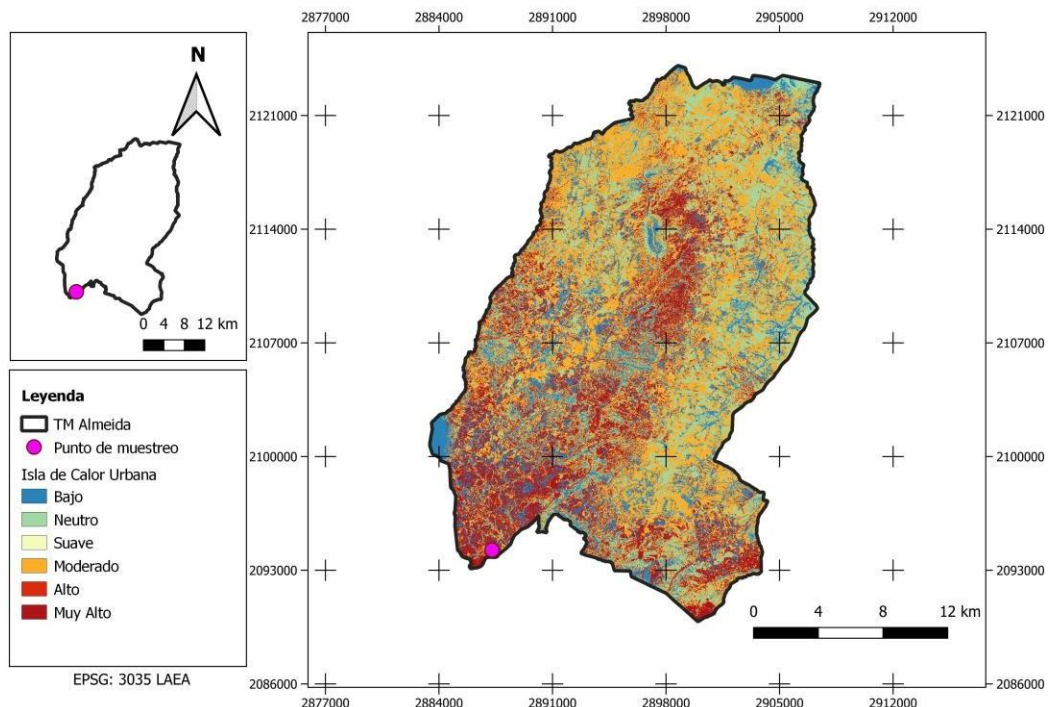


Figura 18. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Almeida.

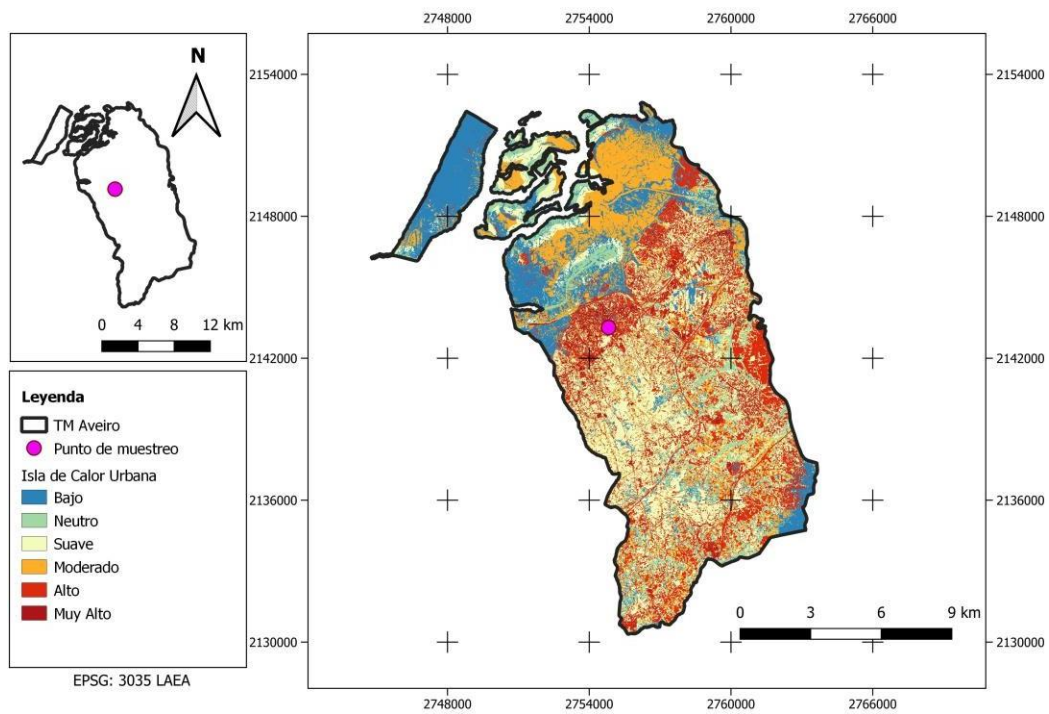


Figura 19. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Aveiro.

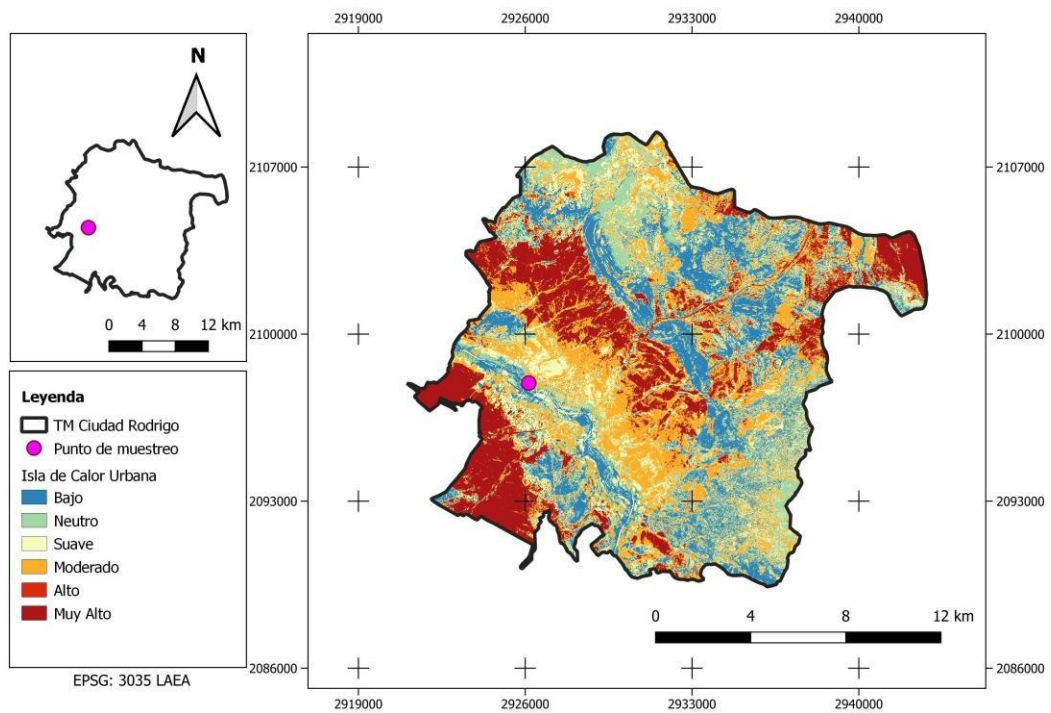


Figura 20. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Ciudad Rodrigo.

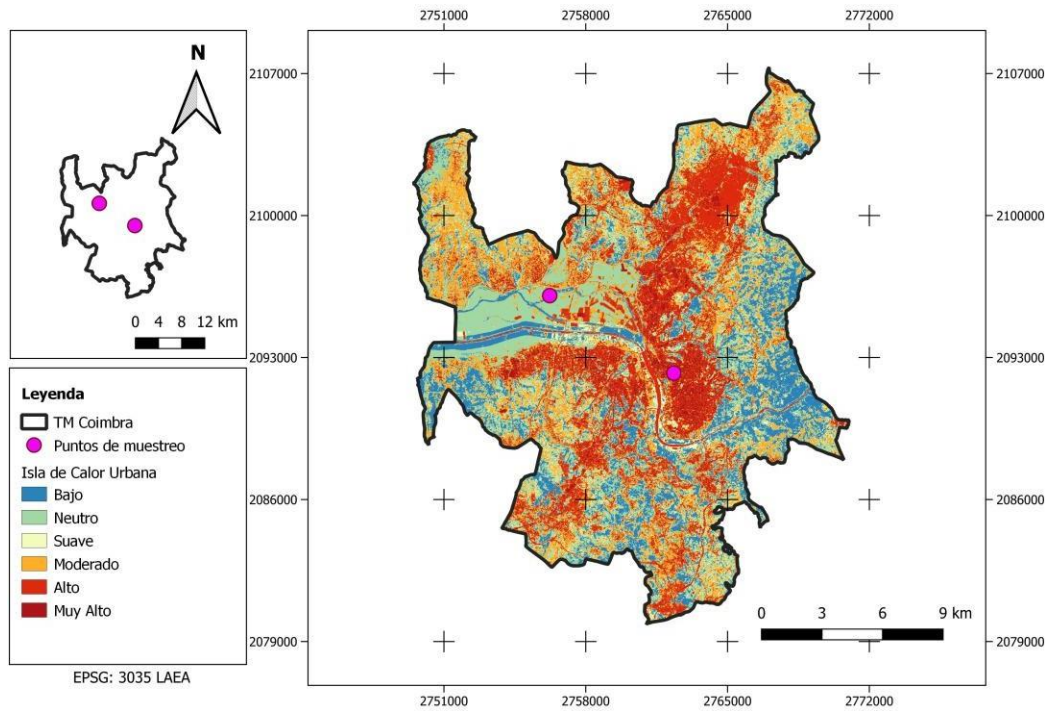


Figura 21. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Coimbra.

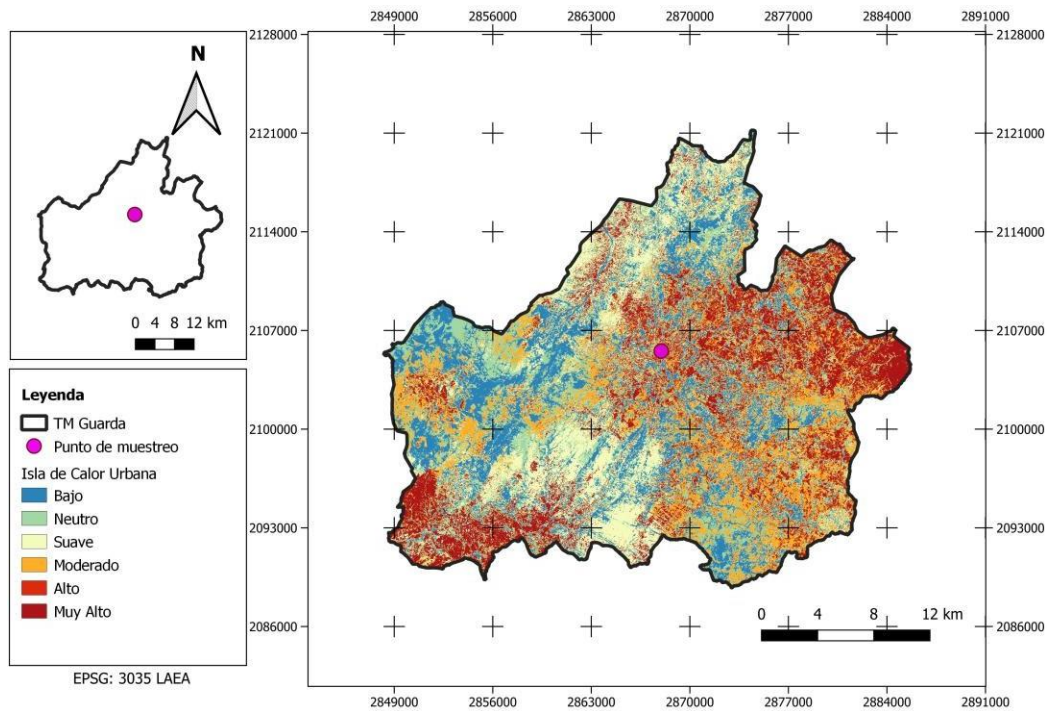


Figura 22. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Guarda.

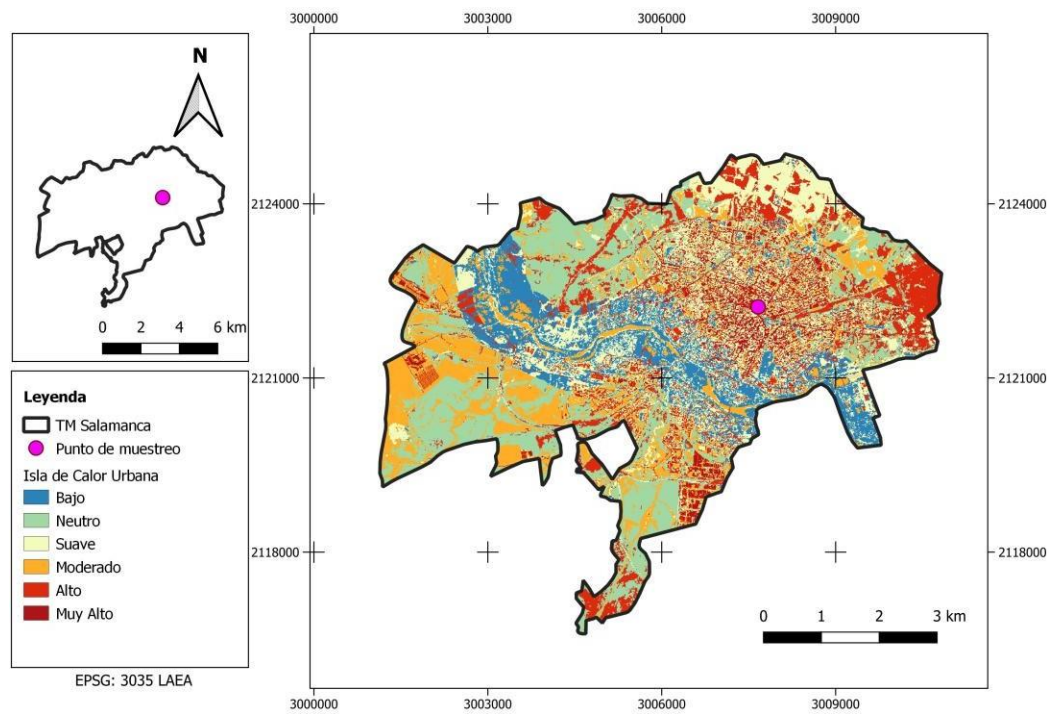


Figura 23. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Salamanca.

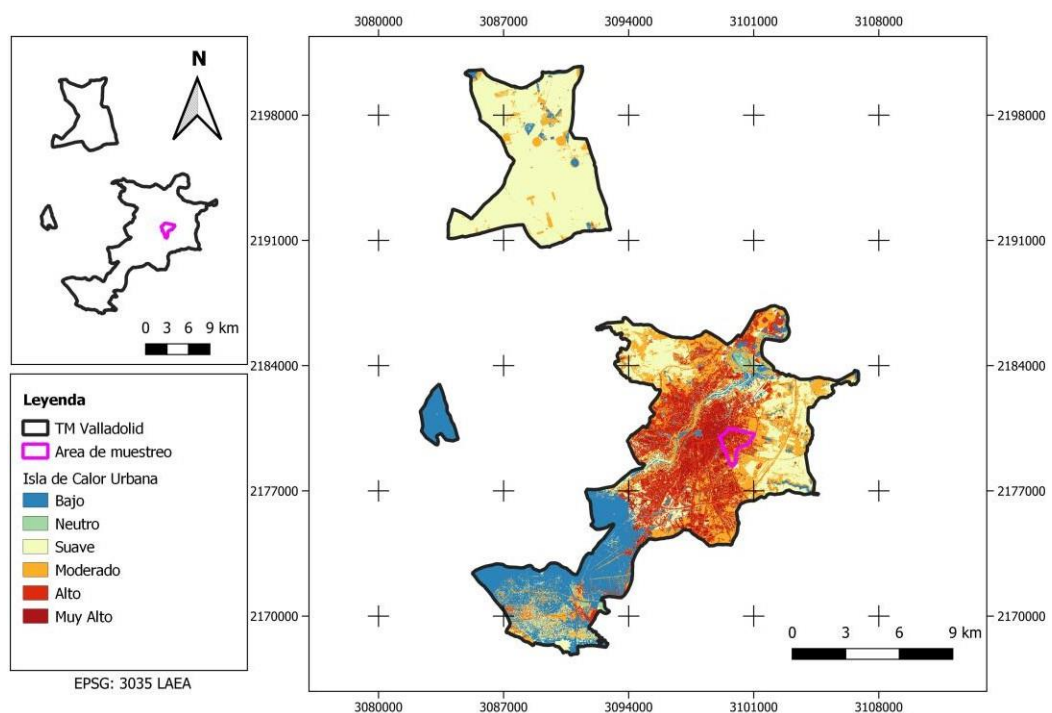


Figura 24. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Valladolid.

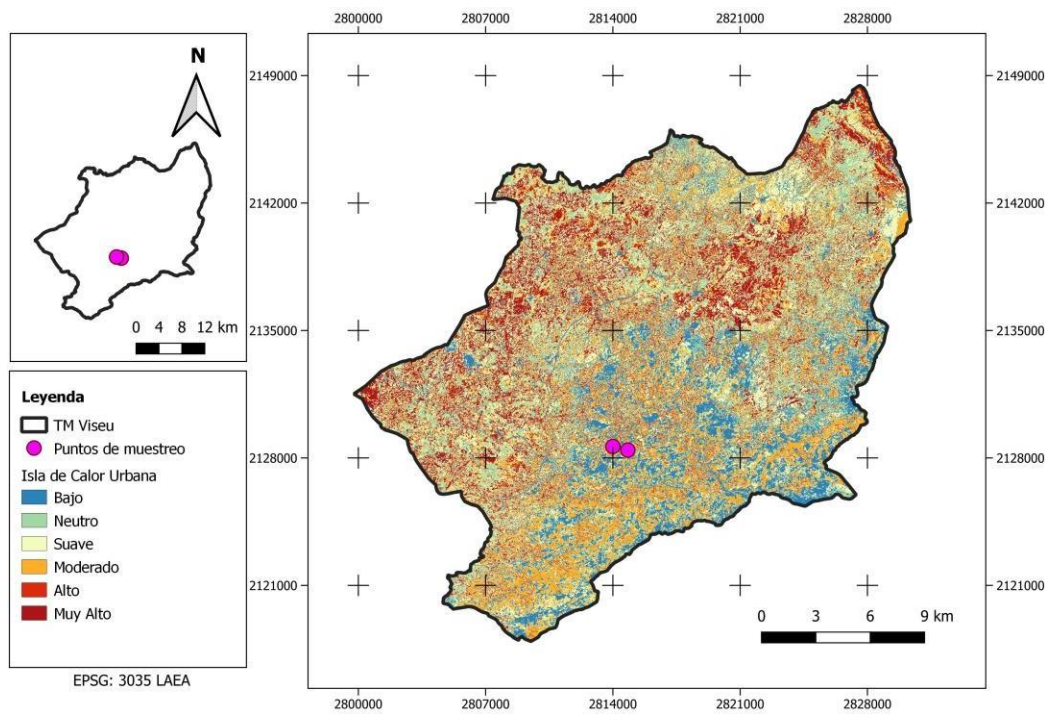


Figura 25. Mapa de la Isla de Calor Urbana para Viseu.

6.2. ZONAS VERDES

En esta sección se explica la metodología desarrollada para la creación de los mapas que determinan la Fracción de Cobertura Cubierta de la Vegetación (FCC) para cada municipio objeto de estudio en la evaluación de la isla de calor urbana.

En primer lugar, los datos necesarios para calcular la FCC se recopilaban del servicio de Copernicus de Monitorización de la Tierra (CLMS)⁷, que proporciona información geográfica sobre la cobertura del suelo y sus cambios, el uso del suelo, el movimiento del terreno, el estado de la vegetación, el ciclo del agua y variables energéticas a nivel de superficie terrestre tanto para Europa como para el resto del mundo. Estos datos incluyen capas como el índice de área foliar (LAI), extraído a partir de imágenes satelitales con una resolución de 10 metros: Estas imágenes, fueron descargadas para las ciudades españolas (fecha de la imagen: 25/06/2023) y para las ciudades portuguesas (fecha de la imagen: 28/06/2023), con el objetivo de disponer del valor del índice de área foliar durante el periodo de crecimiento de la vegetación. El mes de junio fue seleccionado para cumplir con el requisito de ser un valor en el periodo vegetativo y a la vez, evitar la presencia de nubes en las capas obtenidas a través de observaciones satelitales. La presencia de nubes, fue también la razón por la que tuvimos que seleccionar dos fechas diferentes para las ciudades españolas y las portuguesas.

Las capas de LAI se combinaron con una máscara generada a partir del Mapa de Vegetación (Dominant Leaf Type, DLT) de 2018 obtenido del servicio de Copernicus de Monitorización de la Tierra (CLMS), también con una resolución de 10 metros. La máscara se creó asignando el valor 0 a las áreas no arboladas y el valor 1 a las áreas arboladas, de manera que, durante la combinación con LAI, realizada con la Calculadora Raster en QGIS, las áreas representadas con un valor de FCC fueran únicamente las arboladas, descartando otras áreas vegetadas como los campos de cultivo o las áreas de matorral cuyo potencial como refugio climático es reducido. Finalmente, la Fracción de Cobertura Cubierta (FCC) para cada ciudad se calculó a partir de su relación con los valores de LAI utilizando la siguiente ecuación:

$$FCC = 1 - e(-k \cdot LAI) \quad (1)$$

Para aplicar esta ecuación, se emplearon como coeficientes $k = 0,5$ y $e = 2,71828$.

Esta ecuación se ejecutó en la Calculadora Raster de QGIS para obtener las capas de FCC. En la Figura 26, se muestran las diferentes fases de la creación de FCC. Un ejemplo de la FCC para el municipio de Ciudad Rodrigo se muestra en la Figura 27.

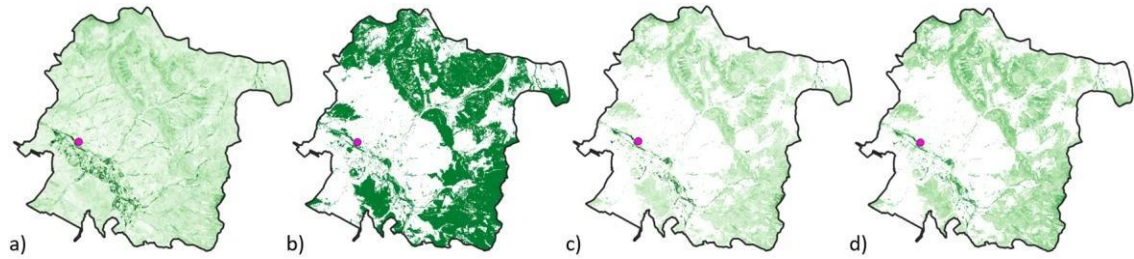


Figura 26. Mapas de LAI (a), máscara de DLT (b), LAI con solo áreas arbolada (c) y FCC (d) para Ciudad Rodrigo.

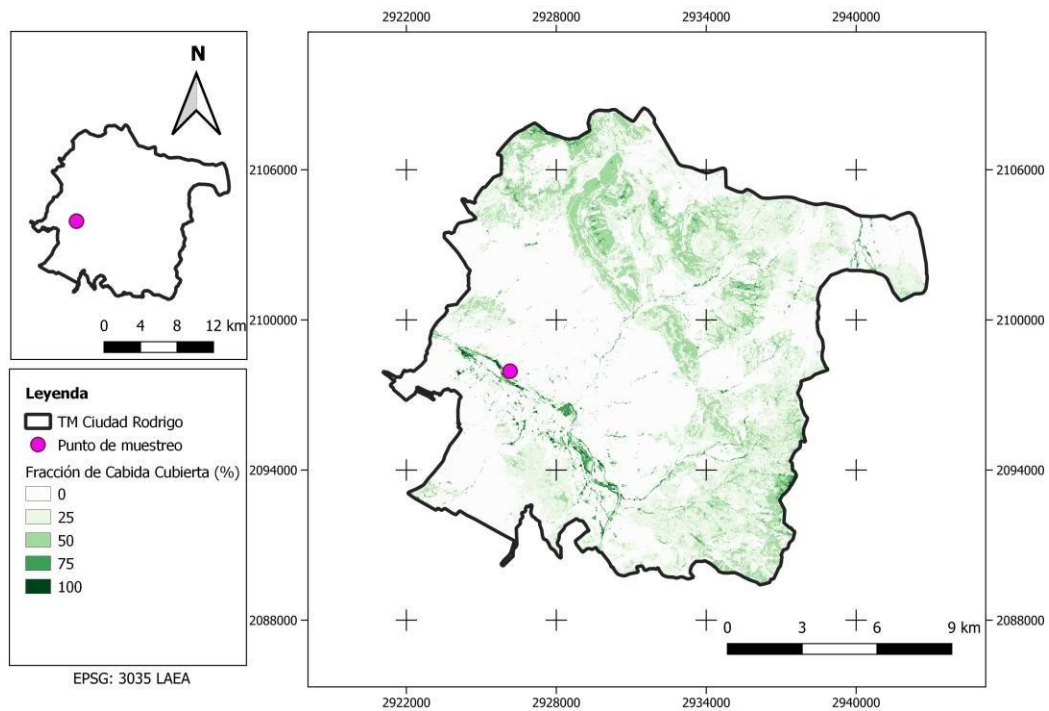


Figura 27. Fracción de Cabida Cubierta para Ciudad Rodrigo.

6.2.1. DELIMITACIÓN DE ZONAS VERDES POR TIPOLOGÍA

La delimitación de las tipologías de las zonas verdes, se ha llevado a cabo mediante el uso del inventario de usos de suelo de alta resolución proporcionado por Copernicus¹¹ para el año 2021. Este inventario de usos del suelo, nos proporciona la distribución de los usos del suelo con una resolución de 10m y una diferenciación de usos en 11 clases fundamentales y tres accesorias, que se detallan a continuación:

- Clase 1: Sellado.
- Clase 2: Árboles de hoja acicular.
- Clase 3: Árboles de hoja ancha caducifolios.
- Clase 4: Árboles de hoja ancha perenne.
- Clase 5: Plantas leñosas de bajo crecimiento (arbustos, matorrales).
- Clase 6: Herbáceas permanentes.
- Clase 7: Herbáceas periódicas.
- Clase 8: Líquenes y musgos.
- Clase 9: No vegetado o escasamente vegetado.
- Clase 10: Agua.
- Clase 11: Nieve y hielo.
- Clase 253: Zona de amortiguamiento de agua de mar costera.
- Clase 254: Área exterior.
- Clase 255: Sin datos.

Las clases de la 2 a la 7, son de gran utilidad para definir tipologías para la vegetación, tanto a nivel de municipio como únicamente sobre entorno urbano o construido del municipio. De este modo, las clases, 2, 3 y 4, se asocian con arbolado, la clase 5 con matorral y las clases 6 y 7 con herbazales. Las superficies ocupadas por cada uno de estos usos a nivel de municipio y para el entorno urbano o construido del municipio se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Superficie por tipología (arbolado, matorral y herbazal) para cada municipio y desagregada para la superficie delimitada como urbana.

Municipio	Total municipio			Entorno urbano del municipio		
	Área arbolada (ha)	Área matorral (ha)	Área herbazal (ha)	Área arbolada (ha)	Área matorral (ha)	Área herbazal (ha)
Almeida	4287,49	15186,8	30582,01	43,35	50,43	871,21
Aveiro	4351,81	511,56	7387,28	1145,09	228,13	3503,92
Ciudad Rodrigo	6189,54	1700,99	15363,9	81,23	9,71	619,45
Coimbra	13403,23	4229,62	9434,23	3028,86	1769,79	4802,95
Guarda	16456,36	20029,79	31086,78	753,11	405,06	2993
Salamanca	192,63	26,33	2136,72	126,11	5,89	429,86
Valladolid	2852,94	52,21	12429,24	529,26	13,06	1646,56
Viseu	23464,39	13261,86	9512,4	4502,61	3102,03	5759,14

De forma gráfica (Figura 28), las nuevas clases generadas para la diferenciación y estratificación de la vegetación a nivel urbano, se han representado para cada uno de los municipios, permitiendo disponer de una diferenciación de tipologías a nivel municipal. Hay que destacar que estas clases, son complementarias a las empleadas para la zonificación de la vegetación a nivel completo del municipio, utilizando las áreas arbolados como las potenciales con capacidad para ser refugios climáticos. Esta zonificación de la vegetación, se ha

¹¹ <https://land.copernicus.eu/en/products/clc-backbone/clc-backbone-2021>

representado de forma gráfica para todos los municipios y se incluye como una entrega más en los resultados del estudio.

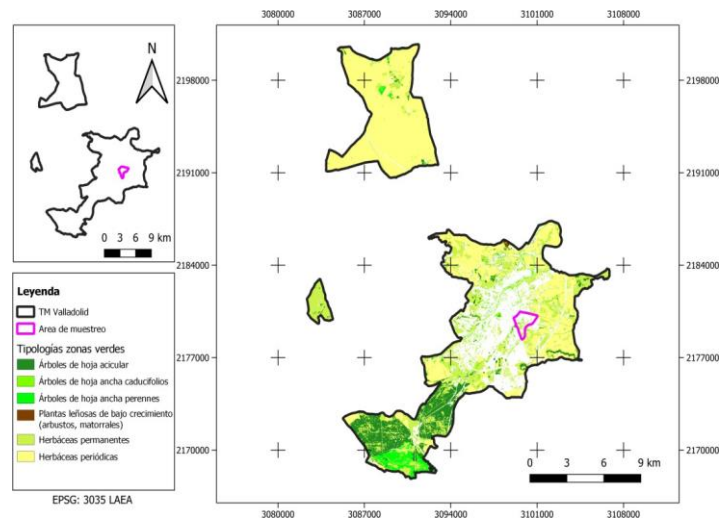


Figura 28. Zonificación de las tipologías para las áreas verdes diferenciando entre arbolado, matorral y herbazal.

6.3. ANÁLISIS DE REFUGIOS CLIMÁTICOS

En esta sección se desarrolla y presenta la metodología utilizada para la obtención de la cartografía de cada una de las ciudades piloto con los potenciales refugios climáticos identificados. Además, se incluyen los principales resultados obtenidos por ciudad.

Para identificar los potenciales refugios climáticos en cada ciudad, el primer paso, fue convertir las capas ráster de las zonas verdes arboladas, que son las que tienen mayor potencial para ser refugios climáticos, en capas vectoriales de polígonos utilizando la herramienta Polygonize (raster a vector) de QGIS. Los polígonos creados se filtran para conservar únicamente aquellos con un área superior a 500 m², asegurando que solo se consideran en el proceso de cálculo áreas con potencial de reducir la temperatura y por tanto, tienen capacidad para ser caracterizadas como refugios climáticos por su relevancia. Este paso también elimina los polígonos adicionales, que no reflejan características reales, generados durante el proceso automático de generación de los polígonos. A continuación, se asigna a cada geometría, el valor medio de Fracción de Cobertura de la Vegetación (FCC) arbórea en cada polígono utilizando la herramienta de Estadísticas Zonales disponible en QGIS. Los polígonos con valores medios de FCC inferiores al 50 % se excluyen, ya que se estima que no tienen suficiente potencial para funcionar como refugios climáticos. Los pasos definidos están representados en la Figura 29 con un ejemplo para el municipio de Almeida.

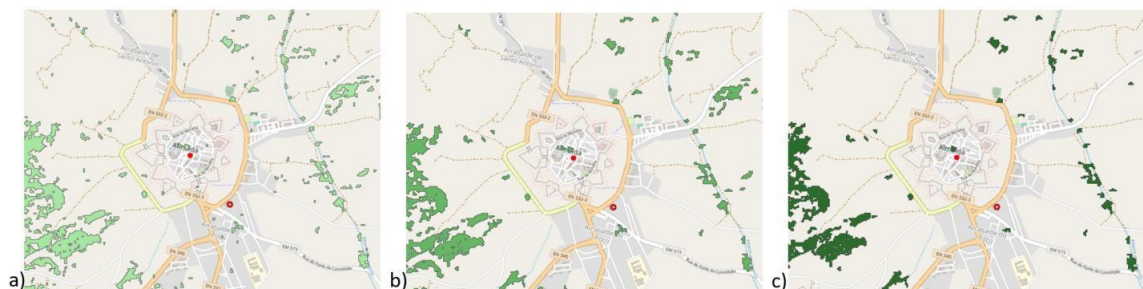


Figura 29. Mapas de refugios climáticos iniciales (a), refugios climáticos con áreas > 500 m² (b), y refugios climáticos con áreas > 500 m² y FCC > 50% (c) para el municipio de Almeida.

Finalmente, se utiliza la herramienta Punto en superficie para determinar los puntos representativos de los polígonos seleccionados como refugios climáticos. Estos se consideran como puntos de destino para calcular la distancia desde un punto de origen a los refugios climáticos. El punto de origen es el área con mayor carga térmica, representada por un punto para cada ciudad que define las zonas críticas señaladas en el mapa de la isla de calor urbana (generalmente en el centro de la ciudad). En el caso de la ciudad de Valladolid, se incluye también la evaluación del área de interés identificada durante la segmentación, la cual se ha caracterizado identificando los refugios potenciales y las distancias de acceso. Desde este punto central que identifica el área con mayor carga térmica, se crea un buffer de 1 km para identificar y extraer solo los puntos de control localizados en los refugios climáticos más cercanos. Los pasos que se han seguido para la caracterización de los refugios climáticos se representan de forma gráfica en la Figura 30.



Figura 30. Mapas de puntos representativos de los refugios climáticos (a), buffer de 1 km desde el punto central (b) y puntos de refugios climáticos incluidos en el buffer (c) para Almeida.

Una vez definidos los puntos de control para las zonas de refugio y la zona con mayor carga térmica, se crea una capa de puntos única para cada ciudad con la herramienta Fusionar en QGIS que incluye la localización del punto con mayor carga térmica y los puntos de localización asociados a los refugios climáticos. Para proceder al cálculo de la distancia, se ha empleado un algoritmo de evaluación de rutas, el cual requiere las coordenadas (latitud y longitud) de los puntos de control. Las coordenadas, se han obtenido mediante la Calculadora de Campos de QGIS utilizando la tabla de atributos asociada a la geometría de los puntos. Las capas de puntos generadas, se guardan para cada ciudad en el sistema de referencia de coordenadas WGS 84 (EPSG: 4326) y en formato GeoJSON. Este archivo, junto con el buffer de 2 km desde el punto central, se utilizan en un algoritmo de cálculo desarrollado en Python que permite definir la distancia desde el punto central hacia los demás puntos (refugios climáticos) siguiendo los datos de OpenStreetMap sobre el camino más corto a través de calles y carreteras del municipio. El algoritmo de cálculo, también permite generar gráficos de las de la ruta de acceso calculada considerando el buffer de 2 km. A modo de ejemplo, se incluye la Figura 31 donde pueden visualizarse resultados gráficos para la ciudad de Guarda. El número de gráficos, sería similar al número de refugios definidos, por lo que para la presentación de resultados, se ha optado por considerar únicamente los datos de distancia entre áreas.

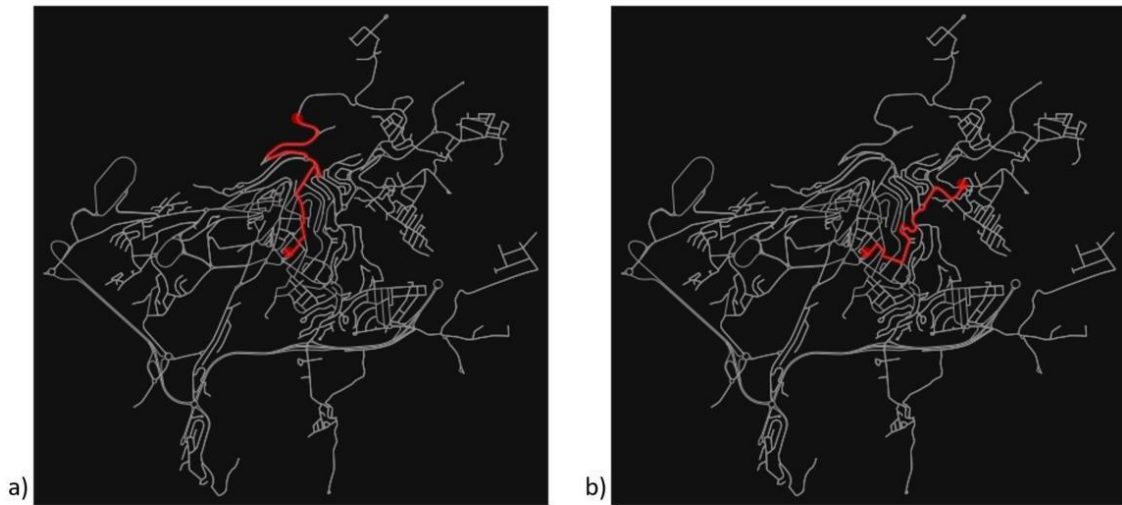


Figura 31. Gráficos de la distancia entre el punto central de Guarda y los refugios 1 (a) y 24 (b).

El resultado final de todos los pasos descritos anteriormente, es una tabla de puntos para cada ciudad que representa los refugios climáticos (más de 500 m² y FCC superiores al 50%) más cercanos al punto con mayor carga térmica de la ciudad. Además, estas tablas contienen la posición de los refugios climáticos (latitud y longitud), el valor de FCC en porcentaje, el área del refugio climático representado, la distancia entre los refugios climáticos y el punto de mayor carga térmica, así como el tiempo medio de acceso (TA) considerando un velocidad media de 50 km/h (en vehículo) y de 5 km/h (a pie) para llegar de un punto a otro (Tabla 6 a Tabla 14). Las tablas se acompañan de mapas que muestran la ubicación de los refugios climáticos y el punto central o de mayor carga térmica (Figura 32 a Figura 40).

Tabla 6. Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Almeida.

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m ²)	Distancia (m)	T _{Avehículo} (minutos)	T _{Apie} (minutos)
1	-6,905	40,734	77,01173	4400	1370,302	1,644	16,444
2	-6,904	40,734	59,01383	2500	1462,418	1,755	17,549
3	-6,899	40,732	81,8353	600	1462,418	1,755	17,549
4	-6,903	40,73	62,87746	1400	839,4095	1,007	10,073
5	-6,901	40,73	73,87038	700	839,4095	1,007	10,073
6	-6,896	40,73	64,35972	700	1033,672	1,240	12,404
7	-6,914	40,726	53,99084	600	500,6298	0,601	6,007
8	-6,895	40,729	69,4293	1100	990,7644	1,189	11,889
9	-6,916	40,725	52,22047	1800	500,6298	0,601	6,007
10	-6,915	40,725	51,22587	600	500,6298	0,601	6,007
11	-6,906	40,726	72,33962	1200	53,88591	0,065	0,647
12	-6,895	40,727	53,30449	600	990,7644	1,189	11,889
13	-6,912	40,723	58,9209	1300	500,6298	0,601	6,007
14	-6,909	40,722	66,19615	1500	1254,25	1,505	15,051

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m ²)	Distancia (m)	T _{Avehículo} (minutos)	T _{Apie} (minutos)
15	-6,912	40,72	65,53099	600	1753,441	2,104	21,041
16	-6,914	40,72	58,29537	9100	1753,441	2,104	21,041
17	-6,9	40,721	52,52525	1200	1468,317	1,762	17,619

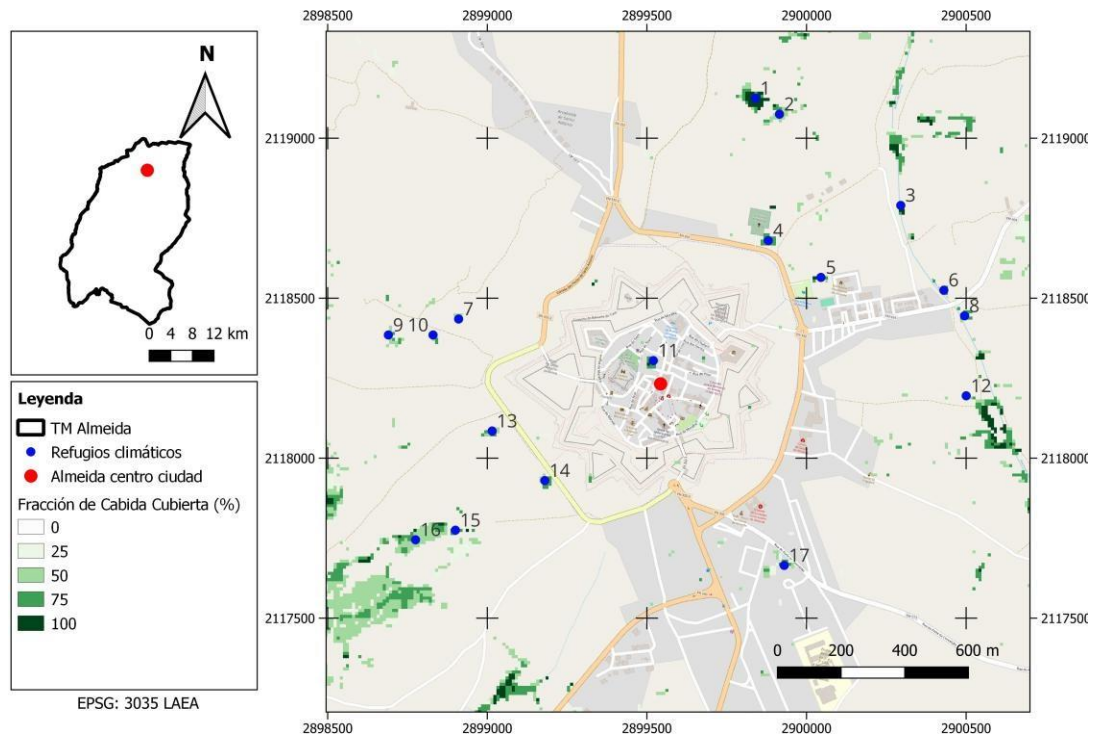


Figura 32. Mapa de los refugios climáticos en Almeida

Tabla 7. Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Aveiro.

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m ²)	Distancia (m)	TAvehículo (minutos)	TApie (minutos)
1	-8,643	40,647	59,45425	1100	1575,72	1,890	18,909
2	-8,636	40,643	58,71633	3200	1321,825	1,586	15,8619
3	-8,644	40,64	53,55572	1300	736,2234	0,883	8,835
4	-8,642	40,639	60,90235	2600	219,1303	0,262	2,629
5	-8,63	40,639	67,9759	2200	888,2466	1,065	10,659
6	-8,64	40,637	58,24388	12000	1284,243	1,541	15,411
7	-8,638	40,636	63,91248	700	675,5937	0,810	8,107
8	-8,638	40,636	61,6009	1200	675,5937	0,810	8,107
9	-8,631	40,636	50,12967	800	1364,684	1,637	16,376
10	-8,635	40,633	57,62024	8400	1116,575	1,339	13,399

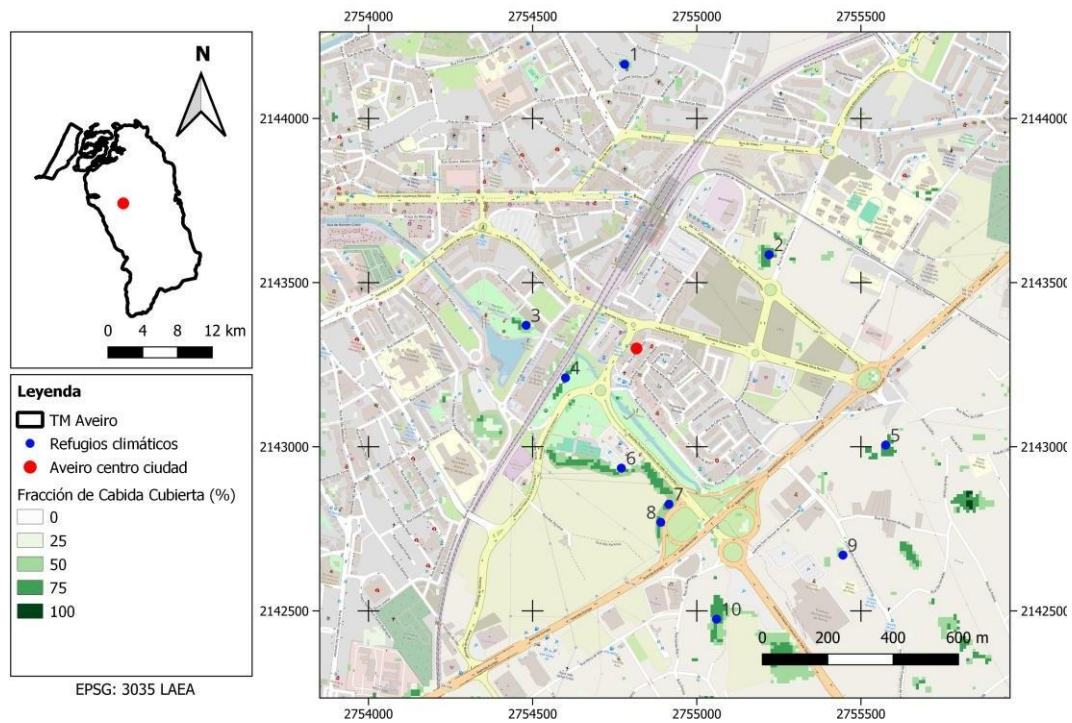


Figura 33. Mapa de los refugios climáticos en Aveiro

Tabla 8. Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Ciudad Rodrigo.

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m ²)	Distancia (m)	TAvehículo (minutos)	TApie (minutos)
1	-6,533	40,605	53,13105	3100	928,2192	1,113	11,138
2	-6,538	40,603	76,11819	600	1185,108	1,422	14,2213
3	-6,524	40,602	50,82117	6700	415,4457	0,498	4,985
4	-6,538	40,596	63,27341	1200	1309,129	1,570	15,709
5	-6,536	40,594	53,62368	2000	1682,588	2,019	20,191
6	-6,531	40,594	50,50285	600	885,6916	1,062	10,628
7	-6,534	40,594	54,75828	48000	1789,271	2,147	21,471
8	-6,529	40,593	52,17698	29200	1019,883	1,223	12,238
9	-6,523	40,593	63,21898	1500	1085,329	1,302	13,023
10	-6,522	40,593	73,12193	1700	1111,719	1,334	13,340
11	-6,525	40,592	50,45249	62000	1019,883	1,223	12,238

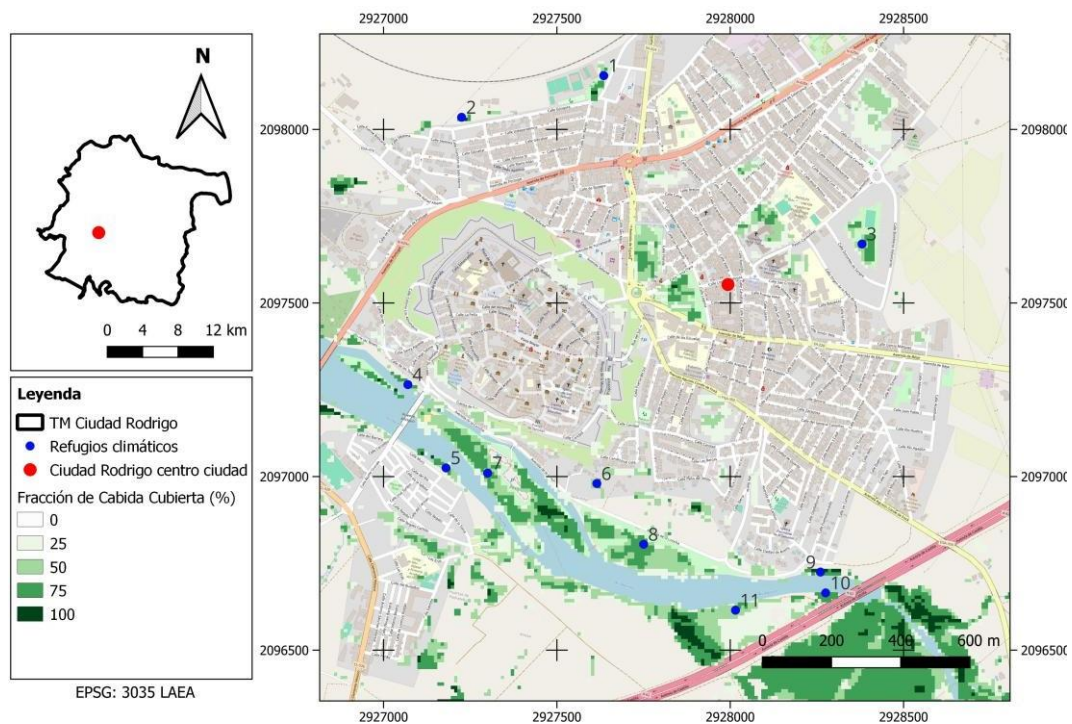


Figura 34. Mapa de los refugios climáticos en Ciudad Rodrigo.

Tabla 9. Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Coimbra.

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m ²)	Distancia (m)	TAvehículo (minutos)	TApie (minutos)
1	-8,426	40,216	59,34954	1000	1402,79	1,683	16,833
2	-8,417	40,218	61,19808	1400	1624,337	1,949	19,492
3	-8,42	40,216	61,08299	800	1609,898	1,932	19,319
4	-8,423	40,216	84,29866	1600	1743,064	2,092	20,917
5	-8,415	40,216	65,27568	1500	1771,704	2,126	21,260
6	-8,43	40,214	79,28477	4900	965,5259	1,159	11,586
7	-8,414	40,217	61,47584	2300	1470,128	1,764	17,642
8	-8,424	40,215	86,50728	41600	1725,511	2,071	20,706
9	-8,419	40,217	83,13298	121700	1609,898	1,932	19,319
10	-8,413	40,216	67,97947	800	1231,767	1,478	14,781
11	-8,412	40,216	59,16836	1900	1231,767	1,478	14,781
12	-8,426	40,213	58,93818	600	676,674	0,812	8,120
13	-8,425	40,213	73,03472	700	536,1477	0,643	6,434
14	-8,421	40,213	73,91186	800	1470,699	1,765	17,648
15	-8,419	40,214	64,01398	700	1171,939	1,406	14,063
16	-8,423	40,213	79,2496	2000	1448,374	1,738	17,380
17	-8,413	40,215	51,03456	900	1142,335	1,371	13,708
18	-8,421	40,213	60,38087	700	564,1642	0,677	6,770
19	-8,416	40,214	63,42494	6300	1172,723	1,407	14,073

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m ²)	Distancia (m)	TAvehículo (minutos)	TApie (minutos)
20	-8,422	40,212	52,57412	700	1553,644	1,864	18,644
21	-8,425	40,211	65,89543	700	421,2255	0,505	5,055
22	-8,41	40,214	54,28216	800	1437,676	1,725	17,252
23	-8,425	40,211	64,50074	700	886,3346	1,064	10,636
24	-8,41	40,213	58,4215	1000	1252,109	1,503	15,025
25	-8,423	40,21	79,33509	1900	251,9312	0,302	3,023
26	-8,423	40,211	76,93586	6300	251,9312	0,302	3,023
27	-8,427	40,209	67,58747	800	893,9989	1,073	10,728
28	-8,421	40,21	77,57953	800	45,46015	0,055	0,546
29	-8,413	40,212	61,81072	800	1033,911	1,241	12,407
30	-8,417	40,211	58,17765	600	804,1997	0,965	9,650
31	-8,421	40,21	76,35797	900	76,38135	0,092	0,917
32	-8,421	40,21	75,44048	2800	76,38135	0,092	0,917
33	-8,422	40,21	66,70017	2000	426,9088	0,512	5,123
34	-8,42	40,21	78,00401	900	34,029	0,041	0,408
35	-8,419	40,21	77,01716	1400	346,7821	0,416	4,161
36	-8,422	40,209	81,86055	1100	426,9088	0,512	5,123
37	-8,414	40,21	52,12123	900	880,2703	1,056	10,563

38	-8,421	40,209	65,65095	1400	426,9088	0,512	5,123
39	-8,422	40,208	85,45334	1000	362,7859	0,435	4,353
40	-8,412	40,21	57,62169	2600	1117,537	1,341	13,410
41	-8,416	40,21	73,13845	40700	732,022	0,878	8,784
42	-8,427	40,206	72,41313	1100	1793,877	2,153	21,527
43	-8,421	40,207	62,40761	600	576,8363	0,692	6,922
44	-8,409	40,209	90,03182	600	1712,013	2,054	20,544
45	-8,411	40,209	59,81437	2100	1321,233	1,585	15,855
46	-8,421	40,206	60,84875	1800	576,8363	0,692	6,922
47	-8,416	40,207	50,31365	1400	611,4585	0,734	7,338
48	-8,413	40,208	67,62004	7400	1310,832	1,573	15,730
49	-8,412	40,208	61,59401	1700	1376,022	1,651	16,512
50	-8,41	40,208	79,36276	900	2469,885	2,964	29,639
51	-8,426	40,204	67,64172	1200	1971,13	2,365	23,654
52	-8,42	40,205	78,39608	700	1057,84	1,269	12,694
53	-8,415	40,206	57,73382	8400	1166,155	1,399	13,994
54	-8,413	40,206	64,85552	3900	1116,467	1,340	13,398
55	-8,42	40,205	56,5527	1000	1057,84	1,269	12,694
56	-8,418	40,203	58,91755	1600	1170,906	1,405	14,051
57	-8,415	40,204	63,89583	3700	1497,348	1,797	17,968
58	-8,414	40,205	76,88189	21700	1322,682	1,587	15,872
59	-8,412	40,204	55,01065	1000	1668,533	2,002	20,022
60	-8,418	40,202	52,03735	1100	2190,069	2,628	26,281
61	-8,414	40,203	60,90196	800	1591,708	1,910	19,100

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
62	-8,424	40,204	81,31606	88500	2064,156	2,477	24,770
63	-8,419	40,202	52,60214	600	2190,069	2,628	26,281
64	-8,417	40,202	54,18037	700	1339,123	1,607	16,069
65	-8,416	40,202	52,9453	1500	1647,175	1,977	19,766

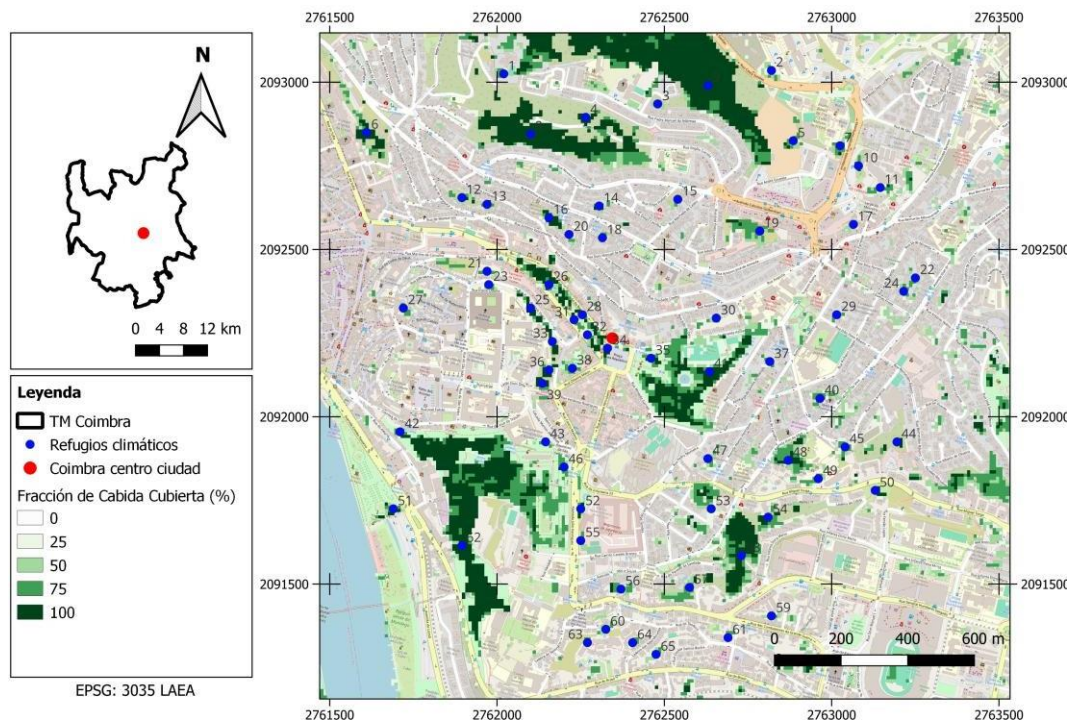


Figura 35. Mapa de los refugios climáticos en Coimbra.

Tabla 10. Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Guarda.

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m ²)	Distancia (m)	TAvehículo (minutos)	TApie (minutos)
1	-7,268	40,545	82,33743	600	2146,146	2,575	25,754
2	-7,269	40,545	89,8861	600	1480,144	1,776	17,762
3	-7,267	40,545	64,56097	700	2146,146	2,575	25,754
4	-7,266	40,545	75,81855	1100	2146,146	2,575	25,754
5	-7,265	40,545	52,58155	800	1981,799	2,378	23,782
6	-7,27	40,544	81,36731	1800	1489,921	1,788	17,879
7	-7,272	40,543	82,40052	1400	1474,909	1,770	17,699
8	-7,262	40,545	73,622	6800	2082,659	2,499	24,992
9	-7,267	40,544	67,6095	12800	1287,865	1,545	15,454
10	-7,27	40,543	87,95415	3300	1531,611	1,838	18,379
11	-7,263	40,544	56,00872	1000	1934,477	2,321	23,214
12	-7,264	40,543	83,39871	6400	1126,199	1,351	13,514
ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m ²)	Distancia (m)	TAvehículo (minutos)	TApie (minutos)
13	-7,268	40,543	58,33194	1100	1439,137	1,727	17,270
14	-7,276	40,541	60,00918	1700	1589,259	1,907	19,071
15	-7,272	40,542	62,34207	1000	1474,909	1,770	17,699
16	-7,273	40,542	73,27318	1600	1474,909	1,770	17,699
17	-7,262	40,543	72,67495	2100	1157,827	1,389	13,894
18	-7,261	40,544	75,6522	12800	1353,646	1,624	16,244
19	-7,268	40,542	64,40146	1100	778,5151	0,934	9,342
20	-7,268	40,542	71,92802	600	769,5091	0,923	9,234
21	-7,267	40,542	60,75653	1900	778,5151	0,934	9,342
22	-7,264	40,542	51,57321	1000	982,0588	1,178	11,785
23	-7,263	40,543	84,14797	1800	1063,075	1,276	12,757
24	-7,269	40,54	60,03973	1400	762,7557	0,915	9,153
25	-7,275	40,537	63,87274	900	947,7248	1,137	11,373
26	-7,276	40,537	50,65224	5400	1050,32	1,260	12,604
27	-7,273	40,537	60,2352	600	947,1159	1,137	11,365
28	-7,261	40,539	68,70543	6200	1124,472	1,349	13,494
29	-7,259	40,539	59,22464	800	1625,833	1,951	19,510
30	-7,265	40,538	61,63297	800	483,9831	0,581	5,808
31	-7,262	40,538	64,71916	800	940,9921	1,129	11,292
32	-7,273	40,536	50,13947	1100	594,8555	0,714	7,138
33	-7,269	40,536	58,98881	4000	717,5512	0,861	8,611
34	-7,271	40,535	55,32617	800	430,3102	0,516	5,164
35	-7,268	40,536	53,75004	4800	260,7026	0,313	3,128
36	-7,273	40,535	75,43393	600	600,6857	0,721	7,208
37	-7,277	40,535	63,90725	29800	1279,435	1,535	15,353
38	-7,26	40,537	72,89368	600	907,369	1,089	10,888
39	-7,275	40,534	57,12292	4100	742,3441	0,891	8,908

40	-7,257	40,537	59,11429	4200	1901,963	2,282	22,824
41	-7,256	40,536	70,5576	800	1990,174	2,388	23,882
42	-7,27	40,534	78,32359	700	540,9749	0,649	6,492
43	-7,257	40,536	64,9296	2200	1990,174	2,388	23,882
44	-7,258	40,537	79,03806	25200	1708,193	2,050	20,498
45	-7,259	40,535	57,49857	2300	1494,154	1,793	17,930
46	-7,257	40,536	76,82829	1100	1990,174	2,388	23,882
47	-7,256	40,536	63,29927	1600	2029,593	2,436	24,355
48	-7,27	40,533	89,50291	5000	687,499	0,825	8,250
49	-7,258	40,535	66,79339	600	1494,154	1,793	17,930
50	-7,258	40,535	66,9836	1000	1405,565	1,687	16,867
51	-7,273	40,533	68,59572	40600	653,6267	0,784	7,844
52	-7,267	40,533	69,21228	3500	792,3681	0,951	9,508
53	-7,272	40,532	52,49675	1300	836,1372	1,003	10,034
54	-7,27	40,532	87,86418	3000	921,0012	1,105	11,052

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
55	-7,27	40,532	50,4058	900	898,1946	1,078	10,778
56	-7,272	40,531	81,08944	2700	943,2833	1,132	11,319
57	-7,274	40,53	75,26705	24200	1173,046	1,408	14,077
58	-7,27	40,531	74,51243	22800	898,1946	1,078	10,778
59	-7,268	40,531	55,054	700	1445,613	1,735	17,347
60	-7,272	40,53	83,93189	2400	1237,379	1,485	14,849
61	-7,268	40,53	68,59856	1600	2581,063	3,097	30,973
62	-7,267	40,53	50,5709	600	1445,613	1,735	17,347
63	-7,264	40,53	59,77106	1800	1375,531	1,651	16,506
64	-7,269	40,529	75,8674	600	2581,063	3,097	30,973
65	-7,263	40,53	54,27683	1800	1241,717	1,490	14,901
66	-7,26	40,53	52,70031	800	1664,582	1,997	19,975
67	-7,265	40,529	70,32932	1400	1339,898	1,608	16,079
68	-7,269	40,528	52,88095	600	2581,063	3,097	30,973
69	-7,267	40,528	61,00329	3800	1585,419	1,903	19,025

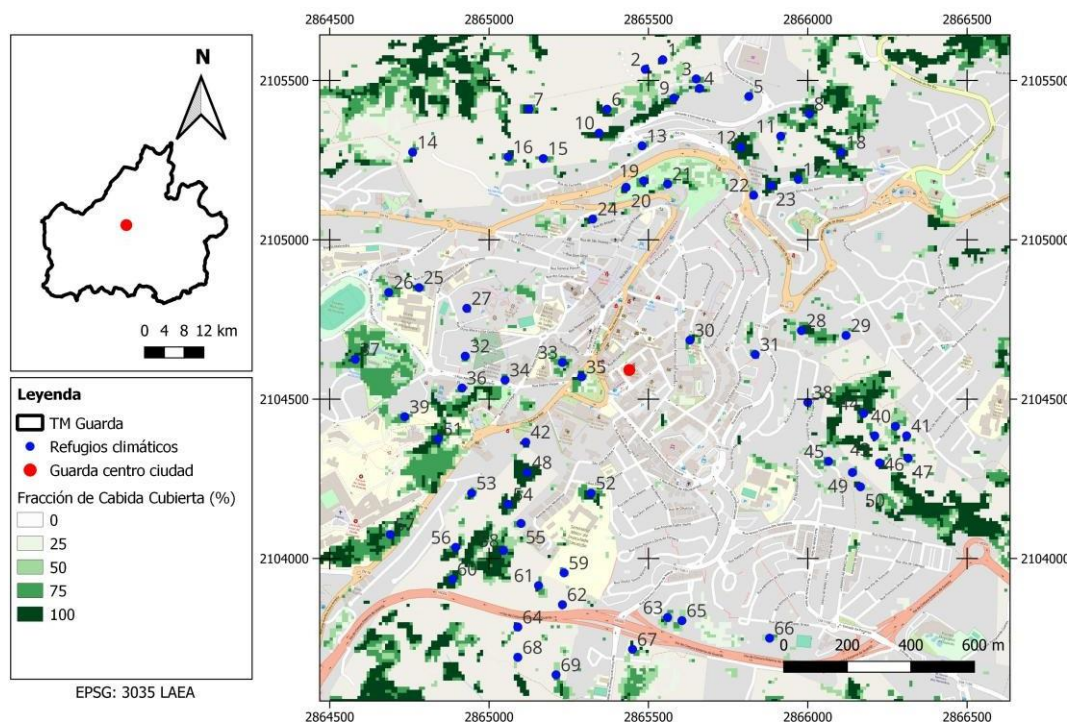


Figura 36. Mapa de los refugios climáticos en Guarda.

Tabla 11. Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Salamanca.

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
1	-5,667	40,977	62,3809	2000	1065,357	1,278	12,784
ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
2	-5,656	40,978	59,13176	3800	1328,649	1,594	15,944
3	-5,669	40,975	55,00159	1400	1264,561	1,517	15,175
4	-5,67	40,975	55,78884	2400	1359,975	1,632	16,320
5	-5,662	40,976	57,8107	700	860,827	1,033	10,330
6	-5,667	40,974	50,14949	2100	953,8816	1,145	11,447
7	-5,663	40,975	56,06412	11500	763,5406	0,916	9,162
8	-5,666	40,969	53,4031	1100	1012,977	1,216	12,156
9	-5,658	40,968	59,17856	7100	505,5767	0,607	6,067
10	-5,655	40,968	51,5884	2000	1163,022	1,396	13,956
11	-5,664	40,962	50,89344	3300	1306,535	1,568	15,678

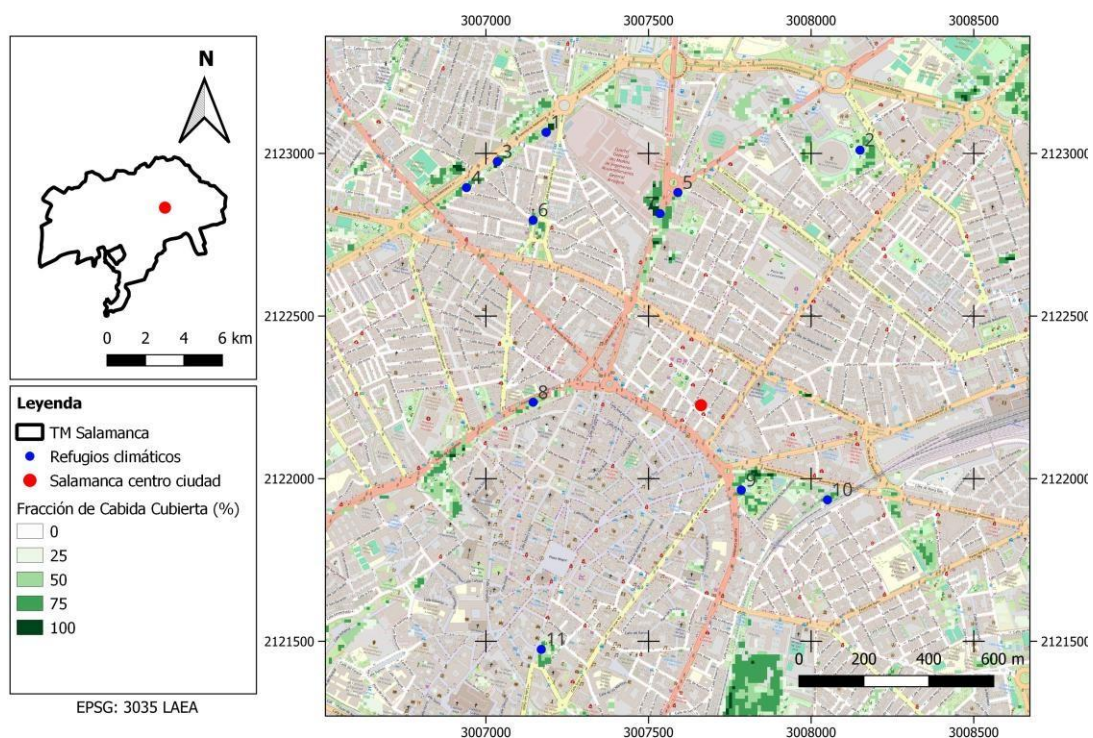


Figura 37. Mapa de los refugios climáticos en Salamanca.

Tabla 12. Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Valladolid.

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
1	-4,726	41,658	52,38453	6500	2015,621	2,419	24,187
2	-4,716	41,658	58,90253	900	1715,509	2,059	20,586
3	-4,732	41,656	50,41522	2100	1906,099	2,287	22,873
4	-4,718	41,657	57,1611	2300	1518,347	1,822	18,220
5	-4,734	41,654	54,50325	1000	2172,538	2,607	26,070
6	-4,732	41,653	55,4247	2600	1614,241	1,937	19,371
ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
7	-4,714	41,657	60,17841	19800	1355,683	1,627	16,268
8	-4,719	41,654	50,63099	14400	932,4467	1,119	11,189
9	-4,733	41,652	79,1666	1800	1565,344	1,878	18,784
10	-4,713	41,654	58,76688	2900	1448,139	1,738	17,378
11	-4,734	41,651	74,6905	700	1479,154	1,775	17,750
12	-4,733	41,651	57,54636	9900	1263,325	1,516	15,160
13	-4,714	41,651	51,51475	4400	1179,182	1,415	14,150
14	-4,729	41,647	66,07128	700	871,346	1,046	10,456
15	-4,717	41,647	56,43909	6000	1240,855	1,489	14,890
16	-4,728	41,646	69,83923	1000	974,1527	1,169	11,690
17	-4,723	41,646	67,32967	700	768,0026	0,922	9,216
18	-4,727	41,645	54,62329	1300	1175,341	1,410	14,104

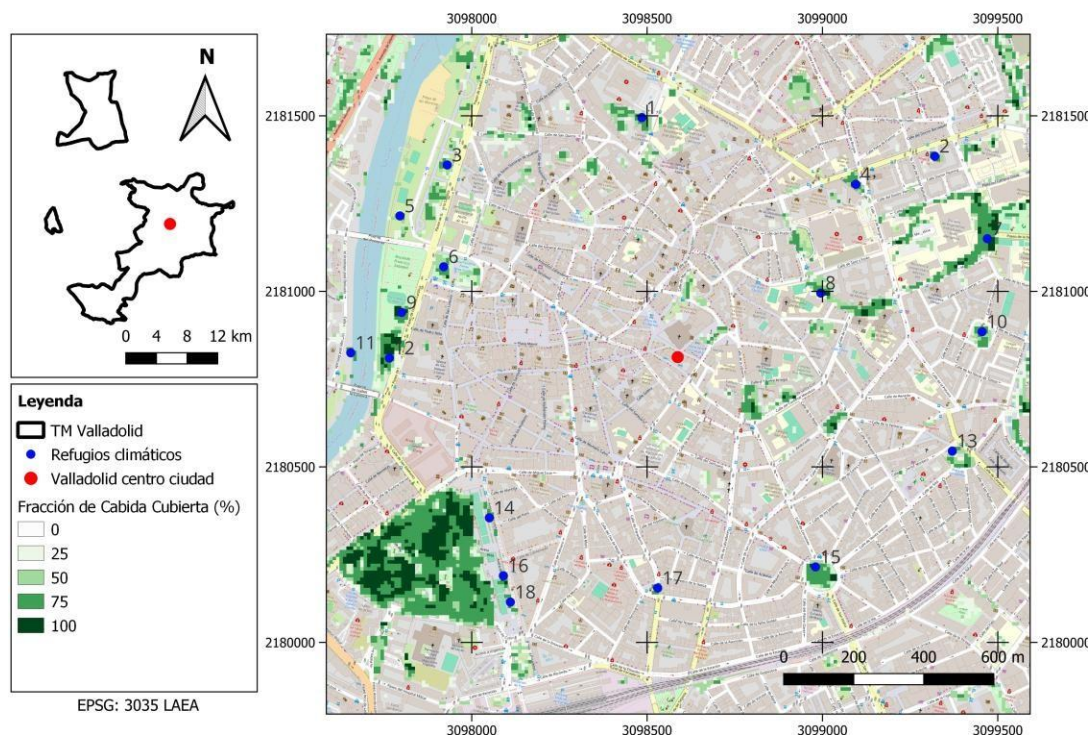


Figura 38. Mapa de los refugios climáticos en Valladolid.

Tabla 13. Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto central del Barrio Pajarillos así como los tiempos de acceso para el municipio de Valladolid.

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m ²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
1	-4,697	41,651	52,7231517	4700	1286,192	1,543	15,434
2	-4,706	41,645	52,5724216	1100	760,480	0,913	9,126
3	-4,711	41,643	54,8214874	17000	1723,994	2,069	20,688
4	-4,697	41,638	62,9475914	800	1004,652	1,206	12,056

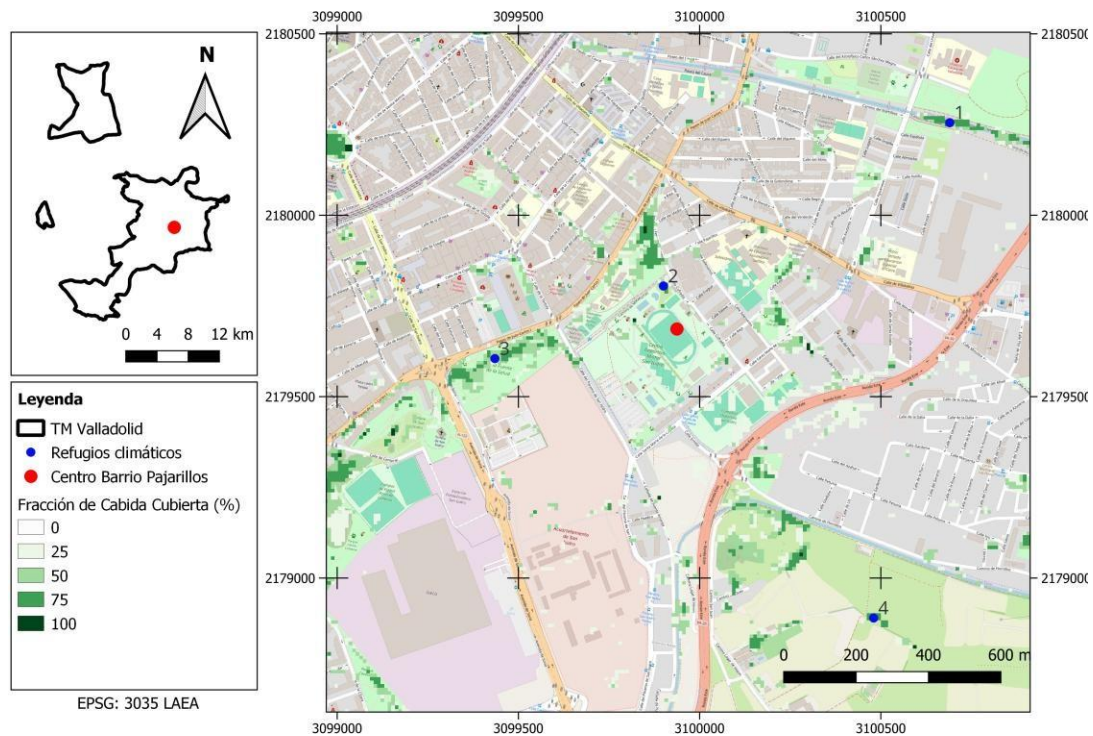


Figura 39. Mapa de los refugios climáticos referidos al punto central de Barrio Pajarillos en Valladolid.

Tabla 14. Ubicación de los refugios climáticos, su FCC y área, y distancia entre los refugios climáticos y el punto con mayor carga térmica así como los tiempos de acceso para el municipio de Viseu.

ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
1	-7,914	40,667	79,77319	3900	1273,595	1,528	15,283
2	-7,907	40,667	70,37199	1800	1421,5	1,706	17,058
3	-7,913	40,666	72,78196	5900	1095,001	1,314	13,140
4	-7,92	40,664	89,12958	1300	2662,962	3,196	31,956
5	-7,921	40,664	89,95661	1100	2662,962	3,196	31,956
6	-7,921	40,663	74,47868	4000	1434,334	1,721	17,212
7	-7,917	40,663	77,72013	1500	1310,171	1,572	15,722
8	-7,921	40,662	55,66975	600	1524,715	1,830	18,297
9	-7,919	40,663	56,17445	600	1285,05	1,542	15,421
10	-7,918	40,662	76,73092	800	1257,264	1,509	15,087
11	-7,905	40,665	91,60505	900	1497,698	1,797	17,972
12	-7,909	40,664	54,91032	700	896,9971	1,076	10,764
13	-7,913	40,663	56,40698	1100	1156,091	1,387	13,873
14	-7,915	40,663	50,11201	4900	1367,327	1,641	16,408
15	-7,92	40,661	59,06016	4200	1281,78	1,538	15,381
16	-7,918	40,661	69,17785	1300	1144,389	1,373	13,733
17	-7,908	40,663	78,73153	2100	983,7334	1,180	11,805
18	-7,913	40,661	54,25086	3400	356,7346	0,428	4,281
ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
19	-7,922	40,659	64,98378	1200	1301,546	1,562	15,619
20	-7,911	40,661	63,78355	3300	676,1476	0,811	8,114
21	-7,906	40,662	51,36202	700	1111,944	1,334	13,343
22	-7,913	40,66	51,12563	800	356,7346	0,428	4,281
23	-7,902	40,662	88,29169	700	1365,044	1,638	16,381
24	-7,911	40,66	54,28123	2400	279,9041	0,336	3,359
25	-7,922	40,658	63,68919	3200	1498,971	1,799	17,988
26	-7,906	40,661	84,52912	2700	1072,183	1,287	12,866
27	-7,923	40,657	79,90045	1300	2085,408	2,502	25,025
28	-7,909	40,659	64,90352	2500	538,9644	0,647	6,468
29	-7,921	40,658	75,7157	1000	1319,23	1,583	15,831
30	-7,907	40,66	79,10115	1200	786,046	0,943	9,433
31	-7,92	40,658	60,61039	2800	1225,384	1,470	14,705
32	-7,907	40,66	89,93065	1500	743,8829	0,893	8,927
33	-7,901	40,661	69,09936	800	1483,417	1,780	17,801
34	-7,902	40,66	81,96585	1600	1483,417	1,780	17,801
35	-7,92	40,657	50,25848	1500	1242,241	1,491	14,907
36	-7,906	40,659	58,67867	2500	924,2081	1,109	11,090
37	-7,91	40,658	76,44203	8800	330,7435	0,397	3,969
38	-7,922	40,656	64,69429	700	1602,581	1,923	19,231
39	-7,923	40,655	58,09647	800	1834,949	2,202	22,019
40	-7,906	40,659	57,84643	600	1146,291	1,376	13,755

41	-7,914	40,657	64,2496	1300	821,5375	0,986	9,858
42	-7,904	40,659	83,27397	9200	937,5147	1,125	11,250
43	-7,921	40,656	61,24885	600	1353,82	1,625	16,246
44	-7,909	40,658	71,8161	1300	647,5589	0,777	7,771
45	-7,915	40,656	74,19134	2000	1041,647	1,250	12,500
46	-7,92	40,655	61,35687	1900	1237,14	1,485	14,846
47	-7,914	40,656	57,70369	3200	1041,647	1,250	12,500
48	-7,91	40,656	50,41087	700	727,6374	0,873	8,732
49	-7,915	40,655	71,78578	19000	935,2984	1,122	11,224
50	-7,913	40,655	68,11116	900	1000,871	1,201	12,010
51	-7,907	40,656	80,05293	1300	1218,626	1,462	14,624
52	-7,916	40,654	56,07504	2200	1122,188	1,347	13,466
53	-7,91	40,655	69,563	1100	935,3985	1,122	11,225
54	-7,916	40,653	63,50072	4000	1204,873	1,446	14,458
55	-7,916	40,653	67,31955	600	1239,857	1,488	14,878
56	-7,915	40,653	57,4876	1200	1078,08	1,294	12,937
57	-7,919	40,652	62,58469	1200	1557,633	1,869	18,692
58	-7,916	40,652	57,45806	1400	1301,913	1,562	15,623
59	-7,91	40,654	79,45161	19100	1148,948	1,379	13,787
60	-7,916	40,651	54,76439	2900	1558,784	1,871	18,705
ID	Longitud	Latitud	FCC (%)	Área (m²)	Distancia (m)	TA _{vehículo} (minutos)	TA _{pie} (minutos)
61	-7,907	40,652	74,82669	1500	1458,256	1,750	17,499
62	-7,909	40,651	84,04604	600	1462,455	1,755	17,549

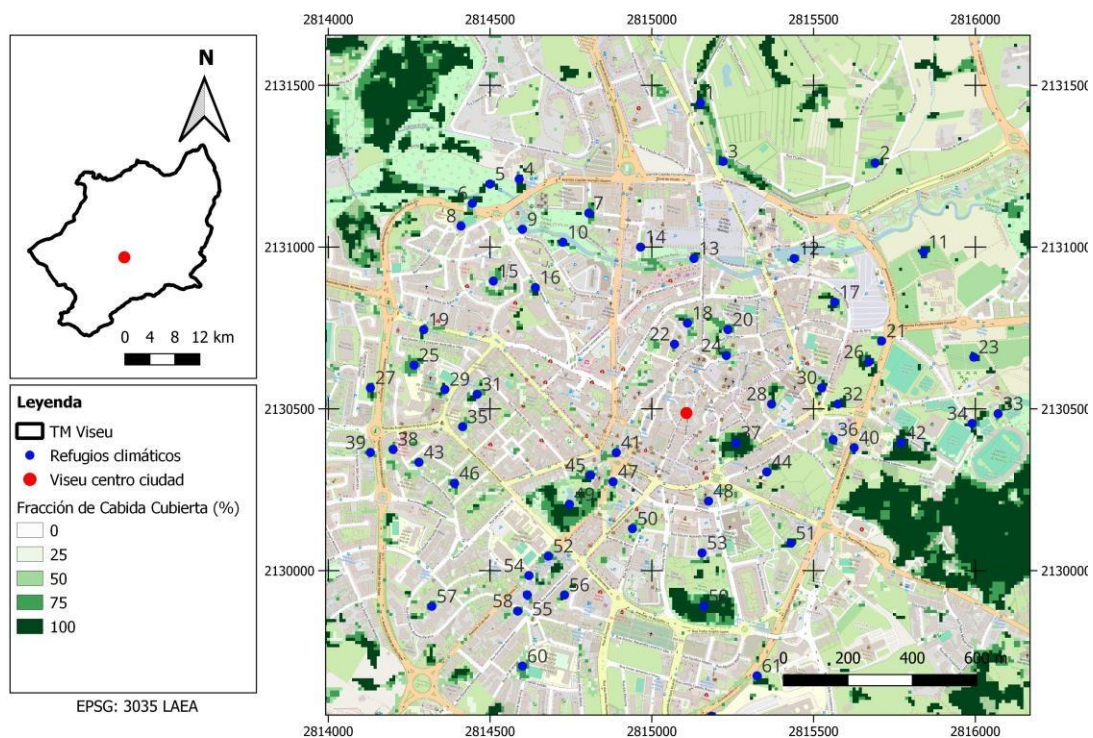


Figura 40. Mapa de los refugios climáticos en Viseu.

7. MATRIZ DE RIESGOS CLIMÁTICOS

En esta sección del documento se presenta tanto la metodología como los resultados de la definición de matrices riesgo/impacto climático utilizadas para la caracterización del efecto de los peligros climáticos relacionados con el aumento de las temperaturas.

7.1. METODOLOGÍA

El análisis de peligros climáticos, está basado en la caracterización de la probabilidad de excedencia de un evento, considerando los umbrales establecidos para cada uno de los peligros climáticos identificados como relevantes para el estudio. A continuación, se definen los umbrales definidos por peligro climático:

- **Días cálidos:** Número de días en los que la temperatura media supera el percentil 90 para el periodo histórico de referencia.
- **Días muy cálidos:** Número de días en los que la temperatura media de las máximas supera 25 °C.
- **Olas de calor:** Se ha definido como al menos 5 días consecutivos en los que la temperatura media de las máximas supera el percentil 90 para el periodo histórico de referencia.

Los datos climáticos futuros, se han obtenido de los modelos climáticos empleados en el Proyecto de intercomparación de modelos de clima acoplados fase 6 (CMIP6 en sus siglas en inglés, Coupled Model Intercomparison Project phase 6), según dos escenarios climáticos futuros de entre los empleados en el IPCC-AR6. Los datos de los modelos climáticos, se han obtenido a través del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S, Copernicus Climate Change Service¹²).

Partiendo de los escenarios definidos en el IPCC-AR6, para los municipios objeto de estudio, se han evaluado la temperatura media y media de las máximas para los escenarios SSP2-4.5 (definido como a mitad del camino, con un forzamiento radiativo de 4,5 W/m² a 2100 y contención del desarrollo económico) y SSP5-8.5 (definido como un escenario con desarrollo basado en los combustibles fósiles, y que conseguirá un forzamiento radiativo de 8,5 W/m² a 2100), utilizando la media de los resultados de cinco modelos climáticos (lo cual nos permite reducir el sesgo de los datos de los modelos) y comparando los resultados con el escenario histórico (al menos 30 años, utilizando el periodo 1985-2014 como referencia en el histórico ya que se corresponde con las simulaciones de los modelos en el periodo histórico). El análisis de estas variables, nos permite definir la probabilidad de excedencia del umbral por peligro climático para cada uno de los escenarios climáticos. Hay que tener en cuenta, que dado que el objetivo es la caracterización del riesgo para mejorar la adaptación de los municipios frente a los efectos del aumento de las temperaturas, carece de sentido evaluar el riesgo frente a escenarios más favorables que los seleccionados ya que de este modo, estaríamos evaluando escenarios menos realistas a tenor de las concentraciones actuales de CO₂ en la atmósfera.

Los modelos seleccionados para la obtención de las variables climáticas que se utilizarán en la caracterización de los peligros climáticos futuros, son:

- BCC-CSM2-MR (China): resolución nominal de 100 km en superficie terrestre.
- GFDL-ESM4 (Estados Unidos): resolución nominal de 100 km en superficie terrestre.
- MPI-ESM1-2-LR (Alemania): resolución nominal de 250 km en superficie terrestre.
- MRI-ESM2-0 (Japón): resolución nominal de 100 km en superficie terrestre.
- NorESM2-MM (Noruega): resolución nominal de 100 km en superficie terrestre.

Los resultados de estos modelos, se han sometido a un proceso de reducción de escala mediante métodos estadísticos. El método utilizado para obtener datos climáticos a escala local, ha sido el mapeo de cuantiles (Quantile Mapping, QM), el cual resulta muy adecuado para el tratamiento de las temperaturas. El mapeo de cuantiles, es un enfoque de reciente aplicación en la corrección de sesgos que ha ganado popularidad en la

¹² <https://climate.copernicus.eu/>

ciencia climática a lo largo de los últimos años (Thrasher et al., 2012)¹³. El método, está motivado por la necesidad de caracterizar los sesgos sobre toda la distribución de la variable climática, lo cual hace que el método QM mejore las estimaciones obtenidas con otros métodos más simples. De forma más precisa, los métodos de mapeo de cuantiles, utilizan la relación cuantil-cuantil para hacer converger la función de distribución de las variables simuladas a la observada y así obtener las variables climáticas corregidas para el escenario futuro objeto de análisis.

Para obtener datos climáticos locales mediante el proceso de reducción de escala, se han empleado los datos de temperatura locales de la red europea de evaluación del clima disponibles de forma geolocalizada a través del Servicio de Cambio Climático de Copernicus¹⁴. Los datos obtenidos, cubren un periodo de 30 años para la serie histórica 1985-2014. Al disponer de una serie de 30 o más años, los datos seleccionados, nos permiten la implementación del método QM entre periodos históricos y futuros. Las variables que se han considerado en cada escenario climático son:

- **Temperatura media:** Temperatura del aire a 2 metros sobre el suelo, media diaria.
- **Temperatura máxima:** Temperatura del aire a 2 metros sobre el suelo, media de la máxima diaria.

7.1.1. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS

La identificación de impactos, establece la valoración económica de los daños y pérdidas ocasionados en los últimos tres años como consecuencia de los cambios en el clima (eventos extremos y aumentos de temperaturas). El análisis, se centrará sobre todo en la cuantificación del impacto en la biodiversidad y la vegetación. A continuación, se detallará el proceso de cálculo del impacto asociado a sequías y olas de calor, vientos extremos, inundaciones e incendios.

7.1.1.1. Impactos de las sequías y olas de calor en la vegetación

Para calcular el impacto de las sequías y olas de calor sobre la vegetación, se ha definido una metodología basada en comprender como el aumento de las temperaturas y los cambios en la concentración de CO₂ en la atmósfera generan impactos sobre el aumento de biomasa de la vegetación. Este aumento de biomasa, se caracterizará a partir de la Producción Primaria Neta (NPP), la cual representa la energía fijada por fotosíntesis menos la energía empleada en la respiración. Si su valor es positivo, la biomasa del ecosistema aumentaría por lo que la vegetación se estaría desarrollando y por lo tanto el ecosistema estaría en condiciones óptimas. Si el incremento de la NPP es negativo, estaríamos en una situación de degradación del ecosistema que vendría ocasionado por factores como la sequía, temperaturas extremadamente altas así como cambios de gran magnitud asociados a incendios o tratamientos silvícolas. Para determinar la variación en la NPP, se empleará la siguiente ecuación:

$$\Delta NPP \left(\frac{g}{m^2} \cdot día \right) = [a + b \cdot \Delta T(^{\circ}C) + c \cdot \Delta T^2(^{\circ}C) + a_1 \frac{\Delta CO_2}{\Delta CO_2 + b_1}]$$

Donde ΔNPP ($g/m^2 \cdot día$) representa el aumento o no de la Producción Primaria Neta para cada tipo de bosque. Los coeficientes a , b , c , a_1 y b_1 son los valores obtenidos del ajuste entre las temperaturas obtenidas de los modelos climáticos, la concentración de CO₂ futura para los mismos escenarios simulada con el modelo WILLIAM¹⁵ y la Producción Primaria Neta obtenida de la base de datos de ISIMIP¹⁶ a partir de datos del modelo LPJmL¹⁷. Los coeficientes, se ha obtenido por región y tipo de bosque (Tabla 15). T, representa la temperatura

¹³ Thrasher B., Maurer E.P., McKellar C., Duffy P.B. Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2012; 16: 3309–3314. doi: 10.5194/hess-16-3309-2012

¹⁴ <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/insitu-gridded-observations-europe?tab=overview>

¹⁵ https://github.com/LOCOMOTION-h2020/WILLIAM_model_VENSIM

¹⁶ <https://www.isimip.org/>

¹⁷ <https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/activities/biosphere-water-modelling/lpjml>

en grados centígrados mientras que ΔCO_2 es el cambio en la concentración de CO_2 entre periodos de cálculo expresada en partes por millón (ppm).

Tabla 15. Coeficiente de ajuste de la ecuación para cuantificar el cambio en la concentración de CO_2 .

Tipo de bosque	Región de Köppen	a	b	c	R2	a ₁	b ₁	R2
Hoja ancha - perenne	Climas Templados	0,28639	-0,03491	0,00070	0,91499	0,07744	98,50087	0,93311
Hoja ancha - caduca	Climas Templados	0,08529	0,01341	-0,00161	0,12755	0,24635	768,02019	0,91749
Hoja acicular - perenne	Climas Templados	0,22092	-0,01822	0,00094	0,46295	0,35027	1053,21765	0,98009

Para cuantificar el impacto del cambio en el clima sobre la vegetación, se ha empleado la ecuación descrita con anterioridad en la cual se han integrado para cada municipio los valores correspondientes al periodo 2021-2023 que se incluyen en la Tabla 16. Además, para poder transformar los cambios en el aumento o disminución de la Producción Primaria Neta del arbolado a unidades económicas, se han empleado los datos de la Tabla 17 donde se incluyen valores de referencia de densidad de la madera por tipología de bosque arbolado, precio de la madera y Producción Primaria Neta por tipología de bosque.

Tabla 16. Valores de temperatura media anual (Tmed, °C) y concentración de CO_2 (ppm) por municipio.

Año	CO2 media (ppm)	Tmed Almeida (°C)	Tmed Aveiro (°C)	Tmed Ciudad Rodrigo (°C)	Tmed Coímbra (°C)	Tmed Guarda (°C)	Tmed Salamanca (°C)	Tmed Valladolid (°C)	Tmed Viseu (°C)
1985-2014	414,8	13,65	15,61	13,29	14,96	12,41	12,57	12,66	14,16
2021	417,2	13,89	15,39	14,29	15,46	12,94	13,76	13,52	13,78
2022	419,7	15,25	16,28	15,61	16,37	14,32	14,97	14,73	14,89
2023	421,5	14,77	16,44	15,13	16,58	13,85	14,55	14,41	14,69

Tabla 17. Densidad y precio de la madera utilizados para la cuantificación.

Tipo de bosque	Densidad (kg/m3)	€/m3
Hoja ancha -perenne	650	25,4
Hoja ancha -caduca	650	
Hoja acicular - perenne	500	

Finalmente, se dispone de los datos de superficie arbolada en cada uno de los municipios (Tabla 18). Este dato, es necesario para poder cuantificar el impacto del cambio del cambio climático en las masas arboladas de los municipios.

Tabla 18. Superficie arbolada (ha) por municipio y tipología de bosque.

Municipio	Área arbolado total (ha)	Área arbolado hoja caduca (ha)	Área arbolado hoja perenne (ha)
Almeida	11563,06	11405,17	157,89
Aveiro	3708,9	3339,02	369,88
Ciudad Rodrigo	10528,53	9895,13	633,40
Coímbra	13523,33	13027,02	496,31
Guarda	22965,17	19553,95	3411,22
Salamanca	229,01	166,70	62,31

Valladolid	3563,23	1265,11	2298,12
Viseu	23489,35	16944,84	6544,51

7.1.1.2. Impactos de los vientos extremos en la vegetación

El viento y sus eventos extremos, pueden generar impactos muy visibles sobre el arbolado. Tras eventos de viento de magnitudes importantes, la caída de arbolado suele ser frecuente generando pérdida de arbolado (impacto directo) y daños sobre los elementos del entorno (impactos indirectos). Para cuantificar los impactos generados por vientos extremos en el periodo 2021-2023, el punto de partida es conocer la superficie arbolada en el entorno urbano. Para ello, se han delimitado las áreas edificadas generando una superficie continua sobre la que medir la superficie arbolada, diferenciándola entre arbolado de hoja caduca y perenne con sus dos tipologías. Los resultados se incluyen en la Tabla 19.

Tabla 19. Superficie arbolada (ha) por municipio en el entorno urbano.

Municipio	Área arbolado urbano total (ha)	Área arbolado urbana hoja caduca (ha)	Área arbolado urbana hoja perenne (ha)
Almeida	89,35	88,68	0,67
Aveiro	985,43	932,97	52,46
Ciudad Rodrigo	98,26	94,92	3,34
Coimbra	3179,13	3108,64	70,49
Guarda	980,64	937,25	43,39
Salamanca	155,28	124,33	30,95

Para cuantificar el impacto, se considerarán los días con una velocidad media del viento superior a 8 m/s, que se corresponderían con aquellos en los que hubo eventos extremos de viento. En cada municipio, se han definido estos días empleando los datos agrometeorológicos obtenidos de Copernicus C3S¹⁸. Los resultados obtenidos, se muestran en la Tabla 20. El impacto, se cuantificará empleando datos de un evento climático ocurrido en el municipio de Valladolid en el año 2019. Este evento, generó la caída de 68 árboles, con un coste económico directo medio de 125000 € e indirecto de 35000 €, lo que supone un coste total de 1941 € por árbol. Suponiendo la superficie arbolada de Valladolid y el número de árboles afectado en el evento de 2019, se ha trasladado esta proporción al resto de municipio a partir de la superficie arbolada en el entorno urbano para cada uno de ellos.

Tabla 20. Número de días por municipio con velocidad del viento por encima de los 8 m/s.

Ciudad	Número eventos/año		
	2021	2022	2023
Almeida	2	2	4
Aveiro	0	0	2
Ciudad Rodrigo	1	0	1
Coimbra	0	0	0
Guarda	2	1	3
Salamanca	0	0	4
Valladolid	1	0	3
Viseu	0	0	3

Finalmente, se ha aplicado un coeficiente corrector en función del número de eventos en el año, de modo que el primero, generará una caída del 100% el arbolado, el segundo un 30%, el tercero un 20% y el cuarto un 10%

¹⁸ <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/sis-agrometeorological-indicators?tab=overview>

respecto al arbolado que se vería afectado en un evento único. De este modo, se incluye en la cuantificación el efecto de que en cada evento, no se ve afectado un número similar de árboles sino que cada evento recurrente afecta un número menor que el anterior.

7.1.1.3. Impactos de las inundaciones en la vegetación

El impacto de las inundaciones en la vegetación depende de varios factores, como la duración del evento, la frecuencia de las inundaciones, el tipo de vegetación afectada y las características del suelo. Entre los efectos que podría generar, cabe destacar los siguientes: (i) estrés y muerte por encharcamiento, (ii) cambios en la estructura del suelo como consecuencia del arrastre de materiales, (iii) pérdida de diversidad por las fluctuaciones en el nivel de agua y (iv) plagas, enfermedades y daños asociados. La cuantificación del impacto, resulta compleja ya que se produce en un intervalo de tiempo corto (duración del evento de inundación) y la vegetación puede recuperarse del estrés ocasionado tras el evento.

Tras revisar y analizar diferentes bases de datos como HANZE¹⁹, no se dispone de datos actualizados de registros de inundaciones para el periodo 2021-2023. La base de datos anteriormente citada, incluye resultados hasta 2020. Además, tras consultar los últimos años, no aparecen registros en esta base de datos de eventos de inundación (HANZE) en las áreas objeto de estudio. Por ello, no se han podido evaluar ni cuantificar aquellos eventos asociados a inundaciones con daños a vegetación.

7.1.1.4. Impactos de las incendios en la vegetación

La evaluación del impacto asociado a un incendio, requiere cuantificar el impacto tanto directo como indirecto ocasionado por el incendio. El impacto directo, considera el valor del arbolado quemado y la disminución en el stock de carbono, mientras que el impacto indirecto integra los costes de reposición de la masa arbolada (plantación, mantenimiento y restauración del suelo). Dado que los impactos más grandes, vienen ocasionados por la pérdida de arbolado, se cuantificará el impacto asociado a los incendios en los últimos años considerando la superficie arbolada quemada en este periodo, cuantificando tanto los costes directos como indirectos. Los costes y variables utilizadas para cuantificar el impacto se definen en la Tabla 21.

Tabla 21. Variables y costes empleados en la cuantificación del impacto de los incendios.

Tipo de coste	Variable	Coste	Unidades	Coste total
Directo	Densidad promedio	150	Árboles/ha	4650 €/ha
	Valor promedio	30	€/árbol	
	Perdidas de carbono almacenado	5	tCO ₂ /ha	
	Precio del carbono almacenado	30	€/tCO ₂	
Indirecto	Plantación	1500	€/ha	4200 €/ha
	Mantenimiento (5 años)	500	€/ha-año	
	Restauración suelos (pedidas)	200	€/ha	

Una vez definidos los costes, es necesario conocer el área afectada por incendios en los últimos tres años. Las áreas afectadas, se han obtenido de las estadísticas recopiladas anualmente para cada municipio. En el caso de los municipios españoles, se han empleado datos del portal de Datos Abiertos de la Junta de Castilla y León²⁰. Para los municipios portugueses, los datos utilizados se han extraído de las Portal de Estadísticas Forestales de Portugal²¹. Se dispone de datos de superficie arbolada afecta por incendios para cada uno de los municipios y concejos.

La Tabla 22 y la Tabla 23, muestran las superficies arboladas afectas por incendios en cada uno de los municipios españoles y concejos portugueses objeto de estudio.

¹⁹ HANZE

²⁰ Portal Datos Abiertos Junta de Castilla y León.

²¹ <https://www.icnf.pt/florestas/gfr/gfrgestaoinformacao/estatisticas>

Tabla 22. Superficie afectada por incendios según tipología de uso para los municipios españoles.

Municipio	Año	Arbolado (ha)	Pasto (ha)	Agrícola (ha)	Otras (ha)	Total (ha)
Ciudad Rodrigo	2021	1,44	1	0	0	2,44
	2022	0	0	0	0,06	0,06
	2023	0	0	0	0	0
Salamanca	2021	0	0,19	0	0	0,19
	2022	0	25,72	0	0	25,72
	2023	0,01	1,41	0	0	1,42
Valladolid	2021	0	53,93	13,16	10,57	77,66
	2022	0	0	0	0	0
	2023	1,42	0	0	1	2,42

Tabla 23. Pérdida de superficie arbolada total y como consecuencia de incendios para los municipios portugueses.

Municipio	Año	Arbolado (ha)	Total (ha)
Almeida	2021	36,24	71,57
	2022	46,98	126,22
	2023	2,23	2,23
Aveiro	2021	1,94	4,48
	2022	13,43	14,02
	2023	110,90	115,51
Coimbra	2021	0,00	3,41
	2022	1,77	4,68
	2023	143,72	146,29
Guarda	2021	3,02	30,74
	2022	1064,16	3217,40
	2023	67,46	67,46
Viseu	2021	2,62	8,20
	2022	20,32	43,83
	2023	76,86	89,11

La Figura 41 muestra los valores de superficie arbolada afectada por municipio y concejo, para el periodo 2021-2023. Las superficies arboladas afectadas en los concejos portugueses son muy grandes comparadas con las de los municipios españoles lo que hace complicada su comparación a través de un único gráfico tal y como puede verse en la figura. A partir de los datos de superficie afectada y los costes tanto directos como indirectos asociados a la reposición del arbolado, podemos determinar el impacto total como consecuencia de los incendios en cada uno de los años objeto de estudio.

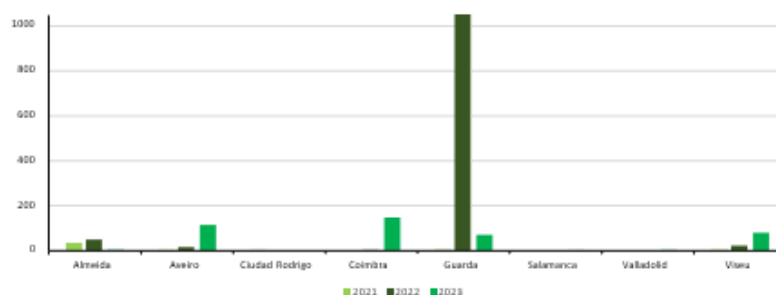


Figura 41. Comparativa de la superficie arbolada afectada por incendios en los municipios y concejos analizados.

7.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE LOS PELIGROS CLIMÁTICOS

Una vez obtenidas las variables climáticas por escenario climático, es necesario desarrollar el análisis de la probabilidad de excedencia de cada una de los peligros climáticos identificados en los municipios objeto de estudio. Para ello, se han ajustado las curvas de distribución y calculado la probabilidad de excedencia a partir de la función de distribución acumulativa (CDF).

$$P = 1 - F$$

Donde P es probabilidad de excedencia para el peligro climático según el umbral definido y F representa la función acumulativa de distribución para el umbral de referencia. La definición de estas probabilidades, para cada uno de los peligros identificados, nos permitirá obtener la primera de las dos variables requeridas para la elaboración de la matriz riesgo-impacto. La probabilidad de excedencia, se calculará para peligros climáticos relacionados con el aumento de las temperaturas. Estos peligros, se definirán a partir de la evaluación de las variables: días muy cálidos, días cálidos y olas de calor.

7.1.3. MATRIZ DE RIESGOS

Una matriz de riesgo climático es una herramienta que permite evaluar y visualizar el nivel de riesgo asociado a los impactos del cambio climático sobre diferentes sectores, territorios o comunidades. La Tabla 24, muestra un ejemplo de matriz de riesgos en la que se relacionan la probabilidad de ocurrencia frente al impacto, lo cual permite definir el nivel de riesgo.

Tabla 24. Matriz de riesgos

Nivel de riesgo		Impacto				
		Insignificante	Leve	Moderado	Grave	Catastrófico
Probabilidad	Raro	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Alto
	Improbable	Bajo	Moderado	Moderado	Alto	Muy alto
	Moderado	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Muy alto
	Probable	Moderado	Alto	Alto	Muy alto	Extremo
	Casi Seguro	Moderado	Alto	Muy alto	Extremo	Extremo

Una vez caracterizada de forma numérica la probabilidad de excedencia de los principales peligros climáticos relacionados con el aumento de las temperaturas, será necesario trasladarla a valores cuantitativos para proceder a la caracterización de la matriz de riesgos. La transformación en valores cualitativos, se realizará a partir de los siguientes intervalos:

- Raro: $\leq 20\%$
- Improbable: $>20\%$ y $\leq 40\%$
- Moderado: $>40\%$ y $\leq 70\%$
- Probable: $>70\%$ y $\leq 90\%$
- Casi seguro: $>90\%$

Por su parte, los impactos serán considerados insignificantes, leves, moderados, graves o catastróficos teniendo en cuenta el número de activos afectados y los daños ocasionados sobre los mismos en los eventos ocurridos en los años históricos analizados (periodo 2021-2023).

7.2. RESULTADOS

Conocer el impacto, es un paso fundamental en la caracterización del riesgo ya que nos permite conocer en que magnitud se verán afectados los territorios objeto de estudio. El impacto junto con la probabilidad de excedencia de los eventos, constituyen las dos entradas de la matriz para la caracterización del riesgo. En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en la caracterización del riesgo en cada uno de los municipios objeto de estudio.

7.2.1. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los impactos asociados al aumento de las temperaturas. Para su cuantificación, se ha seguido la metodología desarrollada en la sección anterior por cada uno de los impactos.

7.2.1.1. Impactos económicos de las sequías y olas de calor en la vegetación

A continuación (Tabla 25) se muestran los resultados de la evaluación del impacto de las sequías y olas de calor, analizadas a partir de las variaciones en la Producción Primaria Neta del arbolado, en los últimos tres años (periodo 2021-2023) respecto al histórico de referencia (1985-2015). Las variaciones, se han analizado por municipio, año y tipología de la superficie arbolada (caduca, perenne hoja ancha o perenne hoja acicular) y se han representado (Figura 42 y Figura 43) para visualizar de forma rápida y sencilla los cambios en la producción del ecosistema. Hay que tener en cuenta, que valores negativos representarían un retroceso en el ecosistema.

Tabla 25. Cambios estimados en la Producción Primaria Neta (kg C/ha) y estimación de los costes ocasionados.

Municipio	Año	Hoja ancha -perenne	Hoja ancha -caduca	Hoja acicular - perenne
Almeida (kg C/ha)	2021	1021,61	325,52	793,50
	2022	883,75	369,92	725,29
Municipio	Año	Hoja ancha -perenne	Hoja ancha -caduca	Hoja acicular - perenne
Aveiro (kg C/ha)	2023	1112,15	288,56	841,25
	2021	1080,20	303,06	824,06
	2022	940,94	353,13	752,92
Ciudad Rodrigo (kg C/ha)	2023	1030,07	321,09	797,99
	2021	927,18	357,18	746,19
	2022	888,58	368,60	727,58
Coimbra (kg C/ha)	2023	1112,15	288,56	841,25
	2021	988,97	337,11	776,87
	2022	938,48	353,90	751,71
Guarda (kg C/ha)	2023	1023,75	323,43	794,72
	2021	985,23	338,40	774,98
	2022	881,34	370,58	724,15
Salamanca (kg C/ha)	2023	1110,85	289,11	840,55
	2021	904,03	364,03	734,98
	2022	901,88	364,85	733,94
Valladolid (kg C/ha)	2023	1104,36	291,82	837,08
	2021	944,35	351,86	754,61
	2022	901,88	364,85	733,94

	2023	1091,43	297,15	830,17
Viseu (kg C/ha)	2021	1100,84	294,66	835,03
	2022	914,03	361,32	739,79
	2023	1075,98	303,39	821,98

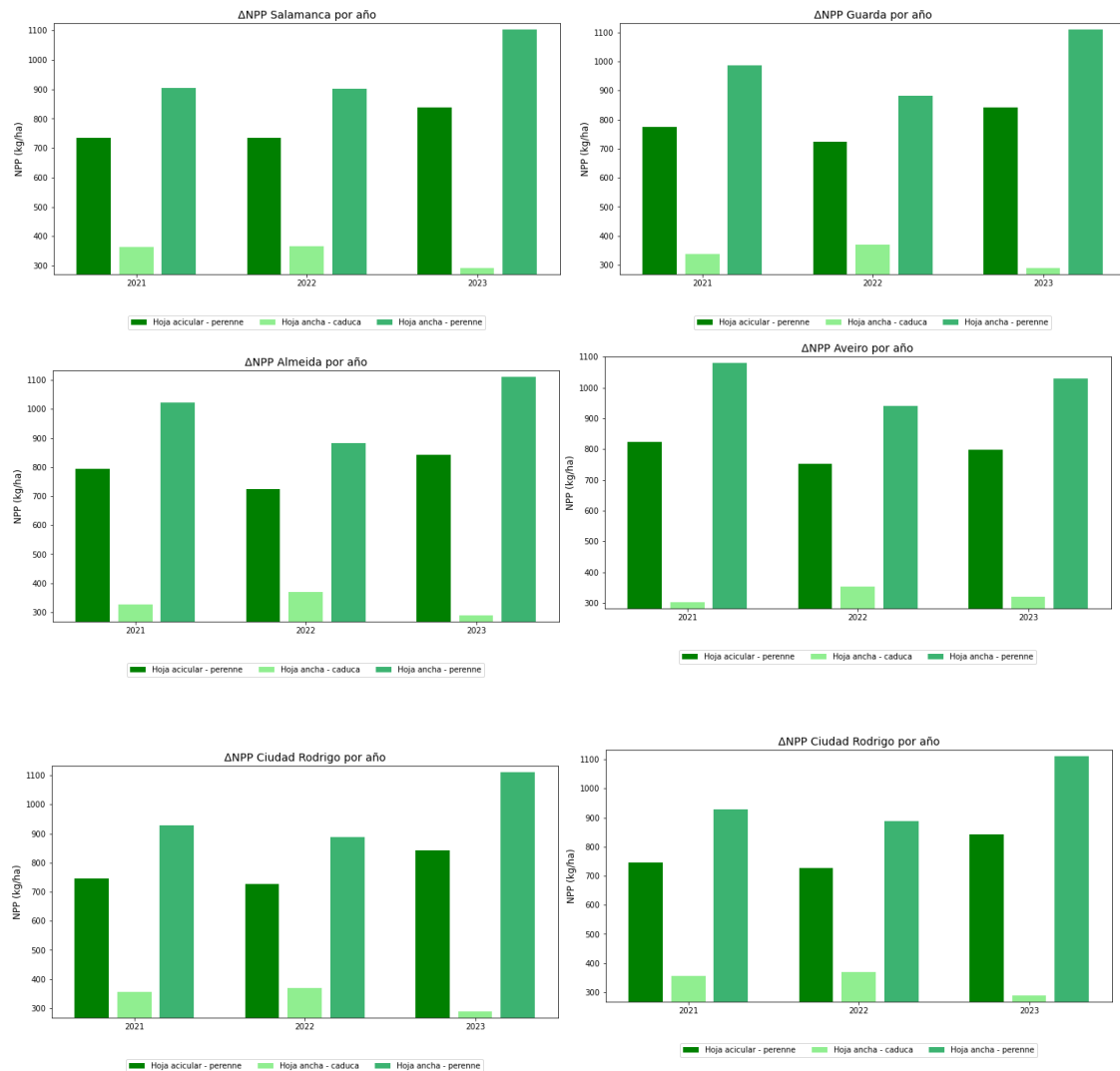


Figura 42. Cambios en la NPP por año, municipio y tipología de masa arbolada, parte 1.

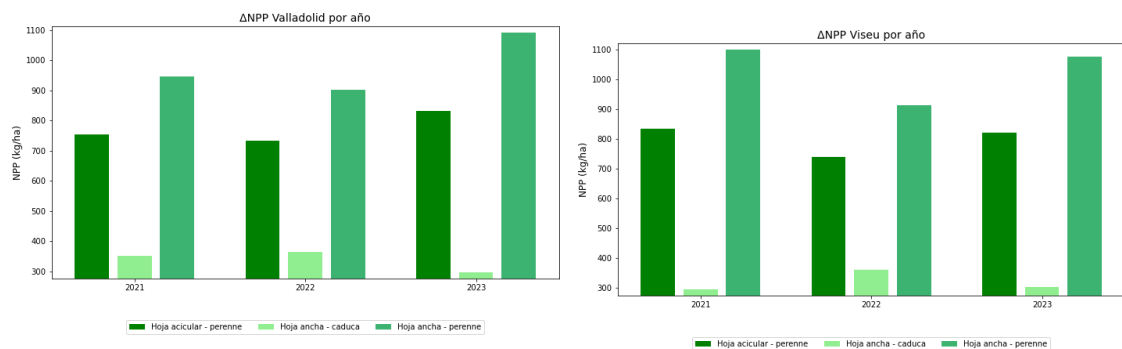


Figura 43. Cambios en la NPP por año, municipio y tipología de masa arbolada, parte 2.

Una vez determinadas las variaciones en la producción del ecosistema respecto al histórico de referencia, se han analizado las variaciones interanuales (Tabla 26), que reflejan los cambios por la pérdida o aumento de la biomasa para posteriormente, traducirlos a unidades económicas para cuantificar el impacto total generado cada año. El resultado (Tabla 27), nos ofrece una visión general del impacto económico del cambio climático. Hay que tener en cuenta que el impacto no siempre es negativo y se produce disminución en la fijación de biomasa sino que debido al efecto de fertilización por el aumento de CO₂, el ecosistema es capaz de generar más biomasa pese a que las temperaturas aumentan y generan estrés hídrico sobre la vegetación.

Tabla 26. Pérdidas o ganancias estimadas para la NPP entre años en función de las variaciones en el clima.

Municipio	Año	Hoja ancha -perenne	Hoja ancha -caduca	Hoja acicular - perenne
Cambio en NPP (kg C/ha): Almeida	21-22	-137,86	44,41	-68,21
	22-23	228,39	-81,36	115,96
Cambio en NPP (kg C/ha): Aveiro	21-22	-139,26	50,08	-71,15
	22-23	89,14	-32,04	45,07
Cambio en NPP (kg C/ha): Ciudad Rodrigo	21-22	-38,60	11,42	-18,61
	22-23	223,57	-80,03	113,67
Cambio en NPP (kg C/ha): Coimbra	21-22	-50,49	16,79	-25,16
	22-23	85,27	-30,47	43,02
Cambio en NPP (kg C/ha): Guarda	21-22	-103,89	32,18	-50,84
	22-23	229,50	-81,47	116,41
Cambio en NPP (kg C/ha): Salamanca	21-22	-2,15	0,81	-1,04
	22-23	202,48	-73,03	103,14
Cambio en NPP (kg C/ha): Valladolid	21-22	-42,47	12,99	-20,67
	22-23	189,55	-67,70	96,23
Cambio en NPP (kg C/ha): Viseu	21-22	-186,81	66,65	-95,24
	22-23	161,95	-57,93	82,18

Tabla 27. Pérdidas o ganancias (€) estimadas para cada año en función de las variaciones en el clima.

Municipio	Año	Hoja ancha -perenne	Hoja ancha -caduca	Hoja acicular - perenne
Impacto (€) debido al cambio en NPP: Almeida	21-22	-425	19791	-210
	22-23	705	-36261	358
Impacto (€) debido al cambio en NPP: Aveiro	21-22	-1006	6534	-514
	22-23	644	-4181	326
Impacto (€) debido al cambio en NPP: Ciudad Rodrigo	21-22	-478	4414	-230
	22-23	2767	-30947	1407
Impacto (€) debido al cambio en NPP: Coimbra	21-22	-490	8546	-244
	22-23	827	-15511	417
Impacto (€) debido al cambio en NPP: Guarda	21-22	-6924	24589	-3388
	22-23	15296	-62254	7759
Impacto (€) debido al cambio en NPP: Salamanca	21-22	-3	5	-1
	22-23	247	-476	126
Impacto (€) debido al cambio en NPP: Valladolid	21-22	-1907	642	-928
	22-23	8511	-3347	4321
Impacto (€) debido al cambio en NPP: Viseu)	21-22	-23887	44136	-12178
	22-23	20709	-38358	10509

7.2.1.2. Impacto económico de los eventos de viento extremo en la vegetación

La Tabla 28, presenta los resultados de la cuantificación del impacto de los eventos extremos de viento en la vegetación arbolada. Los resultados, muestran los valores estimados para el periodo 2021-2023. Se puede ver como la recurrencia de eventos, genera un impacto económico grande en los municipios de Valladolid, Almeida y Salamanca para el año 2023. Además, se observa una amplia variabilidad a lo largo del periodo analizado, siendo el año 2023 aquel en el que se generaron mayores pérdidas como consecuencia de los impactos del viento en el arbolado.

Tabla 28. Pérdidas (€) estimadas para cada año en función de las velocidades del viento.

Ciudad	Costes indirectos (€)			Costes directos (€)			Coste total (€)		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
Almeida	5740	5740	7064	16336	16336	20105	22075	22075	27170
Aveiro	0	0	48693	0	0	138588	0	0	187281
Ciudad Rodrigo	4855	0	4855	13819	0	13819	18674	0	18674
Coimbra	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Guarda	62993	48456	72685	179289	137914	206872	242282	186371	279556
Salamanca	0	0	30691	0	0	87353	0	0	118044
Valladolid	34317	0	51475	97671	0	146507	131988	0	197982
Viseu	0	0	289931	0	0	825187	0	0	1115118

7.2.1.3. Impacto económico de los incendios en la vegetación

A continuación (Tabla 29) se muestran los resultados de la evaluación del impacto de los incendios en los últimos tres años (periodo 2021-2023). Se puede ver como el impacto ocasionado por los incendios, es menor en los municipios españoles que en los portugueses donde la superficie afectada es muy grande y por lo tanto los costes ocasionados tanto a nivel de arbolado como a nivel de reposición, son bastante elevados.

Tabla 29. Superficie afectada por incendios y estimación de los costes ocasionados.

Municipio	Año	Arbolado (ha)	Costes directos (€)	Costes indirectos (€)	Coste total (€)
Almeida	2021	36,24	168516,00	152208,00	320724,00
	2022	46,98	218433,90	197295,13	415729,03
	2023	2,23	10384,07	9379,16	19763,22
Aveiro	2021	1,94	9001,01	8129,94	17130,95
	2022	13,43	62432,20	56390,38	118822,58
	2023	110,90	515682,07	465777,35	981459,42
Ciudad Rodrigo	2021	1,44	6696,00	6048,00	12744,00
	2022	0,00	0,00	0,00	0,00
	2023	0,00	0,00	0,00	0,00
Coimbra	2021	0,00	0,00	0,00	0,00
	2022	1,77	8210,04	7415,52	15625,56
	2023	143,72	668279,64	603607,41	1271887,05
Guarda	2021	3,02	14043,00	12684,00	26727,00
	2022	1064,16	4948359,31	4469485,83	9417845,13
	2023	67,46	313689,00	283332,00	597021,01
Salamanca	2021	0,00	0,00	0,00	0,00
	2022	0,00	0,00	0,00	0,00
	2023	0,01	46,50	42,00	88,50
Valladolid	2021	0,00	0,00	0,00	0,00
	2022	0,00	0,00	0,00	0,00
	2023	1,42	6603,00	5964,00	12567,00
Viseu	2021	2,62	12201,60	11020,80	23222,40
	2022	20,32	94483,11	85339,58	179822,70
	2023	76,86	357408,96	322821,00	680229,96

7.2.2. PROBABILIDADES ACTUALES Y FUTUROS DEBIDO AL INCREMENTO DE TEMPERATURAS

La caracterización de los peligros climáticos, está basada en la evaluación de la probabilidad de excedencia de uno o más eventos, considerando los umbrales establecidos para cada uno de los peligros climáticos objeto de estudio. Por peligro climático, se han definido los siguientes umbrales de referencia:

- **Días cálidos:** Número de días en los que la temperatura media supera el percentil 90 para el periodo histórico de referencia.
- **Días muy cálidos:** Número de días en los que la temperatura media de las máximas supera los 25 °C.
- **Olas de calor:** Al menos 5 días consecutivos en los que la temperatura media de las máximas supera el percentil 90 para el periodo histórico de referencia.

Tras definir los peligros climáticos asociados al aumento de las temperaturas y sus valores de referencia, estos peligros se han caracterizado para cada uno de los municipios objeto de estudio. Los resultados se presentan por municipio tanto de forma gráfica como en valores de probabilidad para cada uno de los escenarios climáticos seleccionados.

7.2.2.1. Almeida

Las probabilidades de excedencia obtenidas para los peligros climáticos (días muy cálidos, días cálidos y olas de calor) en el municipio de Almeida, se presentan en la Tabla 30. Los resultados, pueden verse de forma gráfica en la Figura 44. Se observa como las probabilidades de excedencia aumentan en los escenarios futuros respecto al escenario histórico de referencia. En el caso de las olas de calor, la probabilidad de excedencia es ligeramente inferior en el escenario SSP585 que en el escenario SSP245 pese a contar con un mayor nivel de emisiones y aumento medio de la temperatura.

Tabla 30. Probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Almeida.

Escenario	Probabilidad (%) de que Tmax media exceda 25°C	Probabilidad (%) de exceder P90 de la Tmed histórica	Probabilidad (%) de al menos un evento con 5 o más días consecutivos con Tmax > 25°C
Histórico (1985-2014)	22,26	7,98	93,33
SSP245 (2015-2100)	24,94	10,52	94,19
SSP585 (2015-2100)	28,43	12,66	89,53

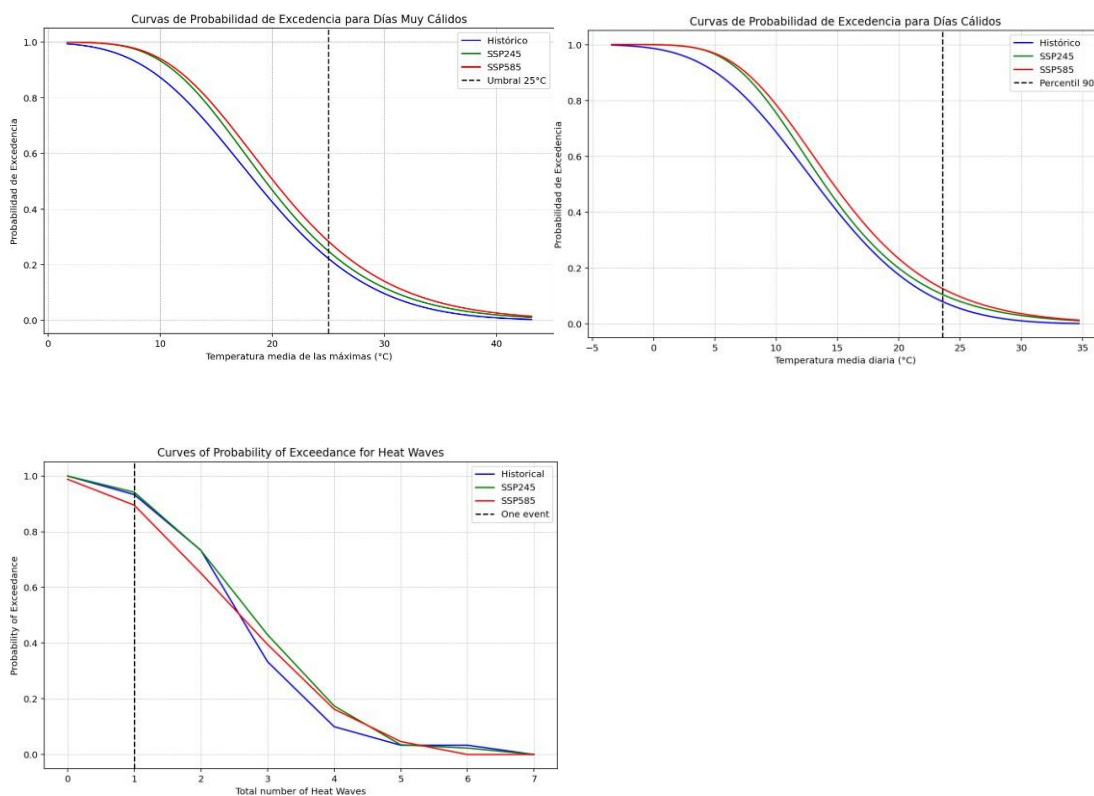


Figura 44. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Almeida.

7.2.2.2. Aveiro

Las probabilidades de excedencia obtenidas para los peligros climáticos (días muy cálidos, días cálidos y olas de calor) en el municipio de Aveiro, se presentan en la Tabla 31. Los resultados, pueden verse de forma gráfica en la Figura 45. Se observa como las probabilidades de excedencia aumentan en los escenarios futuros respecto al escenario histórico de referencia. En el caso de las olas de calor, la probabilidad de excedencia es ligeramente inferior en el escenario SSP585 que en el escenario SSP245 pese a contar con un mayor nivel de emisiones y aumento medio de la temperatura.

Tabla 31. Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Aveiro.

Escenario	Probabilidad (%) de que Tmax media exceda 25°C	Probabilidad (%) de exceder P90 de la Tmed histórica	Probabilidad (%) de al menos un evento con 5 o más días consecutivos con Tmax > 25°C
Histórico (1985-2014)	18,10	10,80	56,67
SSP245 (2015-2100)	23,27	15,20	95,35
SSP585 (2015-2100)	28,26	20,13	93,02

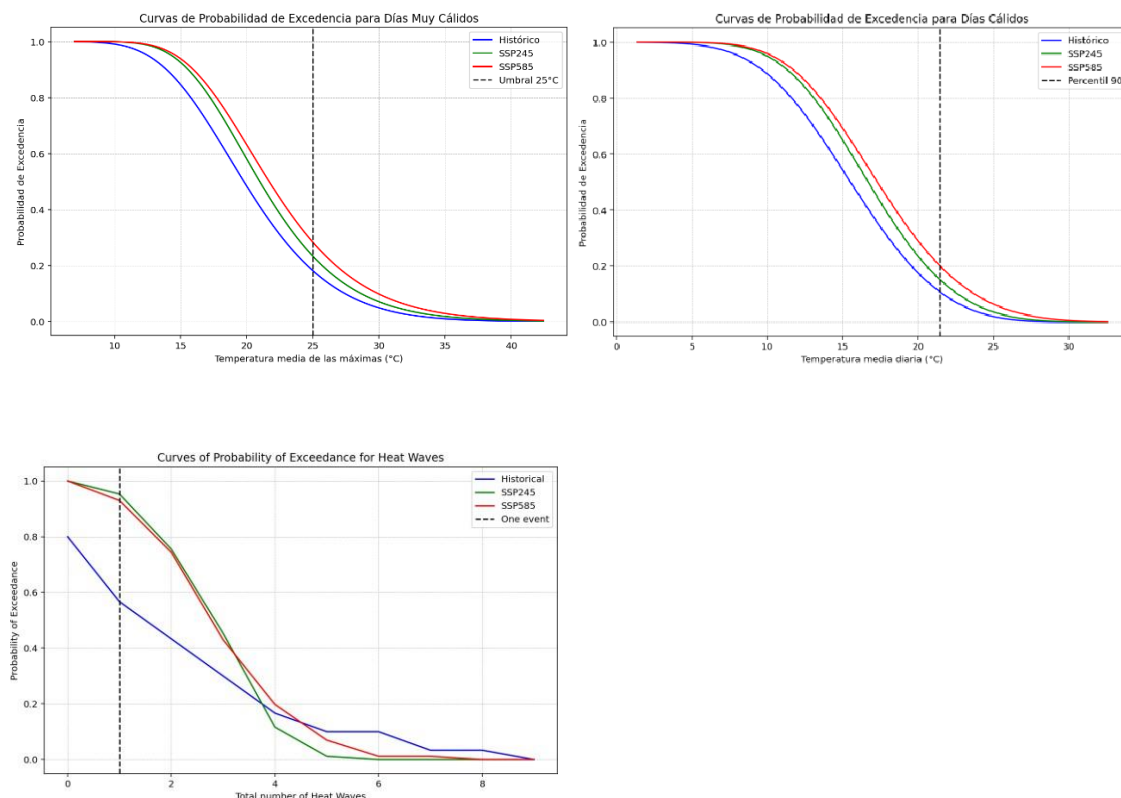


Figura 45. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Aveiro.

7.2.2.3. Ciudad Rodrigo

Las probabilidades de excedencia obtenidas para los peligros climáticos (días muy cálidos, días cálidos y olas de calor) en el municipio de Ciudad Rodrigo, se presentan en la Tabla 32. Los resultados, pueden verse de forma gráfica en la Figura 46. Se observa como las probabilidades de excedencia aumentan en los escenarios futuros respecto al escenario histórico de referencia. En el caso de las olas de calor, la probabilidad de excedencia es ligeramente inferior en el escenario SSP585 que en el escenario SSP245 pese a contar con un mayor nivel de emisiones y aumento medio de la temperatura.

Tabla 32. Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Ciudad Rodrigo.

Escenario	Probabilidad (%) de que Tmax media exceda 25°C	Probabilidad (%) de exceder P90 de la Tmed histórica	Probabilidad (%) de al menos un evento con 5 o más días consecutivos con Tmax > 25°C
Histórico (1985-2014)	21,95	7,94	86,67
SSP245 (2015-2100)	24,53	10,51	94,19
SSP585 (2015-2100)	27,96	12,67	89,53

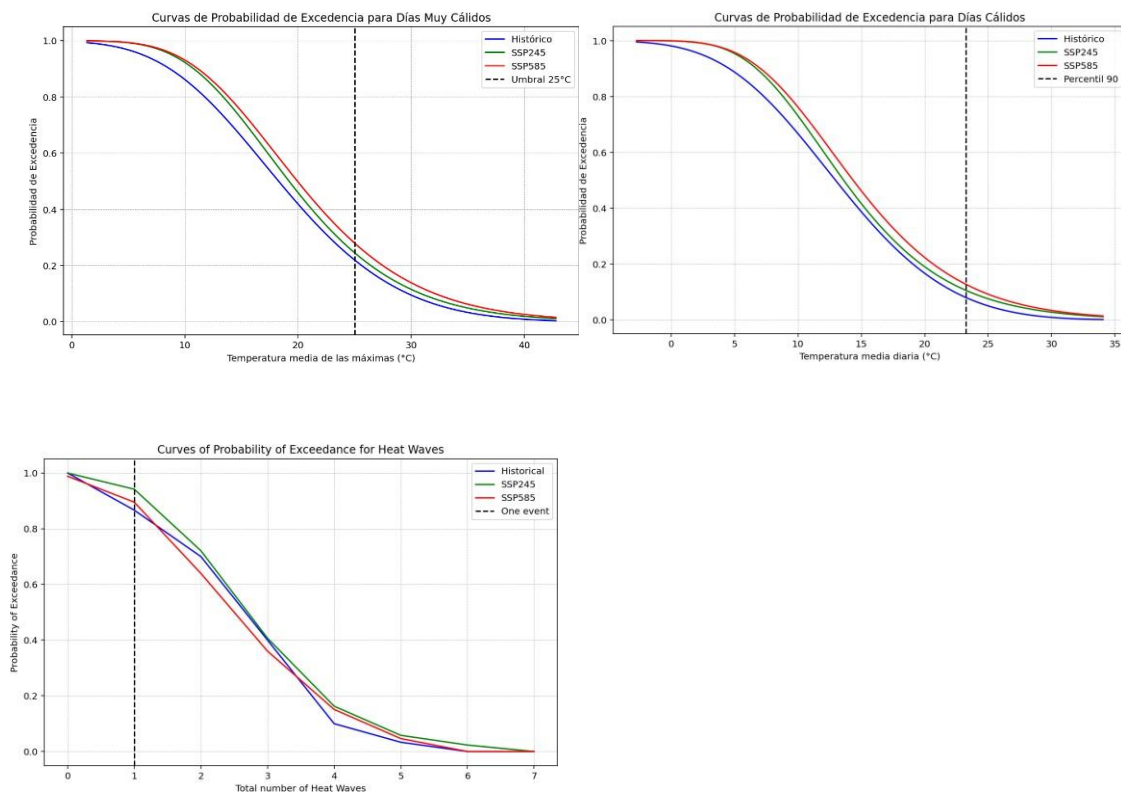


Figura 46. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Ciudad Rodrigo.

7.2.2.4. Coimbra

Las probabilidades de excedencia obtenidas para los peligros climáticos (días muy cálidos, días cálidos y olas de calor) en el municipio de Coimbra, se presentan en la Tabla 33. Los resultados, pueden verse de forma gráfica en la Figura 47. Se observa como las probabilidades de excedencia aumentan en los escenarios futuros respecto al escenario histórico de referencia. En el caso de las olas de calor, la probabilidad de excedencia es ligeramente inferior en el escenario SSP585 que en el escenario SSP245 pese a contar con un mayor nivel de emisiones y aumento medio de la temperatura, aunque sus valores son muy similares con una variación de apenas un 1%.

Tabla 33. Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Coimbra.

Escenario	Probabilidad (%) de que Tmax media exceda 25°C	Probabilidad (%) de exceder P90 de la Tmed histórica	Probabilidad (%) de al menos un evento con 5 o más días consecutivos con Tmax > 25°C
Histórico (1985-2014)	22,31	9,66	66,67
SSP245 (2015-2100)	26,77	12,99	96,51
SSP585 (2015-2100)	31,13	16,94	95,35

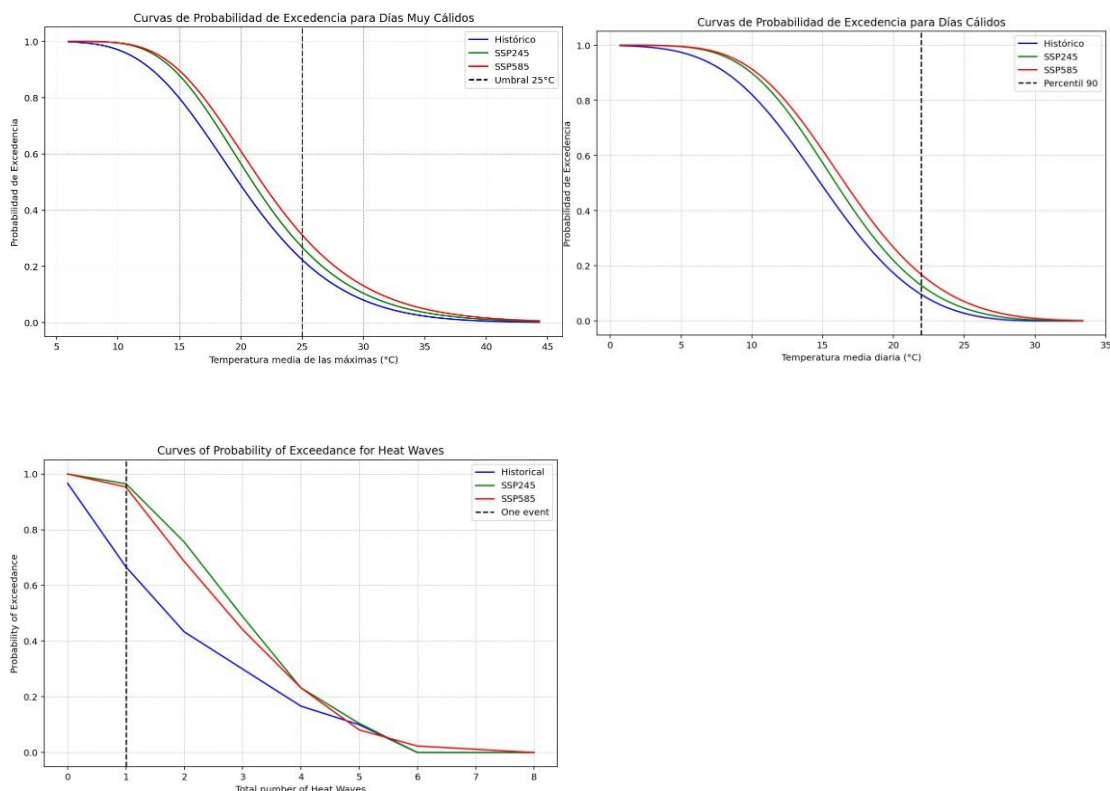


Figura 47. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Coimbra.

7.2.2.5. Guarda

Las probabilidades de excedencia obtenidas para los peligros climáticos (días muy cálidos, días cálidos y olas de calor) en el municipio de Guarda, se presentan en la Tabla 34. Los resultados, pueden verse de forma gráfica en la Figura 48. Se observa como las probabilidades de excedencia aumentan en los escenarios futuros respecto al escenario histórico de referencia. En el caso de las olas de calor, la probabilidad de excedencia es ligeramente inferior en el escenario SSP585 que en el escenario SSP245 pese a contar con un mayor nivel de emisiones y aumento medio de la temperatura.

Tabla 34. Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Guarda.

Escenario	Probabilidad (%) de que Tmax media exceda 25°C	Probabilidad (%) de exceder P90 de la Tmed histórica	Probabilidad (%) de al menos un evento con 5 o más días consecutivos con Tmax > 25°C
Histórico (1985-2014)	16,00	8,32	86,67
SSP245 (2015-2100)	18,47	10,81	94,19
SSP585 (2015-2100)	21,61	12,99	89,53

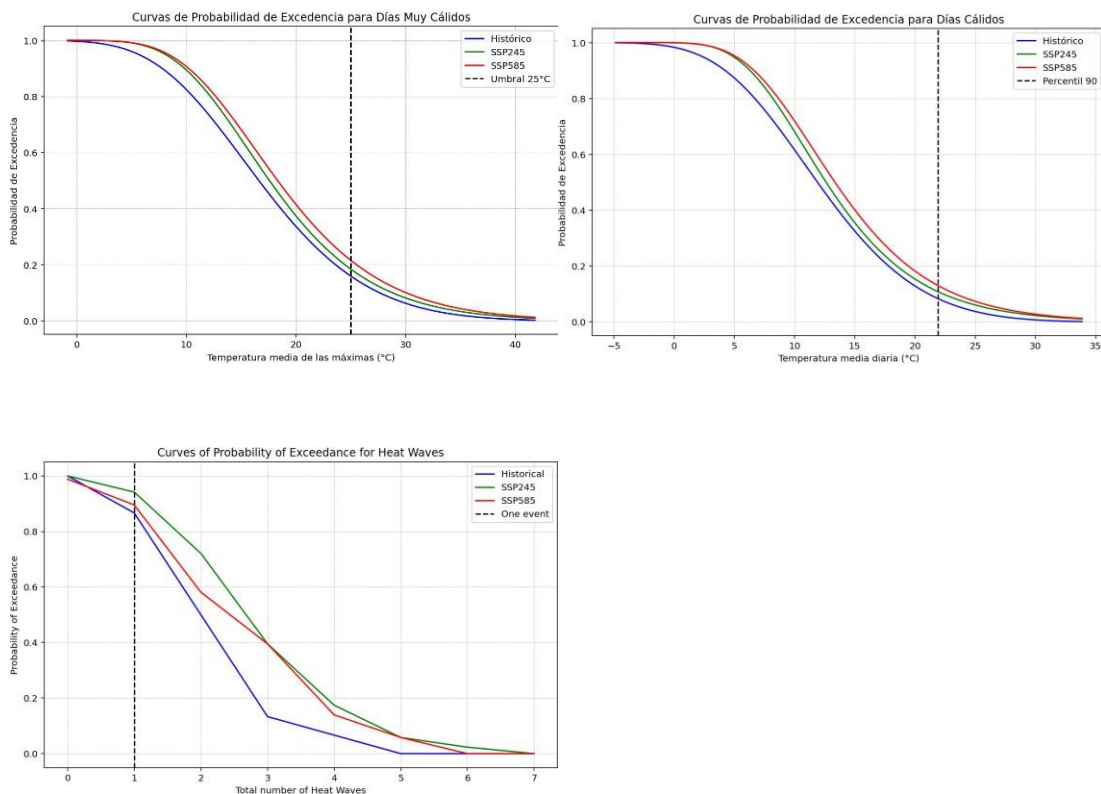


Figura 48. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Guarda.

7.2.2.6. Salamanca

Las probabilidades de excedencia obtenidas para los peligros climáticos (días muy cálidos, días cálidos y olas de calor) en el municipio de Salamanca, se presentan en la Tabla 35. Los resultados, pueden verse de forma gráfica en la Figura 49. Se observa como las probabilidades de excedencia aumentan en los escenarios futuros respecto al escenario histórico de referencia. En el caso de las olas de calor, la probabilidad de excedencia es ligeramente inferior en el escenario SSP585 que en el escenario SSP245 pese a contar con un mayor nivel de emisiones y aumento medio de la temperatura.

Tabla 35. Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Salamanca.

Escenario	Probabilidad (%) de que Tmax media exceda 25°C	Probabilidad (%) de exceder P90 de la Tmed histórica	Probabilidad (%) de al menos un evento con 5 o más días consecutivos con Tmax > 25°C
Histórico (1985-2014)	23,15	7,72	86,67
SSP245 (2015-2100)	25,61	12,27	94,19
SSP585 (2015-2100)	29,14	12,82	88,37

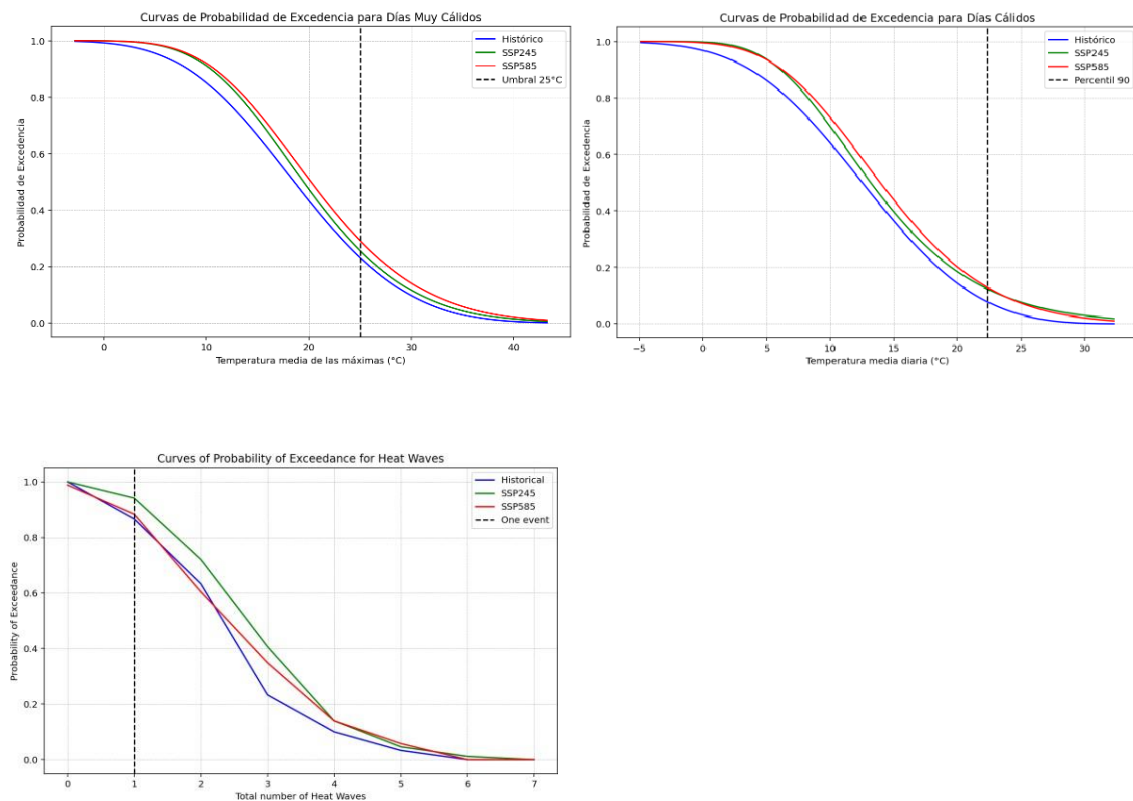


Figura 49. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Salamanca.

7.2.2.7. Valladolid

Las probabilidades de excedencia obtenidas para los peligros climáticos (días muy cálidos, días cálidos y olas de calor) en el municipio Valladolid, se presentan en la Tabla 36. Los resultados, pueden verse de forma gráfica en la Figura 50. Se observa como las probabilidades de excedencia aumentan en los escenarios futuros respecto al escenario histórico de referencia. En el caso de las olas de calor, la probabilidad de excedencia es ligeramente inferior en el escenario SSP585 que en el escenario SSP245 pese a contar con un mayor nivel de emisiones y aumento medio de la temperatura, siendo su valor muy similar al del escenario histórico de referencia.

Tabla 36. Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Valladolid.

Escenario	Probabilidad (%) de que Tmax media exceda 25°C	Probabilidad (%) de exceder P90 de la Tmed histórica	Probabilidad (%) de al menos un evento con 5 o más días consecutivos con Tmax > 25°C
Histórico (1985-2014)	36,20	8,01	80,00
SSP245 (2015-2100)	26,28	10,02	88,37
SSP585 (2015-2100)	29,48	12,28	80,23

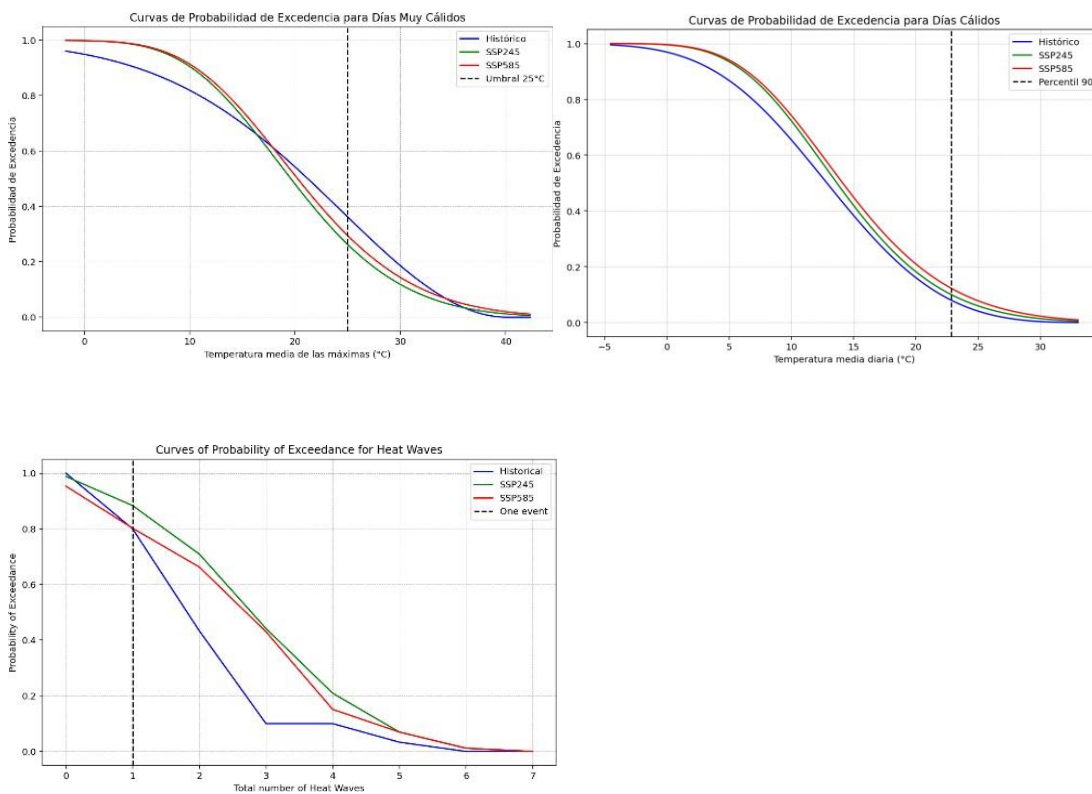


Figura 50. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Valladolid.

7.2.2.8. Viseu

Las probabilidades de excedencia obtenidas para los peligros climáticos (días muy cálidos, días cálidos y olas de calor) en el municipio de Viseu, se presentan en la Tabla 37. Los resultados, pueden verse de forma gráfica en la Figura 51. Se observa como las probabilidades de excedencia aumentan en los escenarios futuros respecto al escenario histórico de referencia. En el caso de las olas de calor, la probabilidad de excedencia es ligeramente inferior en el escenario SSP585 que en el escenario SSP245 pese a contar con un mayor nivel de emisiones y aumento medio de la temperatura.

Tabla 37. Probabilidad de excedencia de cada uno de los peligros climáticos evaluados para el municipio de Viseu.

Escenario	Probabilidad (%) de que Tmax media exceda 25°C	Probabilidad (%) de exceder P90 de la Tmed histórica	Probabilidad (%) de al menos un evento con 5 o más días consecutivos con Tmax > 25°C
Histórico (1985-2014)	20,76	8,99	83,33
SSP245 (2015-2100)	24,20	11,84	97,67
SSP585 (2015-2100)	28,04	14,71	93,02

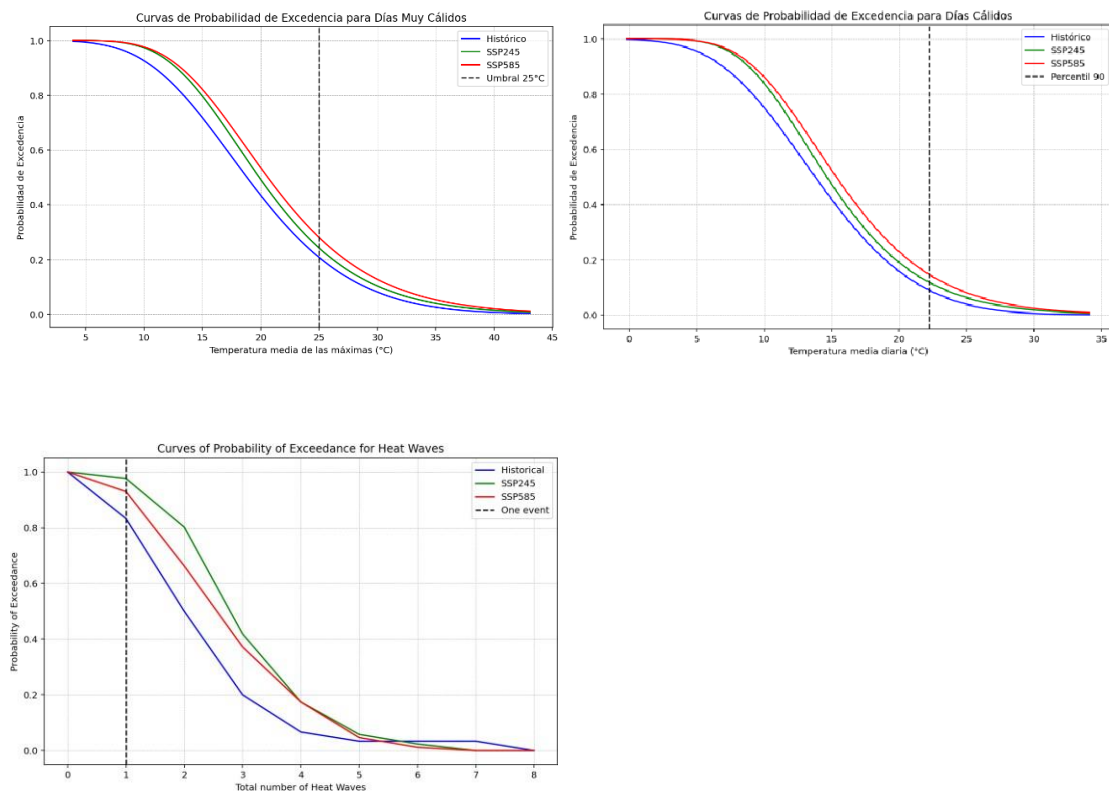


Figura 51. Representación gráfica de la probabilidad de excedencia para los peligros climáticos evaluados para el municipio de Viseu.

7.2.3. MATRIZ DE RIESGOS

La Tabla 38 muestra los resultados de la caracterización del riesgo en cada uno de los municipios considerando los tres peligros climáticos identificados que están directamente relacionados con el aumento de las temperaturas. Debido a que el sector objeto de análisis es la biodiversidad y vegetación, se empleó el impacto asociado a los cambios en la producción primaria neta del ecosistema. De este modo, se ha considerado un impacto moderado para cada uno de los peligros ya que incluso en los casos más negativos, la variación de la producción primaria neta no sobrepasó el 15% respecto al valor de producción primaria neta total para un bosque templado ((kg C/ha)).

Tabla 38. Nivel de riesgo para los municipios evaluados.

Municipio	Peligro	Escenario	Probabilidad	Impacto	Nivel de riesgo
Almeida	Días muy cálidos	SSP245	Improbable	Moderado	Moderado
		SSP585	Improbable	Moderado	Moderado
	Días cálidos	SSP245	Raro	Moderado	Moderado
		SSP585	Raro	Moderado	Moderado
	Olas de calor	SSP245	Casi seguro	Moderado	Muy alto
		SSP585	Probable	Moderado	Alto
Municipio	Peligro	Escenario	Probabilidad	Impacto	Nivel de riesgo
Aveiro	Días muy cálidos	SSP245	Improbable	Moderado	Moderado
		SSP585	Improbable	Moderado	Moderado
	Días cálidos	SSP245	Raro	Moderado	Moderado
		SSP585	Improbable	Moderado	Moderado
	Olas de calor	SSP245	Casi seguro	Moderado	Muy alto
		SSP585	Casi seguro	Moderado	Muy alto
Ciudad Rodrigo	Días muy cálidos	SSP245	Improbable	Moderado	Moderado
		SSP585	Improbable	Moderado	Moderado
	Días cálidos	SSP245	Raro	Moderado	Moderado
		SSP585	Raro	Moderado	Moderado
	Olas de calor	SSP245	Casi seguro	Moderado	Muy alto
		SSP585	Probable	Moderado	Alto
Coimbra	Días muy cálidos	SSP245	Improbable	Moderado	Moderado
		SSP585	Improbable	Moderado	Moderado
	Días cálidos	SSP245	Raro	Moderado	Moderado
		SSP585	Raro	Moderado	Moderado
	Olas de calor	SSP245	Casi seguro	Moderado	Muy alto
		SSP585	Casi seguro	Moderado	Muy alto
Guarda	Días muy cálidos	SSP245	Raro	Moderado	Moderado
		SSP585	Improbable	Moderado	Moderado
	Días cálidos	SSP245	Raro	Moderado	Moderado
		SSP585	Raro	Moderado	Moderado
	Olas de calor	SSP245	Casi seguro	Moderado	Muy alto
		SSP585	Probable	Moderado	Alto
	Días muy cálidos	SSP245	Improbable	Moderado	Moderado
		SSP585	Improbable	Moderado	Moderado

Salamanca	Días cálidos	SSP245	Raro	Moderado	Moderado
		SSP585	Raro	Moderado	Moderado
	Olas de calor	SSP245	Casi seguro	Moderado	Muy alto
		SSP585	Probable	Moderado	Alto
Valladolid	Días muy cálidos	SSP245	Improbable	Moderado	Moderado
		SSP585	Improbable	Moderado	Moderado
	Días cálidos	SSP245	Raro	Moderado	Moderado
		SSP585	Raro	Moderado	Moderado
	Olas de calor	SSP245	Probable	Moderado	Alto
		SSP585	Probable	Moderado	Alto
Viseu	Días muy cálidos	SSP245	Improbable	Moderado	Moderado
		SSP585	Improbable	Moderado	Moderado
	Días cálidos	SSP245	Raro	Moderado	Moderado
		SSP585	Raro	Moderado	Moderado
	Olas de calor	SSP245	Casi seguro	Moderado	Muy alto
		SSP585	Casi seguro	Moderado	Muy alto

Los resultados, nos permiten identificar las olas de calor como la amenaza de mayor magnitud para todos los municipios objeto de análisis. El valor oscila entre alto y muy alto y está condicionado por la probabilidad de excedencia del evento. Las variaciones entre los dos escenarios climáticos evaluados, son muy pequeñas, apareciendo únicamente en los municipios de Almeida, Ciudad Rodrigo, Guarda y Salamanca. Finalmente, hay que destacar Valladolid como el municipio donde el nivel de riesgo por olas de calor será más bajo en comparación con el resto de municipios.

7.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.3.1. CONCLUSIONES

Una vez determinado el riesgo, se ha comprobado como en todos los municipios analizados, las olas de calor suponen la principal amenaza ya que presentan los niveles de riesgo más elevados, alcanzando niveles muy altos en la mayoría de los escenarios SSP245 y SSP585. Esto indica que las olas de calor son un fenómeno climático cada vez más frecuente e intenso a lo largo de todos los municipios objeto de estudio.

Respecto a la variabilidad en la probabilidad de ocurrencia, en el escenario SSP245, las olas de calor son casi seguras en la mayoría de los municipios, lo que sugiere que ya hay un alto riesgo bajo condiciones de emisiones moderadas. Además, en el escenario SSP585, la probabilidad es casi segura o probable, lo que indica que un mayor nivel de emisiones no incrementa significativamente la frecuencia de este fenómeno en algunos municipios.

Si tenemos en cuenta los resultados obtenidos para los días cálidos y los días muy cálidos, vemos que tienen una probabilidad baja en la mayoría de los casos (improbable o raro), siendo su impacto moderado, lo que sugiere que aunque estos eventos pueden aumentar en frecuencia, no representan un riesgo extremo como mostraban las olas de calor.

Con los resultados obtenidos, Aveiro, Coimbra y Viseu presentan un riesgo muy alto de olas de calor en todos los escenarios, lo que sugiere una exposición significativa y necesidad de medidas urgentes de adaptación. Valladolid muestra un riesgo alto en todos los escenarios, lo que lo posiciona como un municipio con menor vulnerabilidad en comparación con los anteriores. Finalmente, Almeida, Ciudad Rodrigo, Guarda y Salamanca presentan riesgo muy alto en el escenario SSP245 y alto en el escenario SSP585, lo que podría indicar que las estrategias de adaptación pueden reducir el impacto en escenarios más extremos.

7.3.2. RECOMENDACIONES

A continuación se plantean una serie de recomendaciones a tener en cuenta para la definición de estrategias de adaptación y mitigación del cambio climático en los municipios analizados:

- Desarrollar planes de contingencia específicos para olas de calor, incluyendo protocolos de actuación en salud pública y estrategias de enfriamiento urbano.
- Implementar medidas de adaptación urbana, como la creación de zonas verdes, techos reflectantes y pavimentos permeables para reducir el efecto de isla de calor.
- Instalar sistemas de alerta temprana para olas de calor, con campañas de sensibilización dirigidas a la población vulnerable.
- Reforzar la capacidad de los servicios de emergencia y atención sanitaria para responder a episodios de calor extremo.
- Impulsar estrategias de descarbonización en los municipios con mayor riesgo para reducir la frecuencia e intensidad de estos eventos en el futuro.
- Fomentar la eficiencia energética y el uso de fuentes de energía renovable para minimizar la contribución al calentamiento global.
- Diseñar planes de acción social para proteger a los colectivos más expuestos (ancianos, niños y personas con enfermedades crónicas).
- Habilitar refugios climáticos en centros de salud, bibliotecas y otros espacios públicos durante eventos extremos.
- Fortalecer la cooperación entre municipios afectados para compartir estrategias de adaptación y mejores prácticas.
- Fomentar estudios de modelización climática local para mejorar la precisión de los escenarios y adaptar las medidas a cada municipio.

8. INDICADORES DE VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN CLIMÁTICA

En esta sección del documento, se describen los indicadores de vulnerabilidad y adaptación climática definidos para la monitorización del impacto del aumento de la temperatura en los municipios de la Red CENCYL. Los indicadores se presentan en formato tabla (de la Tabla 39 a la Tabla 55), incluyendo su descripción, ecuación de cálculo y fuentes de datos para su cuantificación.

Tabla 39. Indicador 1: Temperatura media anual.

Indicador 1	
Nombre	Temperatura media anual (TMA).
Definición del indicador	Valor medio anual de la temperatura en el área de estudio.
Objetivo	Evaluar y monitorizar cambios en la temperatura media anual para comprender la tendencia y definir estrategias de adaptación y mitigación que ayuden a reducir los impactos asociados al aumento de las temperaturas.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$TMA = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n T_{med,j}$ Donde: • N es el número total de días en el año.
	• $T_{med,j}$ es la temperatura media del día j.
Unidades	°C
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Datos climáticos de estaciones meteorológicas. • Datos Copernicus C3S. E-OBS daily gridded meteorological data.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán de las estaciones climáticas ubicadas en el municipio o a través de la descarga y extracción de los datos de Copernicus C3S. Las variaciones en los valores de la temperatura media, nos permitirá cuantificar el efecto del cambio en la temperatura en el municipio y comprender sus tendencias. Los resultados se representarán en gráficas de evolución que representen al menos los tres últimos años.

Tabla 40. Indicador 2: Temperatura en superficie.

Indicador 2	
Nombre	Temperatura en superficie para los días más cálidos del año (TS).
Definición del indicador	Temperatura en superficie diurna y nocturna para los tres días más cálidos del año y patrón medio definido a través de la media de los tres días analizados.
Objetivo	Evaluar la temperatura en superficie tanto diurna como nocturna para los tres días más cálidos del año pudiendo establecer una evaluación del efecto isla de calor en el área de estudio.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$TS = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n Ts,j$ Donde: • N es el número de días. • Ts,j es la temperatura en superficie (diurna o nocturna) del día j.
Unidades	°C
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Imágenes Sentinel 2 y Sentinel 3: https://dataspace.copernicus.eu/explore-data
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se descargarán a través del buscador de imágenes y se procesarán para obtener una temperatura de alta resolución en superficie. Los resultados se representarán en gráficas de evolución que representen la variabilidad temporal y diaria del indicador.

Tabla 41. Indicador 3: Número de olas de calor al año.

Indicador 3	
Nombre	Número de olas de calor al año (NOC)
Definición del indicador	Las olas de calor, se definen como al menos 5 días consecutivos en los que la temperatura media de las máximas supera el percentil 90 para el periodo histórico de referencia.
Objetivo	Evaluar y monitorizar cambios en la frecuencia de las olas de calor para comprender la tendencia y definir estrategias de adaptación y mitigación que ayuden a reducir los impactos asociados al aumento en su frecuencia.
Plazo para alcanzar el objetivo	-

Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$NOC = \frac{1}{N} \sum_{i=d}^{d+4} I(T_{max,i} > P_{90}) = 5$ Donde: • $T_{max,i}$ es la temperatura máxima del día i. • P_{90} es el percentil 90 de la temperatura máxima en el periodo de referencia. • $I(T_{max,i} > P_{90})$ es una función indicadora que vale 1 si la condición se cumple y 0 en caso contrario. • d es el primer día del periodo de análisis.
Unidades	Eventos/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Datos climáticos de estaciones meteorológicas. • Datos Copernicus C3S. E-OBS daily gridded meteorological data.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP "ADAPT CLIMA CENCYL" y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán de las estaciones climáticas ubicadas en el municipio o a través de la descarga y extracción de los datos de Copernicus C3S. Las variaciones en el número de olas de calor, nos permitirá cuantificar el efecto del cambio en su frecuencia en el municipio y comprender sus tendencias. Los resultados se representarán en gráficas de evolución que representen al menos los tres últimos años.

Tabla 42. Indicador 4: precipitación media anual.

Indicador 4	
Nombre	Precipitación media anual (PMA)
Definición del indicador	Valor medio anual de la precipitación en el área de estudio.
Objetivo	Evaluar y monitorizar cambios en la precipitación media anual para comprender la tendencia y definir estrategias de adaptación y mitigación que ayuden a reducir los impactos asociados al aumento o disminución de las precipitaciones.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$PMA = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n P_{med,j}$ Donde: • N es el número total de días en el año. • $P_{med,j}$ es la precipitación media del día j.
Unidades	mm/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Datos climáticos de estaciones meteorológicas. • Datos Copernicus C3S. E-OBS daily gridded meteorological data.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán de las estaciones climáticas ubicadas en el municipio o a través de la descarga y extracción de los datos de Copernicus C3S. Las variaciones en los valores de la precipitación media, nos permitirá cuantificar el efecto del cambio en la precipitación en el municipio y comprender sus tendencias. Los resultados se representarán en gráficas de evolución que representen al menos los tres últimos años.

Tabla 43. Indicador 5: Evapotranspiración potencial media anual.

Indicador 5	
Nombre	Evapotranspiración potencial (ETP)
Definición del indicador	Valor medio anual de la Evapotranspiración Potencial en el área de estudio calculada mediante el método de Thornthwaite.
Objetivo	Definir la ETP y monitorizar cambios en sus valores medios anuales para comprender la tendencia y definir estrategias de adaptación y mitigación que ayuden a reducir los impactos asociados a sus cambios.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$ETP = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T^\alpha}{I} \right)$ Donde: • T es la temperatura media mensual (°C). • I es el índice de calor calculado como $I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$, siendo T_i la temperatura media mensual. • $\alpha = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1.792 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0.49239$
Unidades	mm/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Datos climáticos de estaciones meteorológicas. • Datos Copernicus C3S. E-OBS daily gridded meteorological data.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos de temperatura, se recogerán de las estaciones climáticas ubicadas en el municipio o a través de la descarga y extracción de los datos de Copernicus C3S. Las variaciones en los valores de la ETP, nos permitirá cuantificar el efecto del aumento de la evapotranspiración en el municipio y comprender sus tendencias. Los resultados se representarán en gráficas de evolución que representen al menos los tres últimos años.

Tabla 44. Indicador 6: Número de eventos extremos asociados a inundaciones.

Indicador 6	
Nombre	Número de eventos extremos asociados a inundaciones (NEI)
Definición del indicador	Identificación del número de eventos extremos de precipitación que podrían ir asociados a la generación de inundaciones en el área de estudio. Se empleará en umbral de 25mm/día para la selección del número de eventos.
Objetivo	Analizar el número de eventos de inundación anuales para definir estrategias de adaptación y mitigación frente a los posibles efectos adversos de la inundación.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$NEI = \sum_{i=1}^n EPI$ Donde: • EPI es el número de días al año con $P > 25$ mm.
Unidades	Eventos/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Datos climáticos de estaciones meteorológicas. • Datos Copernicus C3S. E-OBS daily gridded meteorological data. • Estadísticas municipales de inundación. Base de datos de inundaciones HANZE
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Se obtendrá a partir de estadísticas del número de eventos de precipitación por encima del umbral establecido. También se podrían obtener datos estadísticos del número de eventos de inundación al año. Los resultados se representarán en gráficas de evolución que representen al menos los tres últimos años.

Tabla 45. Indicador 7: Número de eventos extremos asociados a sequías.

Indicador 7	
Nombre	Número de eventos extremos asociados a sequías (NES)
Definición del indicador	Numero de eventos de sequía al año definidos como al menos 45 días consecutivos sin precipitación dentro del periodo de crecimiento vegetativo (mayo a septiembre) con una precipitación efectiva menor a 2 mm.
Objetivo	Analizar el número de eventos de sequía anuales para definir estrategias de adaptación y mitigación frente a los posibles efectos adversos de la sequía.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$NES = \sum_{i=1}^n ESi$ Donde: • <i>ESi</i> es el número de eventos de sequía (45 días con $P < 2$ mm).
Unidades	Eventos/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Datos climáticos de estaciones meteorológicas. • Datos Copernicus C3S. E-OBS daily gridded meteorological data.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Se obtendrá el número de eventos de sequía en cada año, representando los valores a lo largo de la secuencia temporal definida. Será necesario disponer al menos de datos en los últimos tres años.

Tabla 46. Indicador 8: Número de días con riesgo de incendios forestales.

Indicador 8	
Nombre	Número de días con riesgo de incendios forestales (NDRI)
Definición del indicador	Número de días con riesgo potencial de incendios a través del índice de peligro de incendio de Nesterov.
Objetivo	Definir el riesgo climático de incendio para el municipio permitiendo caracterizar su problemática frente a los incendios a través de los cambios en las variables climáticas. Conocer el riesgo climático de incendio, permitirá al municipio definir estrategias para adaptarse o mitigar los efectos de posibles incendios.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$RI = \sum_{i=1}^n (T_i - T_p) \cdot H_i$ Donde: • T_i es la temperatura máxima diaria (°C). • T_p es el punto de rocío (°C). $T_p = \left(\frac{b \cdot \alpha}{a \cdot T} \right)$ $T_p = \frac{a \cdot T}{h + T} + \ln \left(\frac{H}{100} \right)$ siendo $a = 17.27$ y $b = 237.3^{\circ}C$ • H_i es el déficit de humedad (100-Humedad relativa %). • Si Precipitación >3mm, RI = 0.
Unidades	Días/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	A partir de datos climáticos de las siguientes fuentes de datos: • Datos climáticos de estaciones meteorológicas. • Datos Copernicus C3S. E-OBS daily gridded meteorological data.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Se obtendrá el número de días con riesgo potencial de incendios mediante el índice de Nesterov, representando los valores a lo largo de la secuencia temporal definida. Será necesario disponer al menos de datos en los últimos tres años.

Tabla 47. Indicador 9: Número de incendios forestales declarados.

Indicador 9	
Nombre	Número de incendios forestales declarados (NIFD)
Definición del indicador	Cuantificación del número de incendios que han ocurrido en el municipio a lo largo de los últimos 5 años.
Objetivo	Caracterizar el número de incendios forestales y su magnitud para poder definir estrategias que ayuden a adaptarse frente a su riesgo y o mitigar sus impactos potenciales
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$NIF = \sum_{i=1}^n IF_i$ Donde: • IF_i es el número de incendios forestales en el periodo de cálculo.
Unidades	Incendios/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	A partir del análisis de estadísticas: • Portal Datos Abiertos Junta de Castilla y León. • Global Forest Watch • https://www.icnf.pt/florestas/gfr/gfgrgestaoinformacao/estatisticas
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Se obtendrán el número de incendios de las estadísticas representando los valores a lo largo de la secuencia temporal definida. Será necesario disponer al menos de datos en los últimos tres años.

Tabla 48. Indicador 10: Número de episodios de contaminación del aire al año (PM10).

Indicador 10	
Nombre	Número de episodios de contaminación del aire al año (NEC) (PM10)
Definición del indicador	Número de días al año en los que se sobrepasa el umbral de 50 µg/m ³ (Valor Límite Diario (VLD)) para la concentración de partículas PM10.
Objetivo	Evaluar y monitorizar el número de días al año con concentraciones elevadas de partículas que podrían ocasionar problemas de salud sobre los ciudadanos
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$NEC_{PM10} = \sum_{i=1}^n EC_i$ Donde: • EC_i es el número de días con $PM10 > 50 \mu g/m^3$.
Unidades	Episodios/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• https://servicios.jcyl.es/esco/cargarFrmDatosHistoricos.action • https://qualar.apambiente.pt/downloads
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP "ADAPT CLIMA CENCYL" y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán mediante el análisis de los datos de medición de contaminantes, los cuales estarán disponibles anualmente en las fuentes de medición definidas para el indicador. En el caso de no disponer de una estación en el municipio objeto de estudio, se seleccionará la estación más próxima o se definirá un valor acorde a los datos de las estaciones disponibles y la población de los municipios objeto de comparación.

Tabla 49. Indicador 11: Número de episodios de contaminación del aire al año (O₃).

Indicador 11	
Nombre	Número de episodios de contaminación del aire al año (NEC) (O ₃)
Definición del indicador	Número de días al año en los que se sobrepasa el umbral de 120 µg/m ³ (Valor Límite Anual (VLA)) para la concentración de Ozono.
Objetivo	Evaluar y monitorizar el número de días al año con concentraciones elevadas de Ozono que podrían ocasionar problemas de salud sobre los ciudadanos
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$NEC_{O3} = \sum_{i=1}^n ECI$ Donde: • <i>ECi</i> es el número de días con O₃>120 µg/m³.
Unidades	Episodios/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• https://servicios.jcyl.es/esco/cargarFrmDatosHistoricos.action • https://qualar.apambiente.pt/downloads
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán mediante el análisis de los datos de medición de contaminantes, los cuales estarán disponibles anualmente en las fuentes de medición definidas para el indicador. En el caso de no disponer de una estación en el municipio objeto de estudio, se seleccionará la estación más próxima o se definirá un valor acorde a los datos de las estaciones disponibles y la población de los municipios objeto de comparación.

Tabla 50. Indicador 12: Número de días de calima por episodios africanos.

Indicador 12	
Nombre	Número de días de calima por episodios de polvo africano (NDC).
Definición del indicador	Número de días al año con intrusiones de polvo africano que generan un impacto negativo sobre la concentración de partículas (PM10) y por lo tanto, contribuyen al aumento de temperatura.
Objetivo	Evaluar y monitorizar el número de días al año con intrusiones de polvo africano que podrían ocasionar aumento de la temperatura así como problemas de salud sobre los ciudadanos
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$NDC = \sum_{i=1}^n EPA_i$ Donde: EPA_i es el número de días con episodios de polvo africano.
Unidades	Episodios/año
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	Histórico de informes de episodios naturales de contaminación en España. Eventos naturales de contaminación atmosférica en Portugal.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán mediante el análisis de los datos de medición de contaminantes (en base a PM10), los cuales estarán disponibles anualmente en las fuentes de medición definidas para el indicador. Se seleccionarán en la fuente de medición identificada, los datos más próximos a las zonas de estudio siendo estos los de la región Centro tanto para España como para Portugal.

Tabla 51. Indicador 13: Superficie verde en el entorno urbano.

Indicador 13	
Nombre	Superficie verde en el entorno urbano (SVEU)
Definición del indicador	Superficie verde urbana en el entorno urbano caracterizada a través del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).
Objetivo	Cuantificar la superficie verde en el entorno urbano para poder definir estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático que tengan en cuenta las áreas del municipio que ayudan a reducir la temperatura en superficie.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$SVEU = \sum_{i=1}^n Si$ Donde: • Si es la superficie verde en el entorno urbano.
Unidades	m ²
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Imágenes satelitales de alta resolución. • Imágenes multiespectrales obtenidas con dron. • Inspecciones de campo y registros municipales de áreas verdes.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán mediante el análisis de imágenes multiespectrales durante el periodo vegetativo (preferentemente en junio) caracterizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Los valores del índice inferiores a 0.4, se descartarán para quedarnos únicamente con las áreas de vegetación. Los resultados se representarán en gráficas de evolución.

Tabla 52. Indicador 14: Superficie verde urbana afectada por sequías y olas de calor.

Indicador 14	
Nombre	Superficie verde urbana afectada por sequías y olas de calor (SVAS)
Definición del indicador	Cantidad de hectáreas de áreas verdes urbanas que muestran signos de estrés o deterioro debido al impacto de las sequías y las olas de calor. Permite evaluar el impacto de eventos climáticos extremos en la vegetación urbana y la eficacia de las medidas de adaptación implementadas.
Objetivo	Evaluar y monitorizar la extensión de las áreas verdes urbanas afectadas por condiciones climáticas extremas con el fin de mejorar las estrategias de adaptación y mitigación en el entorno urbano
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$SVAS = \sum_{i=1}^n A_i$ Donde: • A_i es la superficie afectada por sequías y olas de calor.
Unidades	Hectáreas (Ha)
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Imágenes satelitales de alta resolución. • Imágenes multiespectrales obtenidas con dron. • Inspecciones de campo y registros municipales de áreas verdes.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán mediante el análisis de imágenes multiespectrales al inicio del verano (junio), caracterizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) seleccionando los valores entre 0.4 y 0.6 ya que se estima que estos valores se corresponden con vegetación poco vigorosa. Las variaciones en los valores del índice, nos permitirá cuantificar las áreas afectadas por el evento de cambio en la temperatura. Los resultados se representarán en gráficas de evolución. Será necesario calcularlo si han ocurrido eventos de ola de calor en el año objeto de estudio.

Tabla 53. Indicador 15: Superficie verde urbana afectada por temporales de viento.

Indicador 15	
Nombre	Superficie verde urbana afectada por temporales de viento (SVAV)
Definición del indicador	Cantidad de hectáreas de áreas verdes urbanas que muestran daños ocasionados por eventos extremos de viento. Permite evaluar el impacto de eventos climáticos extremos en la vegetación urbana y la eficacia de las medidas de adaptación implementadas.
Objetivo	Evaluar y monitorizar la extensión de las áreas verdes urbanas afectadas por condiciones climáticas extremas con el fin de mejorar las estrategias de adaptación y mitigación en el entorno urbano.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$SVAV = \sum_{i=1}^n Si$ Donde: • <i>Si</i> es la superficie afectada por temporales de viento.
Unidades	Hectáreas
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Imágenes satelitales de alta resolución.
	• Imágenes multiespectrales obtenidas con dron. • Inspecciones de campo y registros municipales de áreas verdes.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán mediante el análisis de imágenes multiespectrales al inicio y final de cada evento extremo de viento o a través de las estadísticas municipales. Se cuantificará el área afecta por caída de arbolado mediante la identificación visual en las imágenes. Será necesario calcularlo únicamente si han ocurrido eventos externos de viento en el año objeto de estudio.

Tabla 54. Indicador 16: Superficie verde urbana afectada por inundaciones.

Indicador 16	
Nombre	Superficie verde urbana afectada por inundaciones (SVAI)
Definición del indicador	Cantidad de hectáreas de áreas verdes urbanas que muestran daños ocasionados por eventos extremos de precipitación. Permite evaluar el impacto de eventos climáticos extremos en la vegetación urbana y la eficacia de las medidas de adaptación implementadas.
Objetivo	Evaluar y monitorizar la extensión de las áreas verdes urbanas afectadas por condiciones climáticas extremas con el fin de mejorar las estrategias de adaptación y mitigación en el entorno urbano.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$SVAI = \sum_{i=1}^n Si$ Donde: • <i>Si</i> es la superficie afectada por inundaciones.
Unidades	Hectáreas
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Imágenes satelitales de alta resolución. • Imágenes multiespectrales obtenidas con dron. • Inspecciones de campo y registros municipales de áreas verdes.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán mediante el análisis de imágenes multiespectrales al inicio y final de cada evento de inundación o a través de las estadísticas municipales. Se cuantificará el área afecta por inundación mediante la identificación visual en las imágenes del área afectada. Será necesario calcularlo únicamente si han ocurrido eventos de inundación en el año objeto de estudio.

Tabla 55. Indicador 17: Superficie verde urbana afectada por incendios.

Indicador 17	
Nombre	Superficie verde urbana afectada por incendios (SVUAI)
Definición del indicador	Cantidad de hectáreas de áreas verdes urbanas que muestran daños ocasionados por incendios. Permite evaluar el impacto de los incendios en la vegetación urbana y la eficacia de las medidas de adaptación implementadas.
Objetivo	Evaluar y monitorizar la extensión de las áreas verdes urbanas afectadas por condiciones climáticas adversas con el fin de mejorar las estrategias de adaptación y mitigación en el entorno urbano.
Plazo para alcanzar el objetivo	-
Tipo	Cuantitativo
Expresión matemática	$SVUAI = \sum_{i=1}^n Si$ Donde: • Si es la superficie urbana afectada por incendios.
Unidades	Hectáreas
Frecuencia de medición	Anual
Fuente de medición	• Imágenes satelitales de alta resolución. • Imágenes multiespectrales obtenidas con dron. • Inspecciones de campo y registros municipales de áreas verdes.
Responsable de medición	Equipo técnico de monitoreo ambiental y urbano del proyecto en colaboración con los departamentos de medio ambiente y urbanismo locales
Responsable toma de decisiones	Coordinador del Proyecto Interreg POCTEP “ADAPT CLIMA CENCYL” y autoridades municipales
Seguimiento y presentación	Los datos se recogerán mediante el análisis de imágenes multiespectrales al inicio y final de cada incendio o a través de las estadísticas municipales. Se cuantificará el área afecta por el incendio mediante la identificación visual en las imágenes del área quemada. Será necesario calcularlo únicamente si han ocurrido incendios en el año objeto de estudio.

Una vez definidos los indicadores, se han cuantificado en cada municipio para el periodo 2021- 2023 a través de las fuentes definidas en las tablas de los indicadores (Tabla 39 a Tabla 55). Algunos de estos indicadores no se han podido cuantificar debido a la ausencia de evento o datos estadísticos que permitan su caracterización. Por ello, estos indicadores se establecen como una herramienta para apoyar la evaluación y por tanto la monitorización de aumento en la temperatura debido a los cambios en el clima futuro. A continuación, se incluye el listado de indicadores y su representación en los años objeto de estudio.

1. Temperatura media anual (TMA).
2. Temperatura en superficie para los días más cálidos del año (TS).
3. Número de olas de calor al año (NOC).
4. Precipitación media anual (PMA).
5. Evapotranspiración potencial (ETP).
6. Número de eventos extremos asociados a inundaciones (NEI).
7. Número de eventos extremos asociados a sequías (NES).
8. Número de días con riesgo de incendios forestales (NDRI).
9. Número de incendios forestales declarados (NIFD).

10. Número de episodios de contaminación del aire al año (NEC) (PM10).
11. Número de episodios de contaminación del aire al año (NEC) (O3).
12. Número de días de calima por episodios de polvo africano (NDC).
13. Superficie verde en el entorno urbano (SVEU).
14. Superficie verde urbana afectada por sequías y olas de calor (SVAS).
15. Superficie verde urbana afectada por temporales de viento (SVAV).
16. Superficie verde urbana afectada por inundaciones (SVAI).
17. Superficie verde urbana afectada por incendios (SVUAI).

Los indicadores 15, 16 y 17, no se han representado en su evolución temporal al no disponer de estadísticas locales para su cuantificación. Estos indicadores, se han incluido para disponer de un método para su monitorización en los próximos años. Por otro lado, el indicador 2, se ha caracterizado únicamente para el año 2023 debido a que es el año empleado para la caracterización del efecto isla de calor en este estudio. La representación gráfica de los indicadores se incluye a continuación (Figura 52 a Figura 66):

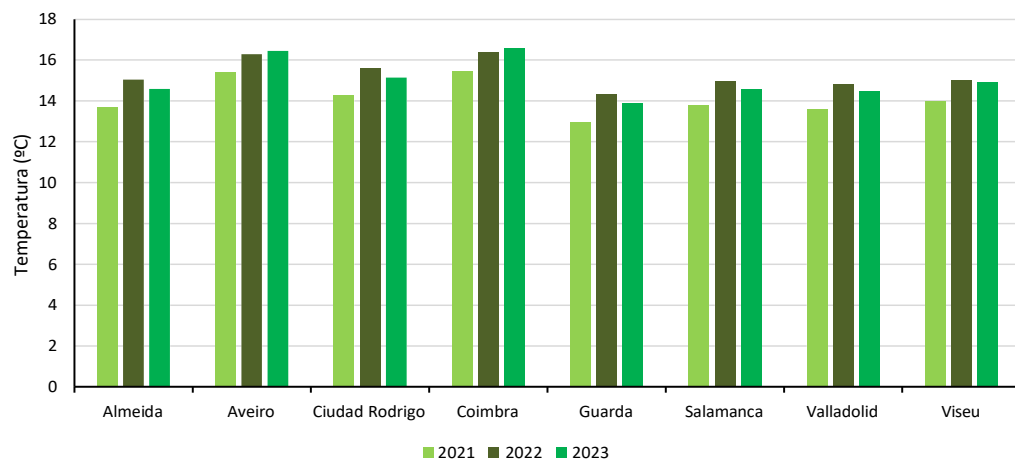


Figura 52. Evolución de la temperatura media anual (TMA)

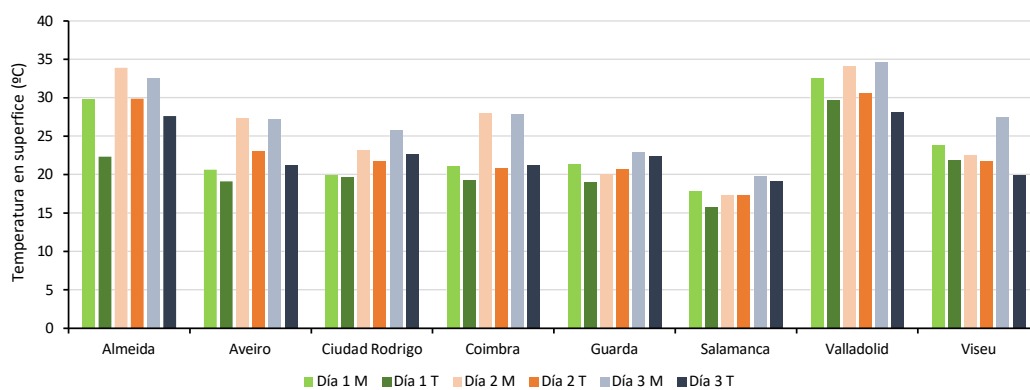


Figura 53. Evolución de la temperatura en superficie para los tres días más cálidos del año.

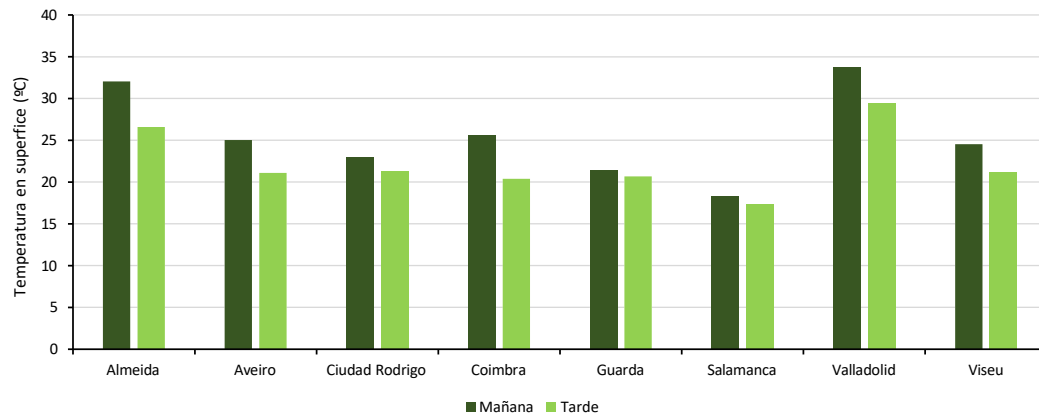


Figura 54. Evolución de la temperatura media en superficie a partir de datos de los tres días más cálidos del año.

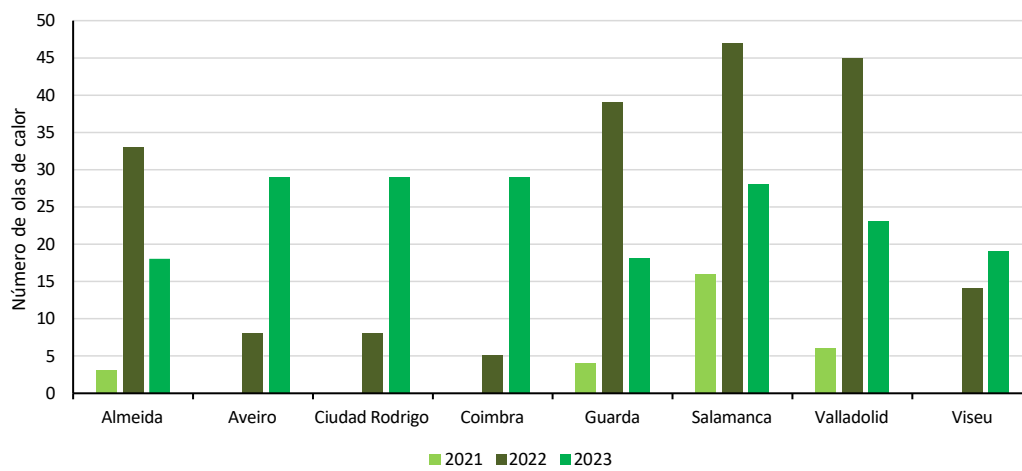


Figura 55. Evolución del número de olas de calor (NOC).

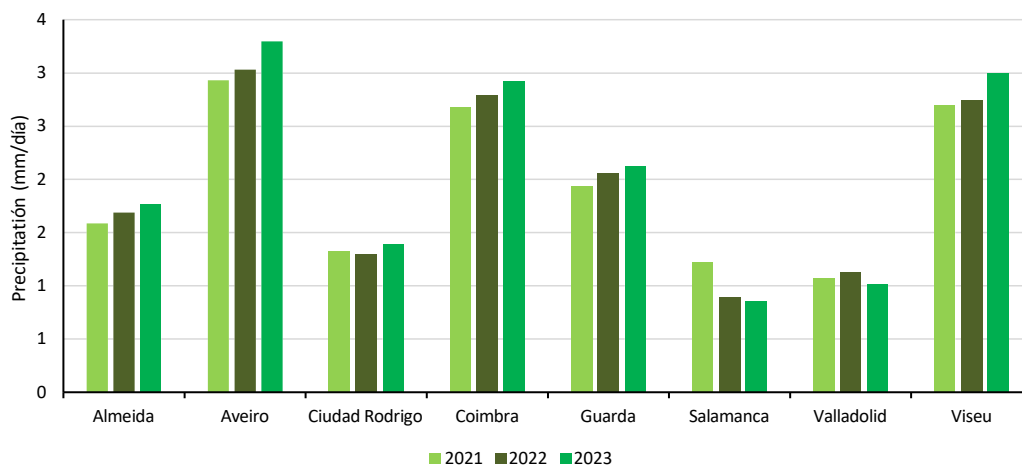


Figura 56. Evolución de la precipitación media anual (PMA).

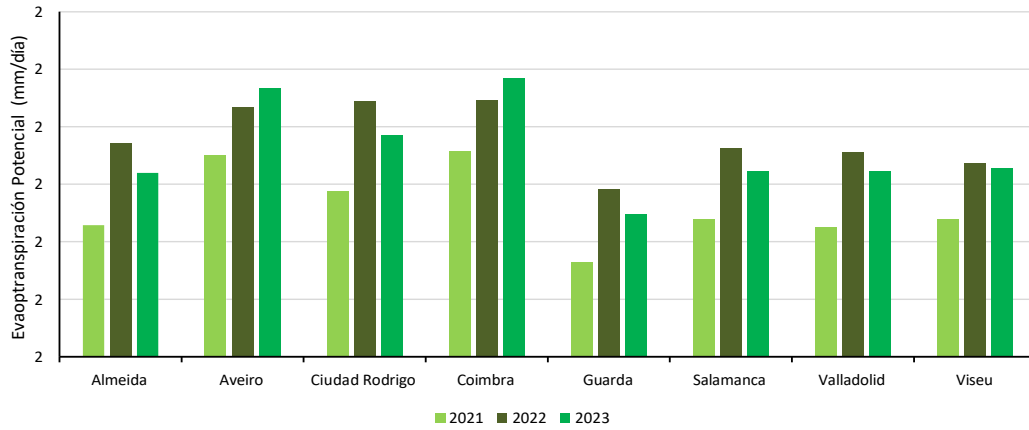


Figura 57. Evolución de la evapotranspiración potencial media anual (ETP).

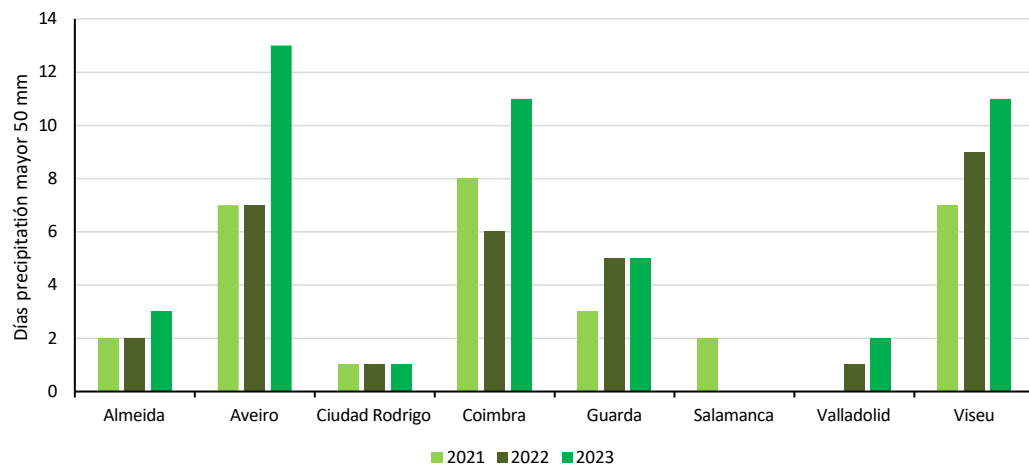


Figura 58. Evolución de los días potenciales de precipitación torrencial (Precipitación media mayor 25 mm) (NEI).

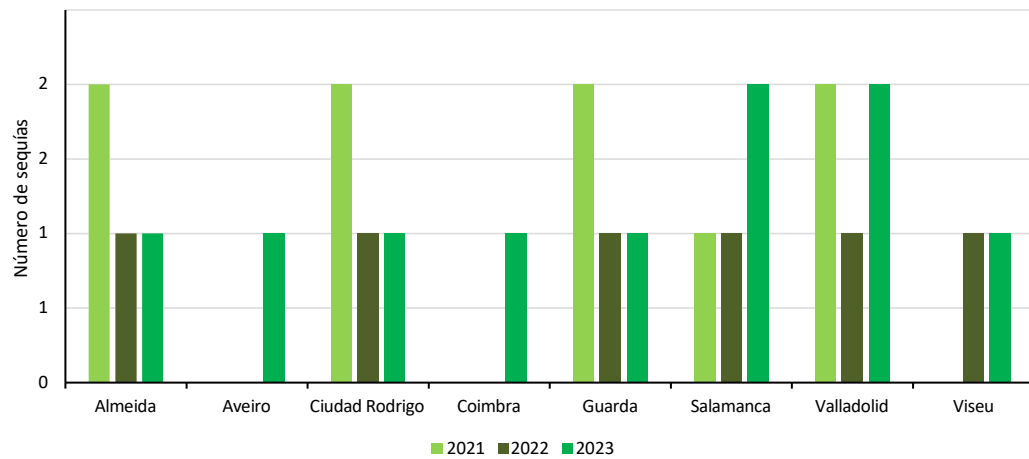


Figura 59. Evolución del número de sequías al año (NES).

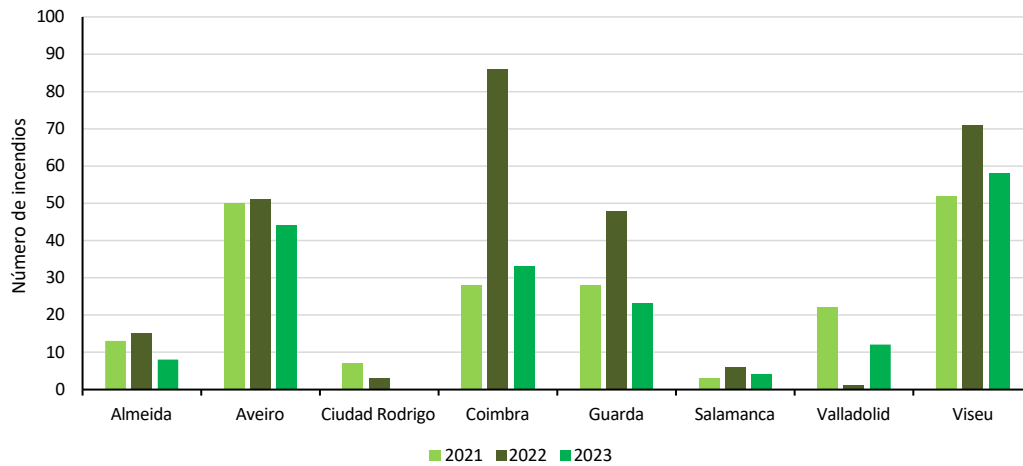


Figura 60. Evolución anual del número de incendios declarados (NIFD).

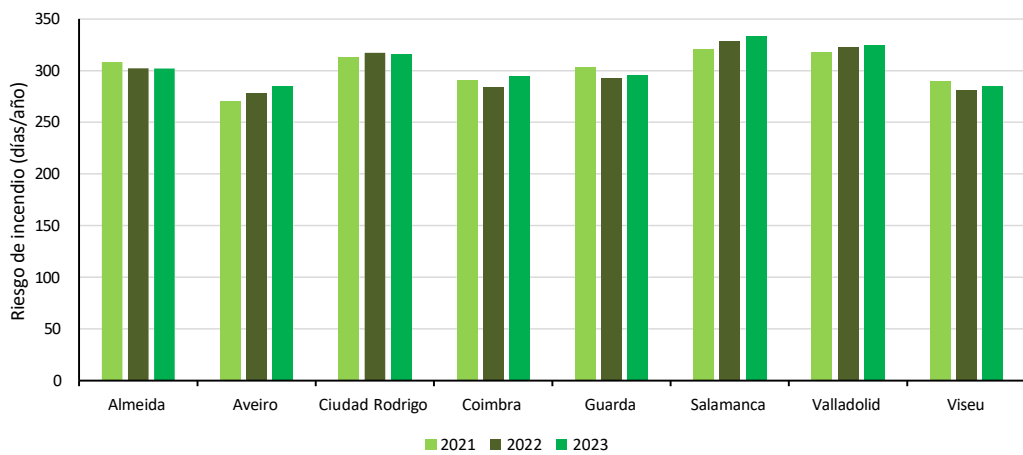


Figura 61. Evolución anual del número de días con riesgo de incendio (NDRI).

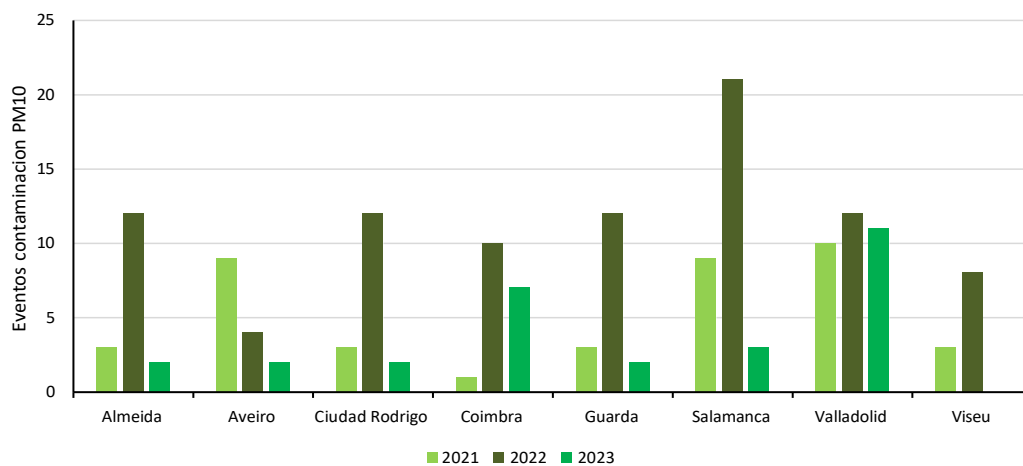


Figura 62. Evolución anual del número de episodios de contaminación al año (NEC) . Datos de Almeida, Guarda y Ciudad Rodrigo, fueron estimados a partir de los datos de las estaciones de Coimbra, Salamanca y Viseu.

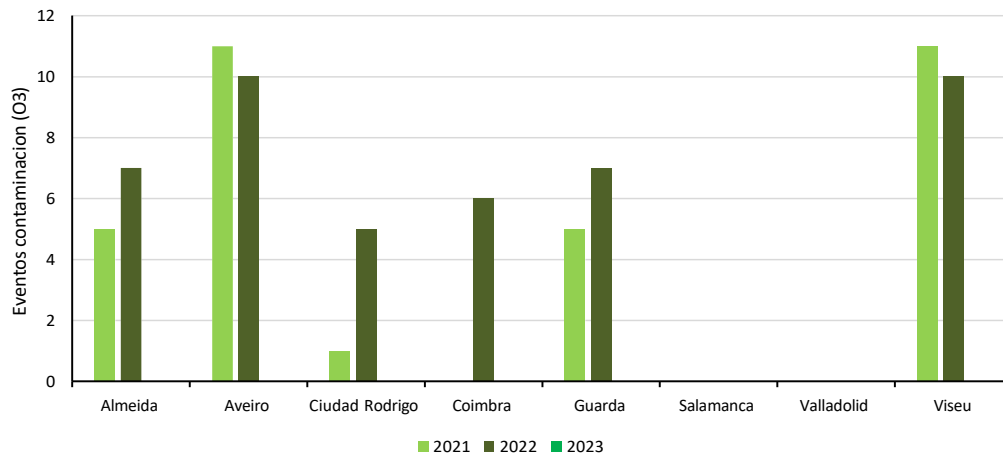


Figura 63. Evolución anual del número de episodios de contaminación al año (NEC) (O3). Datos de Aveiro, Almeida, Guarda y Ciudad Rodrigo, estimados a partir de las estaciones de Coimbra, Salamanca y Viseu.

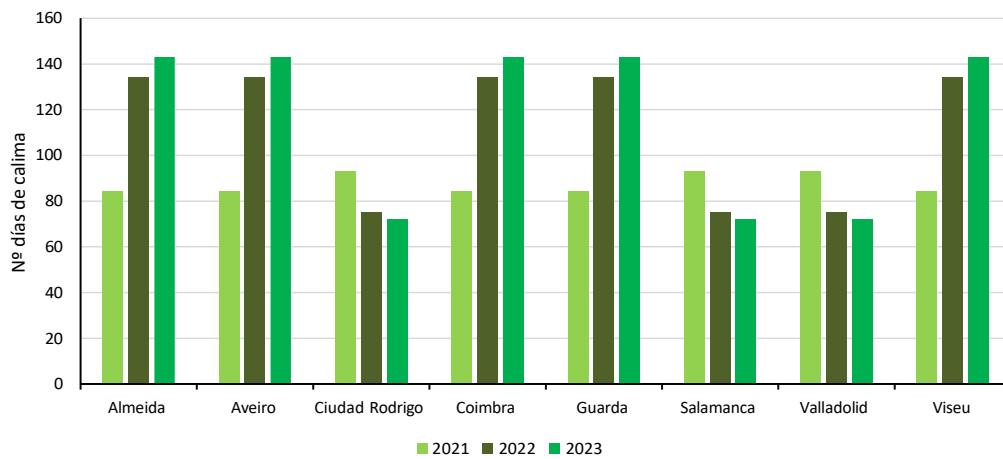


Figura 64. Evolución anual del número de días de calma (NDC).

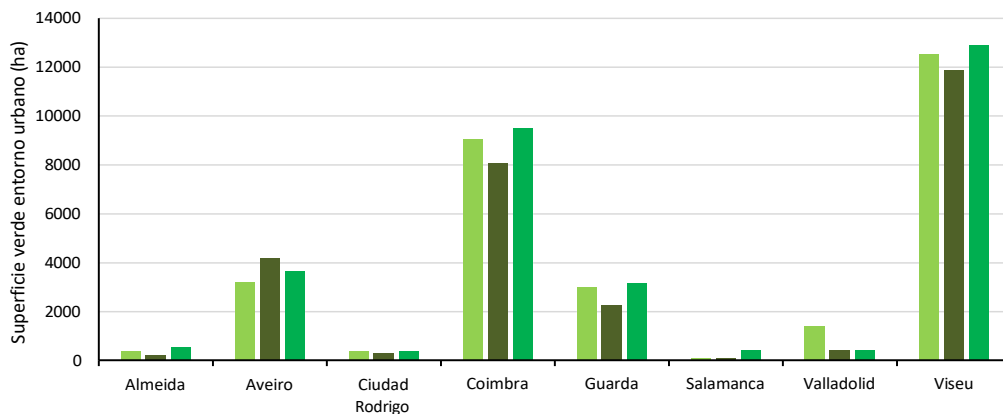


Figura 65. Evolución anual de la superficie verde en el entorno urbano (SVEU) a partir del índice NDVI.

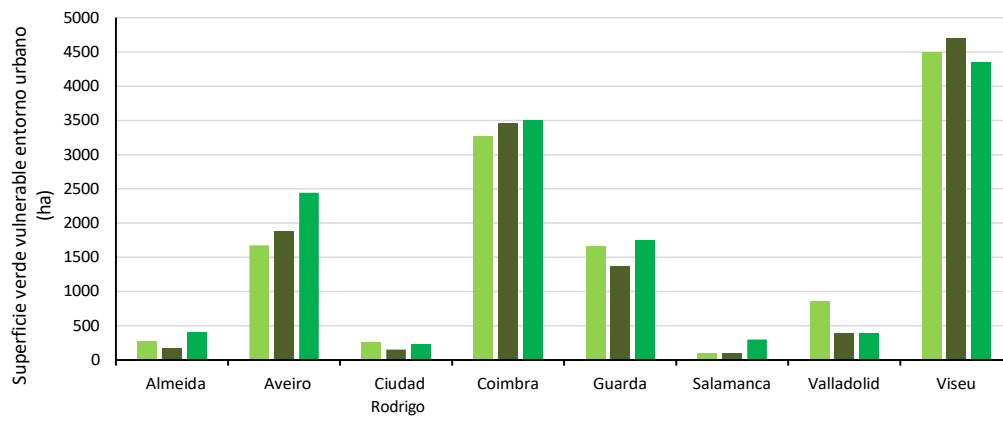


Figura 66. Evolución anual de la superficie verde en el entorno urbano afectada por sequías y olas de calor (SVAS) a partir del índice NDVI.

9. CONCLUSIONES

El presente estudio ha permitido evaluar la resiliencia y la adaptación de distintas ciudades de la red CENCYL frente al cambio climático, con un enfoque específico en la caracterización de la isla de calor urbana. La combinación de herramientas de análisis geoespacial y datos climáticos ha proporcionado un marco robusto para cuantificar la magnitud de este fenómeno y sus implicaciones en el confort térmico urbano.

Los resultados evidencian que la isla de calor urbana es un problema significativo en todas las ciudades analizadas, aunque su intensidad varía en función de factores como la compacidad urbana, la cobertura vegetal, la calidad del aire y la proximidad a cuerpos de agua. Se ha demostrado que la presencia de vegetación y superficies con alta fracción de cuba cubierta tienen un efecto atenuante en la acumulación de calor, mientras que la densidad edificatoria y la ausencia de superficie con vegetación en el entorno urbano, intensifica la retención térmica. Además, la orientación de las calles y la circulación del viento desempeñan un papel clave en la disipación del calor, destacando la necesidad de considerar estos factores en el diseño urbano para hacer más resilientes las ciudades frente a los efectos del cambio climático.

El análisis de decisión multicriterio implementado para la zonificación de la isla de calor, ha permitido identificar zonas críticas dentro de cada ciudad y desarrollar mapas de confort térmico, clasificando las áreas según su vulnerabilidad térmica. Estos mapas constituyen una herramienta esencial para la toma de decisiones, permitiendo priorizar intervenciones en aquellas áreas con mayor exposición al calor extremo y menor capacidad de adaptación debido a todos los factores evaluados que condicionan de forma directa el aumento de las temperaturas en la zona urbana. En este sentido, la identificación de refugios climáticos se presenta como una estrategia efectiva para mitigar los impactos del calor, proporcionando espacios de confort térmico fácilmente accesibles para la población. Estos refugios climáticos, se han caracterizado evaluando el tiempo de acceso desde las áreas con mayor carga térmica dentro del municipio.

Por otro lado, la matriz de riesgos climáticos ha permitido evaluar el riesgo frente a peligros climáticos relacionados con el aumento de la temperatura a partir de la caracterización de la probabilidad de excedencia de eventos climáticos extremos en cada municipio y los impactos que estos podrían ocasionar. Se ha constatado un aumento en la frecuencia en la probabilidad de días cálidos, olas de calor y temperaturas extremas, lo que refuerza la necesidad de adoptar medidas de adaptación a corto y largo plazo para paliar los efectos sobre la población y mejorar la resiliencia climática de los entornos edificados. En este contexto, los datos climáticos futuros obtenidos por escenario climático, son fundamentales para anticipar tendencias y así poder diseñar estrategias resilientes y eficaces frente al aumento de las temperaturas.

Como parte de la caracterización del riesgo, el estudio ha identificado impactos significativos del cambio climático en la vegetación urbana y periurbana, incluyendo pérdidas en la producción primaria neta debido a sequías y olas de calor, así como estimaciones de los daños ocasionados por vientos extremos e incendios forestales en cada uno de los municipios. La evaluación económica de estos impactos pone en relevancia la necesidad de implementar medidas de conservación y restauración de la cubierta vegetal para minimizar las pérdidas y daños en los ecosistemas, contribuyendo a garantizar su supervivencia a la vez que se reducen las pérdidas económicas que cada impacto sería capaz de generar.

Para concluir, hay que destacar que los resultados de este estudio de la evaluación del efecto del aumento de las temperaturas, subrayan la importancia de incorporar estrategias de adaptación climática en la planificación tanto urbana como del territorio. La expansión de zonas verdes, la mejora de la infraestructura urbana para favorecer la disipación térmica y la reducción de la contaminación atmosférica son acciones clave para mitigar los efectos de la isla de calor urbana y mejorar la calidad de vida de la población. Asimismo, el desarrollo de indicadores para la evaluación de la sensibilidad y capacidad adaptativa junto con herramientas que permitan la monitorización y actualización periódica de los efectos a lo largo del tiempo mediante el uso de los indicadores, permitirán una respuesta más efectiva ante los desafíos derivados del cambio climático. Finalmente, hay que destacar que el estudio del comportamiento térmico de los ocho municipios, sienta las bases para la formulación de políticas y acciones orientadas a su sostenibilidad y resiliencia en el futuro.

10. RELACIÓN DE ENTREGABLES ASOCIADOS

Los entregables asociados a la definición del mapa de la isla de calor urbana, son los siguientes:

1. Memoria técnica donde se describe la metodología implementada a lo largo de todo el estudio incluyendo conclusiones y recomendaciones por municipio.
2. Mapas impresos en formato PDF de cada una de las variables que intervienen en el proceso de cálculo y definición de la isla de calor así como en la zonificación de áreas verdes en cada municipio.
3. Archivos ráster (formato TIFF) de todas las variables empleadas en el proceso de análisis de cada uno de los municipios. Estos archivos, incluyen toda la información georreferenciada empleada en el cálculo de la isla de calor y variables accesorias.
4. Datos de partida, análisis de impactos y cálculo de indicadores. Tablas Excel con los resultados de la cuantificación del impacto y los indicadores de vulnerabilidad y capacidad adaptativa.

Los puntos 2, 3 y 4, se entregan en carpetas comprimidas por municipio, que contienen subcarpetas con los mapas impresos y la cartografía en formato ráster así como los archivos empleados para la cuantificación de impactos e indicadores.