

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL FOTOVOLTAICO DE LAS CUBIERTAS DE EQUIPAMIENTOS PÚBLICOS EN LA CIUDAD DE ZARAGOZA

Autor: Alejandro Moraleja Segura

Directores: Antonio Luis Montealegre Gracia, María Paz Errea Abad

Máster Universitario en

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

Noviembre de 2021



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía y
Ordenación del Territorio**



RESUMEN

En los últimos años ha habido un aumento creciente en la preocupación acerca de la contaminación en las ciudades, lo que se ha traducido en un incremento de los estudios que tratan de aportar soluciones para minimizar los problemas medioambientales en estos espacios. El objetivo principal de este trabajo es estimar el potencial fotovoltaico de las cubiertas de equipamientos públicos de la ciudad de Zaragoza mediante datos LiDAR, información catastral y herramientas SIG. Se ha tomado como punto de partida la iniciativa del Ayuntamiento denominada Actur Barrio Solar, pero trasladada al resto de la ciudad, para lo cual se han seleccionado centros de salud, centros deportivos, y pabellones municipales. A partir de las características morfológicas y geométricas de las azoteas de dichos equipamientos se ha diseñado un análisis multi-criterio para calcular fundamentalmente cuanta energía pueden producir y a cuántas viviendas se podría abastecer anualmente según las indicaciones del Real Decreto 244/2019 del autoconsumo. Los resultados obtenidos muestran una heterogeneidad en el potencial de generación de energía, así como en el abastecimiento a las viviendas. No obstante, y teniendo en cuenta las características socioeconómicas de cada uno de los distritos de la ciudad, es posible proponer zonas de actuación preferente donde la implantación de la energía fotovoltaica podría beneficiar a un importante número de viviendas, especialmente a las de rentas más bajas.

Palabras clave: *LiDAR, Catastro, SIG, energía solar, planificación urbana, autoabastecimiento*

ABSTRACT

In recent years there has been a growing increase in concern about pollution in cities, which has resulted in an increase in studies that try to provide solutions to minimize environmental problems in these spaces. The main objective of this work is to estimate the photovoltaic potential of the rooftops of public facilities in the city of Zaragoza using LiDAR data, cadastral information and GIS tools. The initiative of the City Council called Actur Barrio Solar has been taken as a starting point, but transferred to the rest of the city, for which health centers, sports centers, and municipal pavilions have been selected. Based on the morphological and geometric characteristics of the rooftops of those facilities, a multi-criteria analysis has been designed to calculate how much energy they can produce and how many dwellings could be supplied annually according to the indications of Royal Decree 244/2019 on self-consumption. The results obtained show a heterogeneity in the power generation potential, as well as in the supply to dwellings. However, and taking into account the socioeconomic characteristics of each urban district, it is possible to propose preferential areas of action where the implementation of photovoltaic energy could benefit a significant number of dwellings, especially those with lower incomes.

Key Words: *LiDAR, Cadastre, GIS, solar energy, urban planning, self-sufficiency.*

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	7
2.	OBJETIVOS	9
3.	ÁREA DE ESTUDIO	10
4.	MATERIAL Y MÉTODOS	11
4.1.	Datos LiDAR-PNOA.....	11
4.2.	Ortofotografías aéreas PNOA.....	13
4.3.	Datos catastrales e inventario de equipamientos públicos	13
4.4.	Caracterización de las cubiertas de los equipamientos públicos	15
4.4.1.	Obtención del Modelo Digital de Superficies (MDS).....	15
4.4.2	Inclinación de las cubiertas	15
4.4.3.	Orientación de las cubiertas	16
4.4.4.	Análisis de sombras.....	16
4.4.5.	Cálculo de la irradiancia solar	18
4.5.	Análisis multi-criterio para determinar la producción de energía fotovoltaica	18
4.5.1.	Cálculo de la radiación solar anual en kWh/m ²	19
4.5.2.	Cálculo del coeficiente de eficiencia del panel (Npv).....	20
4.5.3.	Cálculo del área del panel (Apv).....	20
4.5.4.	Cálculo del coeficiente de pérdidas del sistema (PR)	22
4.5.5.	Cálculo de la energía total anual (Ee)	22
4.6.	Estimación del potencial de producción de energía de los equipamientos y del área de abastecimiento	24
4.7.	Datos demográficos y económicos	24
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
5.1.	Estimación del potencial fotovoltaico de los equipamientos deportivos y de salud	24
5.2.	Ánalisis del potencial fotovoltaico por distritos urbanos	26
5.3.	Estimación del autoabastecimiento de los hogares afectados por el área de influencia de los equipamientos municipales	29
5.4.	Propuestas de zonas de actuación preferente.....	29
6.	CONCLUSIONES	32
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Irradiación solar horizontal de Europa y alrededores. Fuente: SOLARGIS	7
Figura 2. Precios de la electricidad para consumo familiar en la primera mitad de 2021. Fuente: Eurostat	8
Figura 3. Objetivos de la Agenda 2030. Fuente: Agenda 2030	10
Figura 4 . Horas mensuales de sol en Zaragoza. Fuente: Weather and climate	10
Figura 5. Porcentaje de horas de sol por mes en Zaragoza. Fuente: Weather and climate	10
Figura 6. Distritos urbanos de Zaragoza	11
Figura 7. Componentes de un sistema LiDAR aerotransportado. Fuente: Renslow (2013).....	12
Figura 8. Características de los vuelos LiDAR-PNOA de segunda cobertura. Fuente: PNOA (2021).	12
Figura 9. Cartografía catastral de la Dirección General del Catastro y sus atributos.	14
Figura 10. Localización de los centros deportivos municipales (C.D.M.) y de los pabellones deportivos (P.D.)	14
Figura 11. Localización de los centros de salud (C.S.) y de los centros de especialidades (C.E.)	15
Figura 12. Proceso de creación del MDS.....	15
Figura 13. Ejemplo de huella de edificio, de MDS y de las capas ráster de inclinación y orientación generadas para la zona del C.D.M. Delicias	16
Figura 14. Interfaz de Solar Geometry 2 y configuración para la descarga de los datos.....	17
Figura 15. Ejemplo de los datos de elevación y azimut solar de las horas centrales del día para calcular las sombras.	17
Figura 16. Proceso de elaboración del mapa de sombras o hillshade.	18
Figura 17. Mapa de sombras entre las 10 AM y las 2 PM y mapa de radiación solar de la zona del C.D.M. Delicias.....	18
Figura 18. Colocación de placas solares según la inclinación del tejado. Fuente: Renusol.	19
Figura 19. Características del panel fotovoltaico colocado en la iniciativa Actur Barrio Solar. Fuente: fotografías cedidas por Actur Barrio Solar.	20
Figura 20. ‘Raster calculator’ con las fórmulas de pérdidas por inclinación y orientación.....	21
Figura 21. Superficie de panel fotovoltaico por píxel del C.D.M. Delicias.....	22
Figura 22. Esquema del proceso metodológico para obtener la energía (E_e)	23
Figura 23. Áreas de influencia (500 m) de los centros deportivos (C.D.M.), pabellones deportivos (P.D.), centros de salud (C.S.) y centros de especialidades (C.E.) para el abastecimiento de energía fotovoltaica a los hogares.....	28
Figura 24. Zonas de actuación preferente y área de afección.	31
Figura 25. Nuevas propuestas de centros para la colocación de paneles fotovoltaicos	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las nubes de puntos empleadas	13
Tabla 2. Valores y significado de clasificación automática	13
Tabla 3. Potencial fotovoltaico, superficie total de panel, número de paneles y viviendas abastecidas por los C.D.M y P.D.M	25
Tabla 4. Potencial fotovoltaico, superficie total de panel, número de paneles y viviendas abastecidas por los C.E. y C.S.....	26
Tabla 5. Población y densidad de población de los distritos de la ciudad de Zaragoza. Fuente: INE ..	27
Tabla 6. Renta por hogar y por persona de los distritos de la ciudad de Zaragoza. Fuente: Ebropolis-GEOT (2017).	27
Tabla 7. Viviendas beneficiadas por la producción de energía de los equipamientos municipales....	29
Tabla 8: Características de la selección de los centros de salud, cetros deportivos y pabellones de actuación preferente.	30

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a todas las personas que han estado a mi lado mientras realizaba este trabajo ya que en gran medida son las que han hecho posible que pudiera terminarlo. En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores de TFM, Antonio Luis Montealegre Gracia y María Paz Errea Abad por su ayuda a la hora de la realización de este trabajo, consejos e ideas para abordarlo.

En segundo lugar, al proyecto “Actur Barrio Solar” por ser la base de nuestro trabajo y aportar la información necesaria acerca de las características de los paneles fotovoltaicos. También por estar abiertos a cualquier duda y aportar el material que fuera necesario.

Agradezco también el apoyo de todos los profesores del Departamento de Geografía y Ordenación Territorial de la Universidad de Zaragoza, más en concreto a los del Máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, que hicieron posible mi formación y han estado allí para cualquier duda o problema que me haya surgido a pesar de no ser mis directores.

Finalmente, a mi familia, amigos y compañeros de clase del máster y de la carrera que siempre han estado disponibles para cualquier problema o duda y han vivido esta última etapa de estudios conmigo.

Muchas gracias a todos.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El cambio climático y la degradación del medio ambiente son una amenaza existencial a la que se enfrentan Europa y el resto del mundo. Las ciudades consumen más del 80% de la energía mundial y generan más del 70% del total de residuos del planeta (ONU-Hábitat, 2010), generando grandes problemas de carácter medioambiental. Según numerosos estudios (World Urban Prospect, 2018; Comisión Europea, 2020), se prevé que en el año 2050 el 68% de la población mundial viva en áreas urbanas, por lo que son un centro de actuación necesario y primordial.

El desarrollo, promoción y potenciación de las energías de carácter renovable pueden contribuir a una minimización de la contaminación urbana y a la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles. La Directiva 2009/28/CE ya estableció el objetivo de lograr una cuota del 20% de uso de energías renovables sobre el consumo total bruto y un 10% de energía procedente de fuentes renovables en los combustibles usados para el transporte. Más recientemente, mediante la Directiva UE 2018/2001 se estableció un nuevo objetivo en relación con las energías renovables para año 2030, el cual plantea una cuota del 32% del consumo final de energía renovable y un incremento del 14% para la cuota de combustibles renovables para transporte. Asimismo, ‘El Pacto Verde Europeo’ que plantea la Comisión Europea, pretende hacer de Europa un continente climáticamente neutro para 2050 mediante un suministro de energía limpia, asequible y segura a la población.

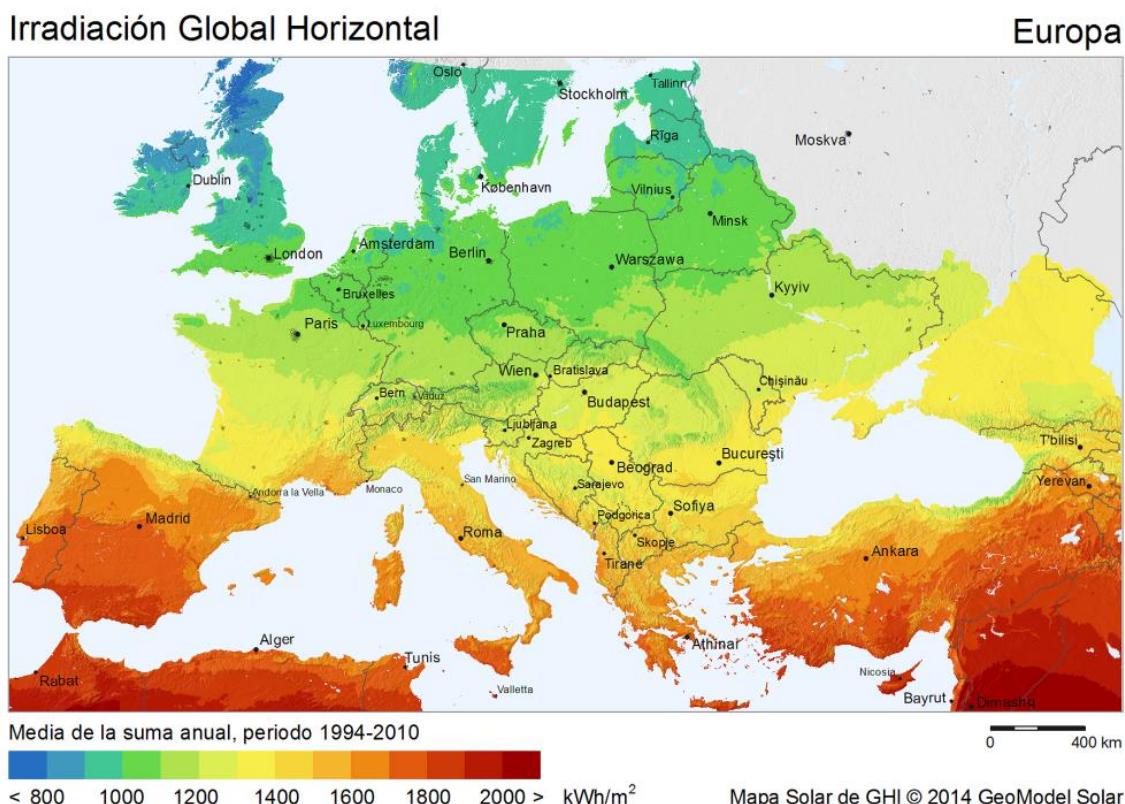
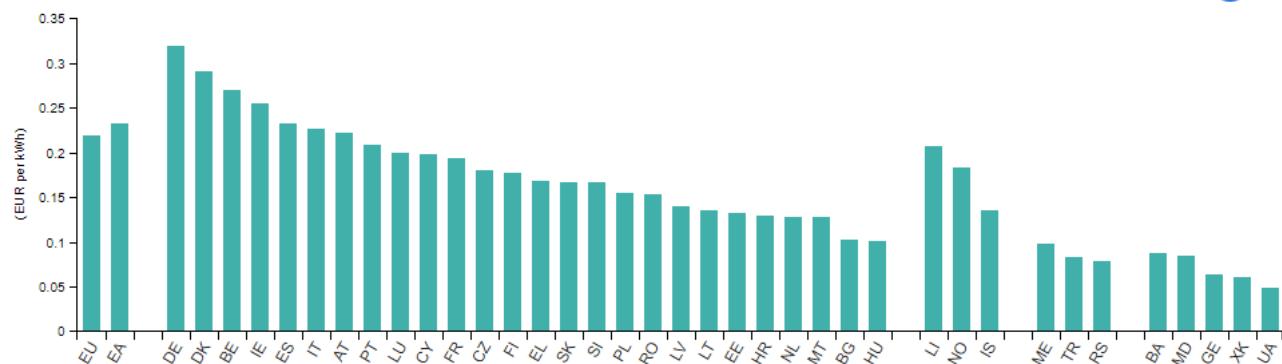


Figura 1. Irradiación solar horizontal de Europa y alrededores. Fuente: SOLARGIS.

En la actualidad, sobre el 75% del parque inmobiliario de la Unión Europea (UE) es ineficiente desde el punto de vista energético y los edificios son responsables del 40% del consumo energético de la UE (Comisión Europea, 2020). A esto hay que unir la situación de pobreza energética que afrontan los sectores más desfavorecidos de la sociedad y que cada vez es más visible. En España, un 11% de los hogares son incapaces de mantener el confort térmico según un estudio de la Asociación de Ciencias Ambientales (ACA, 2016), el 5% han sufrido cortes del suministro por impago y el 7% se encuentran en una situación de pobreza energética. Según los datos de Eurostat de la primera mitad del año 2021 (Figura 2), España cuenta con uno de los precios más altos por kWh de Europa, a pesar de no ser de los países con una mayor renta.



Sweden: data not available

Kosovo: This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo Declaration of Independence.

Source: Eurostat (online data codes: nrg_pc_204)

eurostat

Figura 2. Precios de la electricidad para consumo familiar en la primera mitad de 2021. Fuente: Eurostat.

Dada la magnitud del problema, es necesario el estudio de alternativas viables para aportar soluciones y proponer cambios. En el caso de España, por su localización y climatología, cuenta con un gran número de horas de sol al año, lo que se traduce en un gran potencial a la hora de producir energía fotovoltaica (por encima de los 1400 kWh/m²), tal como se muestra en la Figura 1. La energía solar fotovoltaica es de carácter renovable y limpia, y se obtiene transformando la radiación solar en electricidad mediante paneles fotovoltaicos. La energía solar fotovoltaica ha experimentado en la última década una drástica reducción de costes que la ha convertido, junto con la eólica, en una de las tecnologías energéticas con mayor proyección de futuro.

En los últimos años se han llevado a cabo diferentes estudios para evaluar el potencial solar fotovoltaico en zonas urbanas. Uno de los primeros estudios a nivel nacional fue el de Izquierdo et al. (2008), que desarrolla una metodología en la cual estima los tejados disponibles para instalaciones solares con la cuantificación de los errores del propio análisis. Es un trabajo a gran escala que toma como unidad administrativa los términos municipales de España y considera el área de tejado per cápita relacionando edificios y población. Bergamasco et al. (2011) aplican un algoritmo para analizar ortofotografías aéreas en la región de Piamonte (Italia) y un muestreo de los tejados para analizar la superficie total de tejado disponible, las zonas afectadas por sombras y otros elementos típicos de los tejados (instalaciones para la climatización, chimeneas, ascensores, etc.).

Algunos trabajos son en zonas más pequeñas y evalúan de forma individual los edificios y su entorno. Un ejemplo es el estudio de Díaz-Vilarió et al. (2013), donde proponen una metodología para generar un ‘Modelo de información de edificios’ que permita definir las superficies apropiadas para instalar placas fotovoltaicas. En este caso los datos se toman mediante un escáner láser terrestre que se va situando en diferentes ubicaciones y se incluyen datos de los alrededores del edificio que puedan generar sombras. Martín Ávila (2015) elabora un modelo geográfico en Miraflores de la Sierra para seleccionar los emplazamientos idóneos, determinar la radiación solar recibida en la zona seleccionada y estimar la potencia instalada y la producción eléctrica fotovoltaica. El análisis se basa en un modelo urbano 3D generado a partir de datos LiDAR. En la misma línea, Domínguez (2016) implementa el modelo gSolarRoof desarrollado por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) para el municipio de Alpedrete. El objetivo del proyecto es dotar al Ayuntamiento del Municipio de información clara y veraz sobre el potencial solar para que pueda adoptar medidas. El estudio concluye con que el potencial solar es próximo a la demanda anual en un escenario de autoconsumo y generación distribuida.

Otros estudios más recientes, como el de Montealegre et al. (2022), además de evaluar mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos LiDAR el potencial energético de las azoteas de un

barrio de Zaragoza, añade cálculo del potencial de producir alimentos y recolectar agua de lluvia (nexo alimentación-energía-agua). Tiene en cuenta la morfología urbana del entorno y obtiene evaluaciones precisas de los patrones de producción y desarrollo. Los resultados muestran diferencias entre las morfologías urbanas residenciales y no residenciales del barrio. Las áreas industriales presentan las más altas tasas de productividad. Las mayores tasas de producción se producen en la energía fotovoltaica y las que menos en los alimentos, ya que requieren tejados planos.

En este sentido, han surgido diversas iniciativas que aúnan la lucha contra el cambio climático y la pobreza energética, como es el caso del proyecto Actur Barrio Solar, impulsada por ECODES, EDP y el Ayuntamiento de Zaragoza, con la colaboración de la Fundación Schneider Electric, Fundación EDP y Zaragoza Vivienda. El objetivo del proyecto es ofrecer acceso al autoconsumo de energía a los comercios y hogares de la zona norte del barrio Actur-Rey Fernando de la ciudad de Zaragoza. Tendrá una cuota de 6,9 € al mes, de forma que el ciudadano tendrá derecho a la energía solar generada por 0,5 kW⁽¹⁾ y será descontada de su factura eléctrica. Actur Barrio Solar pretende generar energía renovable de proximidad y solidaria, fomentando la participación de las personas en riesgo de exclusión (el 10% de los participantes serán familias vulnerables que participarán de forma gratuita). Por el momento, se sustenta en dos instalaciones fotovoltaicas ubicadas en los pabellones deportivos municipales Siglo XXI y Actur V y los comercios y residentes que se estén a menos de 500 metros de distancia de estos equipamientos podrán beneficiarse de al menos una de las instalaciones (como se recoge en el Real Decreto 244/2019 sobre autoconsumo), es decir, de la energía solar producida sin necesidad de ninguna obra ni instalación ni cambios de compañía eléctrica.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster es estimar el potencial fotovoltaico de las cubiertas de los equipamientos públicos (centros deportivos, centros de salud y pabellones) gestionados por el Ayuntamiento de Zaragoza. Para ello se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Calcular el potencial fotovoltaico mediante un análisis multicriterio aplicado en un entorno SIG.
- Analizar el potencial de cada equipamiento a nivel de distrito, teniendo en cuenta el número de viviendas a las que se podría abastecer.
- Estimar el grado de autoabastecimiento energético de los hogares afectados por el área de influencia de los equipamientos municipales.
- Identificar las zonas de la ciudad que podrían beneficiarse y las que no para realizar propuestas de actuación urbana.

La temática de este trabajo se alinea con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030:

- Objetivo 1: Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo.
- Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.
- Objetivo 10: Reducir la desigualdad dentro y entre los países
- Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles
- Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.



Figura 3. Objetivos de la Agenda 2030. Fuente: Agenda 2030.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde con el núcleo urbano principal de Zaragoza. Está situada al noreste de la Península Ibérica en el valle medio del Ebro, una de las zonas con más radiación solar anual del país (Aemet, 2012) La ciudad alberga 668.053 habitantes (INE, 2021), tiene una altura que varía entre 190 y 300 metros sobre el nivel del mar y según la Clasificación Climática de Köppen tiene un clima semiárido frío (BSK).



Figura 4 . Horas mensuales de sol en Zaragoza. Fuente: Weather and climate.

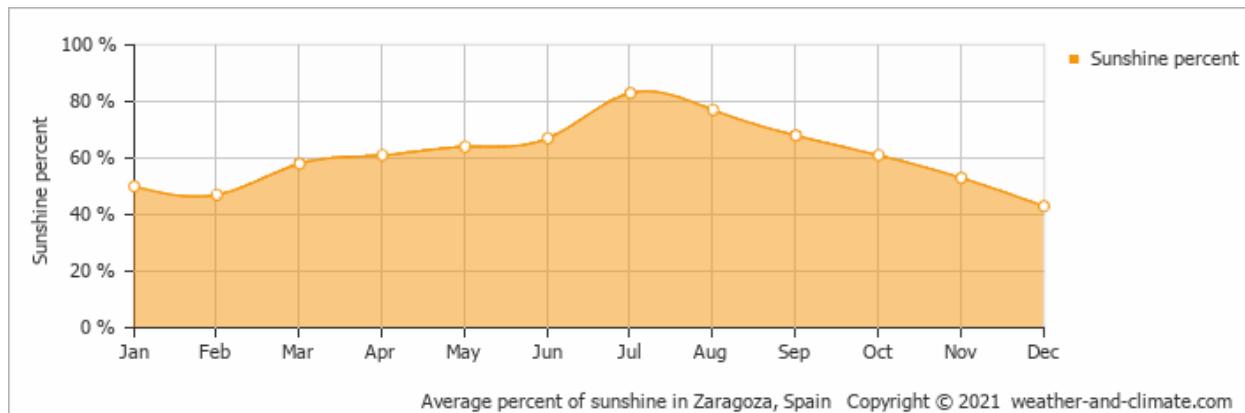


Figura 5. Porcentaje de horas de sol por mes en Zaragoza. Fuente: Weather and climate.

Como se puede observar en la Figura 4 y la Figura 5, la ciudad de Zaragoza tiene un gran número de horas de sol al mes, con la mayor parte del año más de 200h medias mensuales y convirtiéndose en una ciudad muy adecuada para este tipo de proyectos enfocados en la energía solar.

La división administrativa utilizada ha sido el distrito, ya que la gran mayoría de datos de renta proporcionados por el Ayuntamiento estaban a esta escala espacial. En el caso de Casablanca-Distrito Sur, se han unido ambos distritos en uno solo dado que la separación se hizo en 2018 y los datos de renta disponibles eran anteriores, cuando el distrito aún seguía unido. Los distritos utilizados se muestran en la Figura 6.

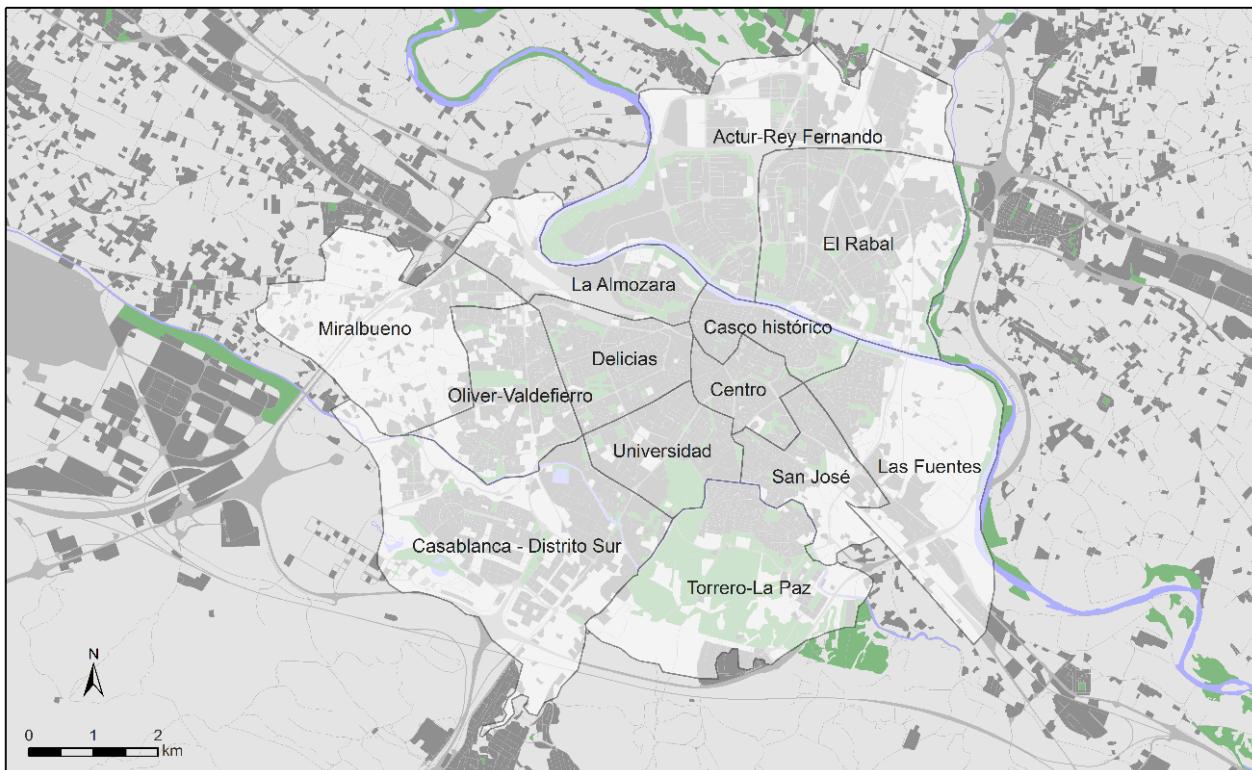


Figura 6. Distritos urbanos de Zaragoza.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

Para calcular el potencial fotovoltaico de las cubiertas se han empleado los datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) para generar un modelo digital de superficies (MDS), que es la base para obtener la pendiente, la orientación, el sombreado y la irradiancia solar de las azoteas. Por otra parte, se ha utilizado información del Catastro para delimitar las huellas de los edificios y conocer el número de viviendas y los usos que albergan.

La metodología aplicada ha requerido de diversas herramientas de análisis espacial implementadas en Arcgis Desktop (versión 10.7.1), QGIS (versión 3.10 A Coruña) y LiDAR Converter.

4.1. Datos LiDAR-PNOA

El LiDAR es una tecnología de teledetección activa que emite pulsos de luz láser y registra las reflexiones para conformar nubes de puntos tridimensionales (Suomalainen et al, 2017). En el caso del PNOA, se trata de sistemas LiDAR aerotransportados (Figura 7), los cuales han sobrevolado todo el territorio nacional.

El PNOA realiza vuelos LiDAR únicos cumpliendo con unas especificaciones técnicas pactadas entre las Administraciones Públicas participantes con el objetivo de satisfacer las necesidades de todas y evitar la duplicidad de esfuerzos y recursos. La producción posterior se realiza de manera descentralizada por cada Comunidad Autónoma y es el Instituto Geográfico Nacional (IGN) el responsable de la validación e integración de los resultados en consonancia con la Directiva Inspire (Directiva 2007/2/CE, Infraestructura para información espacial en Europa).

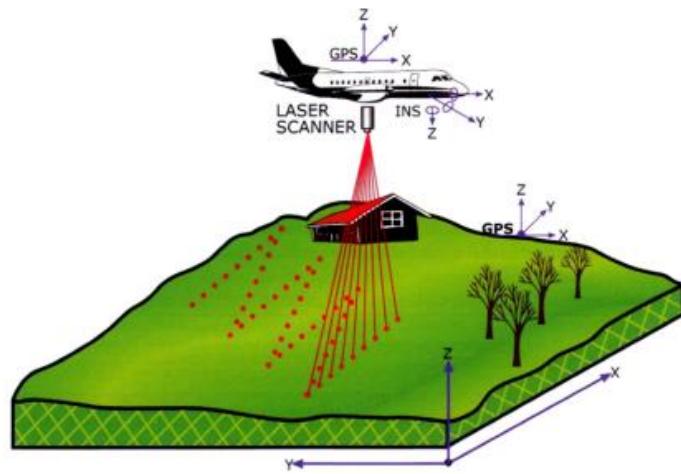
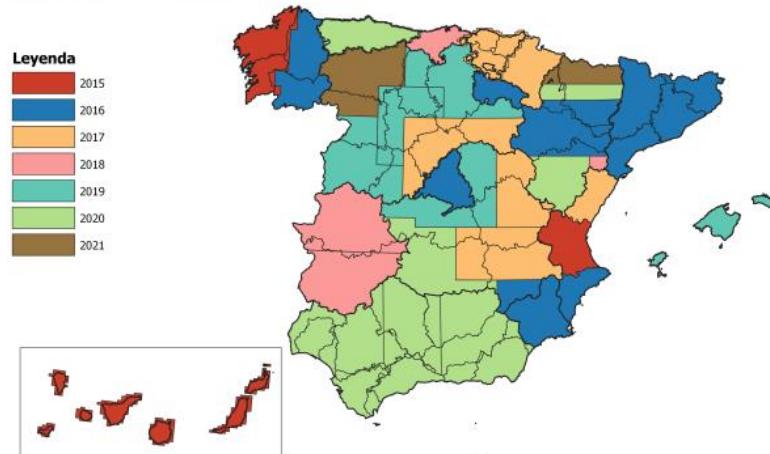


Figura 7. Componentes de un sistema LiDAR aerotransportado. Fuente: Renslow (2013).

Los ficheros LiDAR que contienen las nubes de puntos se distribuyen de manera gratuita a través del centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) en formato LAZ con una extensión de 4 km². Dichas nubes contienen coordenadas X, Y, Z y atributos como el color o la clasificación según el estándar de la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS).

AÑO INICIO VUELO



DENSIDAD DE PUNTOS

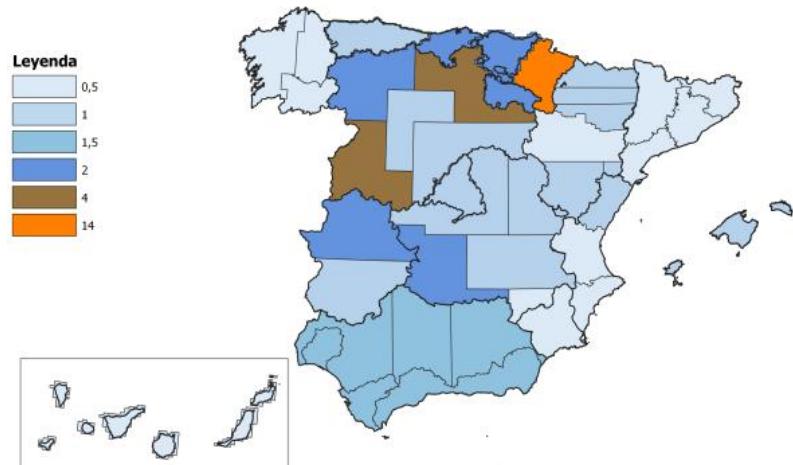


Figura 8. Características de los vuelos LiDAR-PNOA de segunda cobertura. Fuente: PNOA (2021).

Los datos LiDAR-PNOA utilizados corresponden al último vuelo realizado, concretamente al bloque de vuelo ARA_C iniciado en octubre de 2016 y finalizado en noviembre de 2016. Los ficheros tienen una densidad nominal de 0,5 puntos/m² y el sensor principal utilizado es el LEICA ALS80 (Figura 8). Las especificaciones técnicas de los datos utilizados pueden verse en la Tabla 1.

Los ficheros LAZ contienen una clasificación automática en la que a cada punto de la nube se le asigna un valor numérico correspondiente a los diferentes elementos que ha captado el pulso láser. El código y su significado se muestran en la Tabla 2. En este trabajo, y como parte del pretratamiento de los datos LiDAR, se ha eliminado la clase 7 (ruido), la 12 (solapes) y todas que hacen referencia a Reservado ASPRS mediante el software LiDAR Converter.

Número de Ficheros	38
Sensor	ALS80
Fechas de adquisición	Octubre 2016-Noviembre 2016
Densidad de puntos	0,5 puntos/m ²
Extensión de las hojas	2×2 km
Sistema de referencia	ETRS89
Proyección	UTM 30N
Tipo de altitudes	Ortométricas

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las nubes de puntos empleadas.

Valor de Clasificación	Significado
0	Nunca clasificado
1	Sin clasificar
2	Suelo
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Edificios
7	Puntos bajos (ruido)
8	Puntos clave del modelo
9	Agua
10	Reservado ASPRS
11	Reservado ASPRS
12	Solape
13-31	Reservado ASPRS

Tabla 2. Valores y significado de clasificación automática.

4.2.Ortofotografías aéreas PNOA

Las ortofotografías del PNOA disponibles más actuales fueron capturadas entre julio y septiembre del año 2018. Su sistema de referencia geodésico es ETRS89 y tiene una proyección UTM en el Huso 30N. Han sido empleadas por su alta resolución espacial (25 cm de píxel) para la identificación manual de ciertos centros de salud y deportivos.

4.3.Datos catastrales e inventario de equipamientos públicos

La Dirección General del Catastro ofrece un servicio de consulta y descarga de información catastral en formato ‘shapefile’. Como se puede observar en la Figura 9 a modo de ejemplo, la tabla de atributos de la capa vectorial contiene información de diverso tipo, como coordenadas, referencia catastral, número de plantas sobre y bajo rasante, tipo de construcción, etc.

Esta capa que recoge las construcciones urbanas de Zaragoza se ha utilizado para la delimitación de las zonas útiles (huellas) de los diferentes equipamientos públicos (de salud y deportivos) y permite filtrar por el tipo de construcción, por ejemplo, descartando porches, patios, etc.

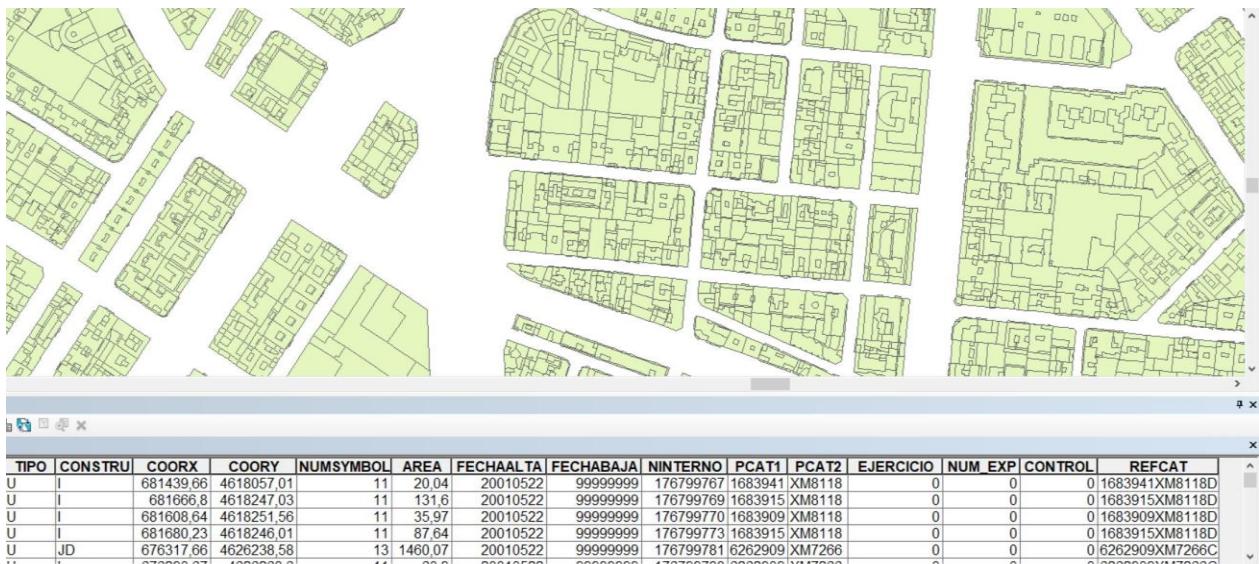


Figura 9. Cartografía catastral de la Dirección General del Catastro y sus atributos.

Sin embargo, para conocer el uso de las edificaciones y el número de viviendas se ha empleado la cartografía catastral INSPIRE. En este caso, se han seleccionado todos los edificios con uso de carácter residencial.

Respecto del inventario de los equipamientos públicos, se han descargado de la página web del Ayuntamiento de Zaragoza dos capas de puntos que hacen referencia a la localización de los centros de salud, pabellones y centros deportivos. Primeramente, se han convertido de formato ‘GeoJson’ a ‘shapefile’. Seguidamente, observando ciertos errores de localización de los equipamientos, se han digitalizado manualmente algunos de ellos buscando su ubicación por la dirección y redefiniendo la huella del edificio con las ortofotografías de máxima actualidad y la capa de construcciones de Catastro. Finalmente, las geometrías de las huellas de los equipamientos seleccionados se han agregado por referencia catastral y se les ha aplicado un ‘buffer’ hacia adentro de 1 metro, ya que las placas fotovoltaicas no se suelen colocar en el borde de las cubiertas. Todos los centros de salud y centros y pabellones deportivos se muestran en la Figura 10 y la Figura 11.

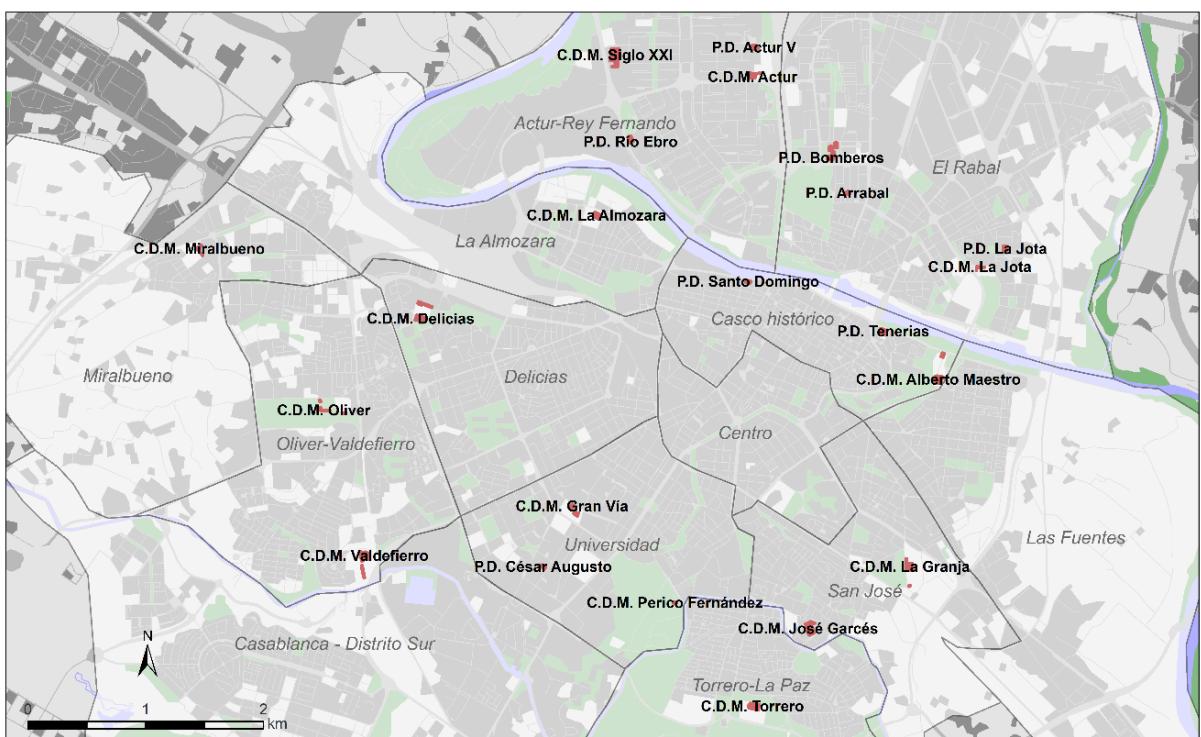


Figura 10. Localización de los centros deportivos municipales (C.D.M.) y de los pabellones deportivos (P.D.).

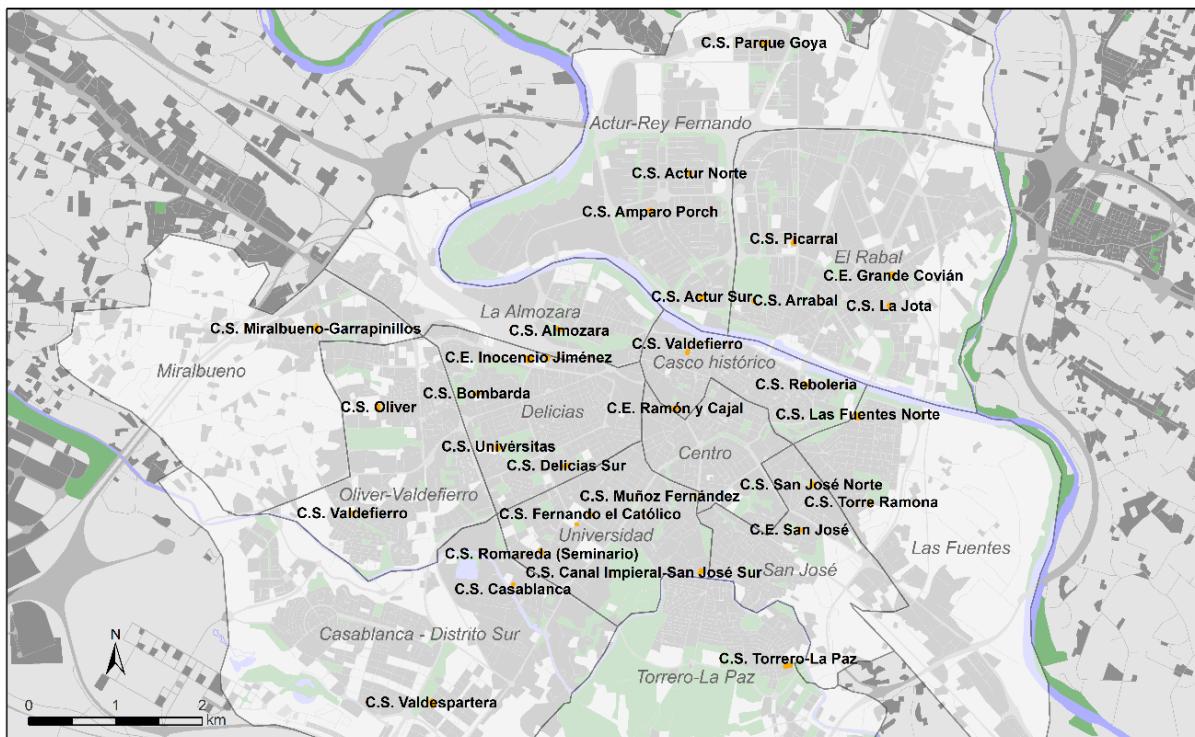


Figura 11. Localización de los centros de salud (C.S.) y de los centros de especialidades (C.E.).

4.4. Caracterización de las cubiertas de los equipamientos públicos

4.4.1. Obtención del Modelo Digital de Superficies (MDS)

En un primer lugar, y tras haber descomprimido todos los ficheros LAZ a formato LAS y eliminar las clases 7 y 10 a 31, en ArcCatalog se ha creado un ‘LAS Dataset’ para agrupar los 38 ficheros LAS. A continuación, se ha aplicado la herramienta ‘LAS Dataset to raster’ para generar el MDS de la zona de estudio con los primeros retornos láser. Este proceso puede verse resumido en la Figura 12.

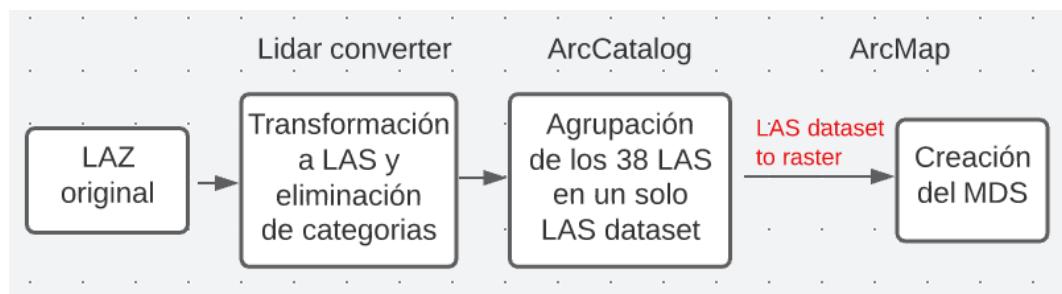


Figura 12. Proceso de creación del MDS.

Este MDS tiene una resolución espacial de 1 m (Martín Ávila et al, 2016) y representa la parte superior de la superficie terrestre, incluidos edificios, árboles y otros objetos que se asienten en el terreno (Renslow, 2013). Una vez obtenido el MDS (Figura 13) ya se pueden generar los siguientes productos derivados: la pendiente o inclinación, la orientación, las sombras y la irradiancia solar.

4.4.2 Inclinación de las cubiertas

Mediante la herramienta ‘Slope’ de ArcMap aplicada sobre el MDS se obtiene una nueva capa ráster de pendientes expresada en grados. El resultado se muestra en la Figura 13. Esta capa es de gran utilidad e interés porque la inclinación de la cubierta determinará cómo deberán colocarse los paneles solares.

4.4.3. Orientación de las cubiertas

Mediante la herramienta ‘Aspect’ de ArcMap, aplicada nuevamente sobre el MDS, se obtiene una capa que representa la orientación de las cubiertas (Figura 13). Al igual que la inclinación, esta capa se utilizará en el análisis multicriterio posterior para determinar la cantidad máxima de energía producida.

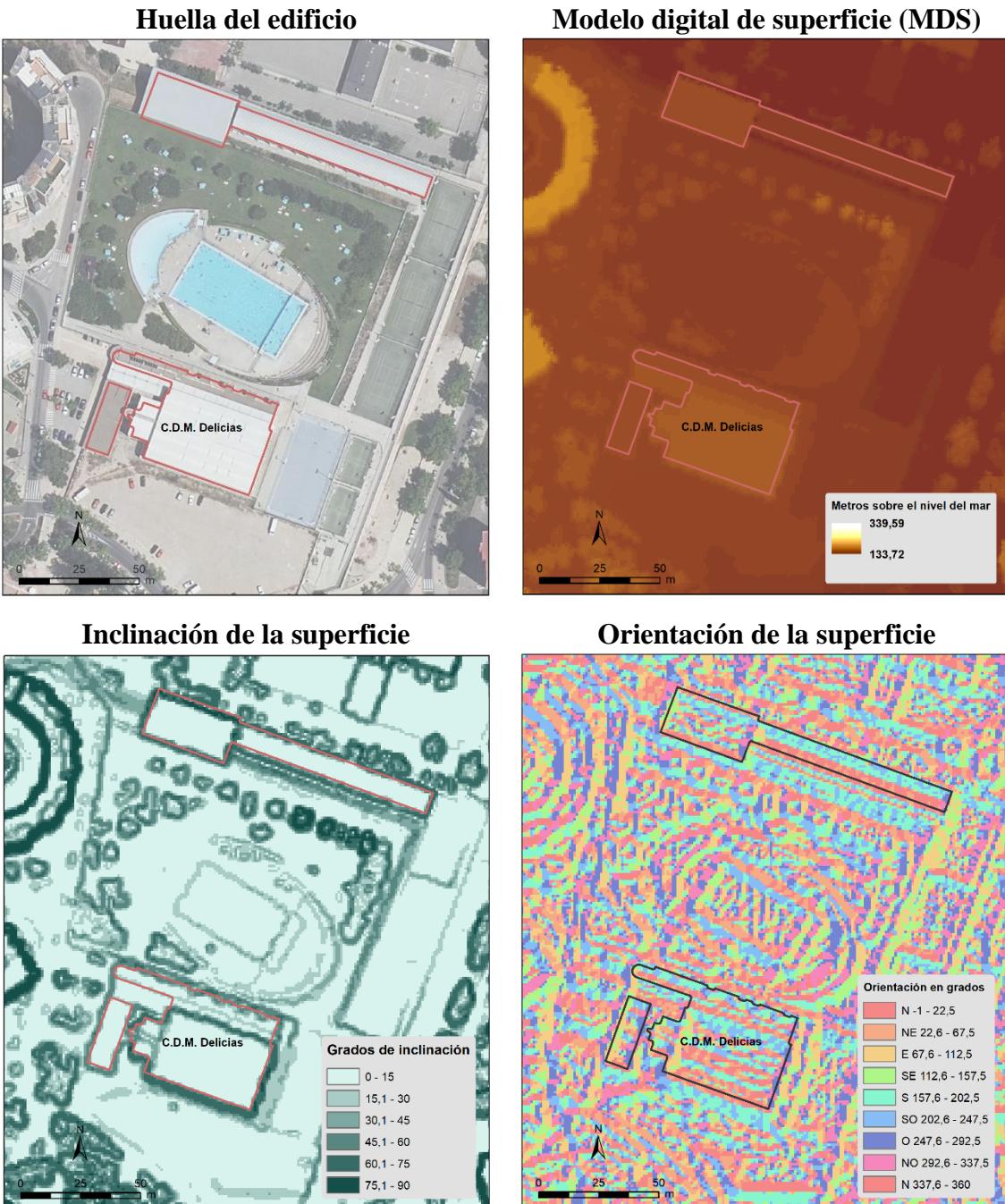


Figura 13. Ejemplo de huella de edificio, de MDS y de las capas ráster de inclinación y orientación generadas para la zona del C.D.M. Delicias.

4.4.4. Análisis de sombras

El análisis de sombras es uno de los pasos más importantes en la fase de diseño de un sistema de producción de energía fotovoltaica porque hay que tener en cuenta las sombras generadas por el ambiente circundante, como árboles u otros edificios. Para realizar el análisis de sombras se han utilizado los datos de Solar Geometry 2 (SG2), que proporciona información acerca de la declinación solar, ángulo horario, elevación solar y azimut solar.

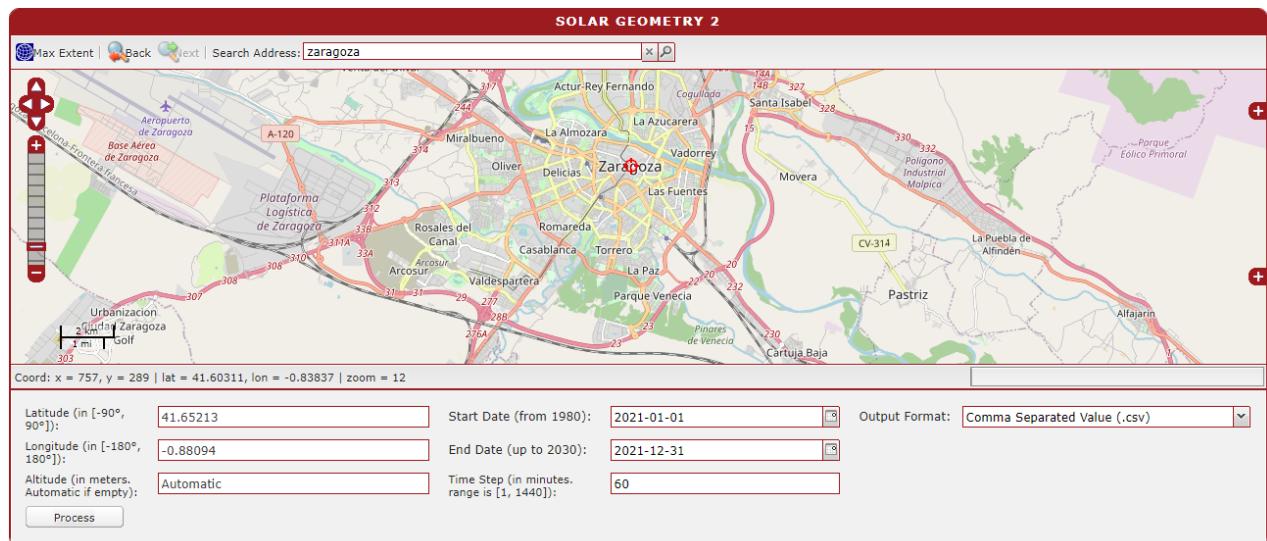


Figura 14. Interfaz de Solar Geometry 2 y configuración para la descarga de los datos.

La descarga de datos, como se muestra en la Figura 14, se hace en un fichero .csv y proporciona los datos por hora de cada día del año. En este trabajo se han seleccionado las horas entre las 10 AM y 2 PM, ya que son las horas centrales del día de mayor insolación, de los días 21 de cada mes (Montealegre et al., 2022). Los datos de elevación y azimut solar, que están expresados en radianes, se han convertidos en grados, tal como muestra en la Figura 15.

MES	DÍA	HORA	DÍA DEL AÑO	ELEVACION_GRADOS	AZIMUTH_GRADOS
1	21	10	21	21,0703353	145,9654632
1	21	11	21	26,14995001	160,3408545
1	21	12	21	28,46207257	176,0143905
1	21	13	21	27,6867501	191,991046
1	21	14	21	23,93611877	207,11223
2	21	10	52	29,15746832	140,632716
2	21	11	52	35,01930779	156,6435478
2	21	12	52	37,82209957	174,6768505
2	21	13	52	37,05729559	193,2662884
2	21	14	52	32,87353926	210,5647991
3	21	10	80	39,31855997	135,7619194
3	21	11	80	45,78907115	154,2087208
3	21	12	80	48,71024443	175,9696284
3	21	13	80	47,31555111	198,3819781
3	21	14	80	41,99384119	218,1783669
4	21	10	111	50,13714543	129,1260552
4	21	11	111	57,39700408	150,8794331
4	21	12	111	60,37327657	178,9159854
4	21	13	111	57,8101591	207,2740338
4	21	14	111	50,8119581	229,562649
5	21	10	141	56,82931726	120,8902038
5	21	11	141	65,12428252	144,6584768
5	21	12	141	68,63318367	179,9105909
5	21	13	141	65,169049	215,2221217
5	21	14	141	56,89817237	239,0644179
6	21	10	172	58,19673681	115,1090181
6	21	11	172	67,24846634	138,1248169
6	21	12	172	71,74959665	176,062006
6	21	13	172	68,51401562	216,2537724
6	21	14	172	59,98893822	241,5951784
7	21	10	202	55,31059989	117,7753443
7	21	11	202	64,08558949	139,8526795
7	21	12	202	68,61089659	173,5812763

Figura 15. Ejemplo de los datos de elevación y azimut solar de las horas centrales del día para calcular las sombras.

Con los datos recopilados acerca del azimut y la elevación en grados se ha construido una tabla en Excel para poder aplicar un ‘batch’ con la herramienta ‘Hillshade’ de ArcMap y hacerlo de forma más automática y rápida.

El resultado es una capa ráster para cada día 21 del mes y cada hora comprendida entre las 10 AM y las 2 PM, ya que son los días que hemos seleccionado con anterioridad. Las 60 capas obtenidas presentan valores entre 0 y 254, donde 0 indica sombra total y el resto de valores no. A continuación se han reclasificado estas capas mediante la herramienta ‘reclassify’ de ArcGIS dejando los valores 0 en 0 y los valores comprendidos entre 1 y 254 en 1. Después, las 60 capas reclasificadas se han multiplicado, dando como resultado final una única capa que expresa qué píxeles tienen sombra y cuáles no a lo largo del año y no solo de ese momento. El proceso está esquematizado en la Figura 16.

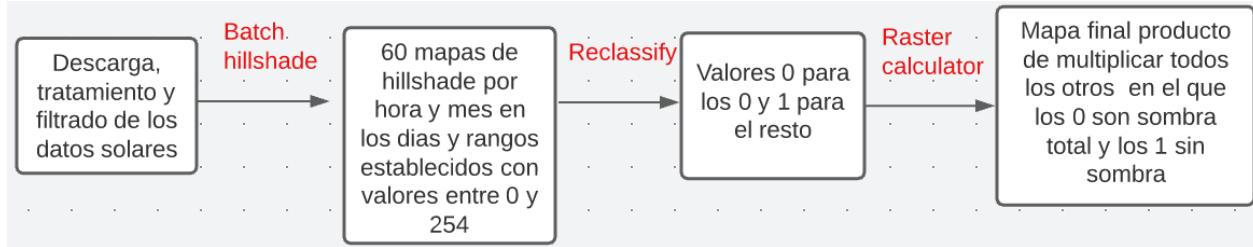


Figura 16. Proceso de elaboración del mapa de sombras o hillshade.

El resultado final del proceso se muestra en la Figura 17. Los píxeles de sombra total no serían válidos para colocar paneles fotovoltaicos.

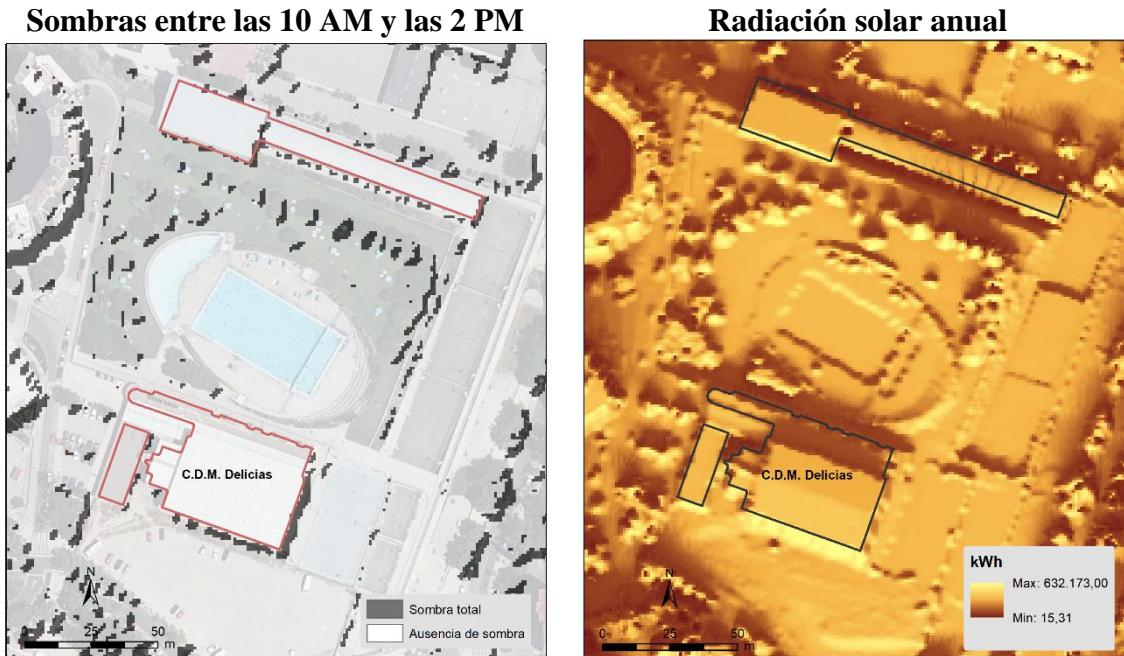


Figura 17. Mapa de sombras entre las 10 AM y las 2 PM y mapa de radiación solar de la zona del C.D.M. Delicias.

4.4.5. Cálculo de la irradiancia solar

Con la herramienta ‘Area solar radiation’ de ArcMap se ha calculado la irradiación solar. Ha sido necesario el MDS generado anteriormente. Las capas resultantes de este proceso se expresan en Wh (Watios hora) y ha habido que convertirlas a kWh (kilo Watios hora) mediante la ‘raster calculator’ de ArcGIS, dividiendo los Wh obtenidos entre mil. El resultado de este proceso es una capa ráster de irradiancia solar anual en kWh (Figura 17).

4.5. Análisis multi-criterio para determinar la producción de energía fotovoltaica

Las capas ráster obtenidas con anterioridad se han utilizado para calcular la cantidad de energía eléctrica que pueden producir las cubiertas de los equipamientos públicos seleccionados. Hay que tener en cuenta que toda superficie de tejado no es útil, debido a la presencia de sombras, la

orientación, a las características de los paneles, etc. Por todo ello se ha llevado a cabo un análisis multi-criterio con ayuda de herramientas SIG.

La energía anual (E_e en kWh) producida en los tejados se calcula usando la siguiente ecuación (Wigington et al., 2010):

$$E_e = I_G \times N_{pv} \times A_{pv} \times PR \quad (\text{Eq.1})$$

Dónde:

I_G es la radiación anual en kWh/m².

N_{pv} es el coeficiente de eficiencia del panel fotovoltaico.

A_{pv} es el área del panel en m².

PR es el coeficiente de pérdidas del sistema fotovoltaico.

4.5.1. Cálculo de la radiación solar anual en kWh/m².

En Zaragoza, por su latitud, la inclinación ideal de los paneles para maximizar su eficiencia es de 37° (Montealegre et al., 2022). La radiación global recibida por los paneles depende de su ángulo de inclinación y por ello, para tejados inclinados (>37°), las placas se colocarán siguiendo la pendiente de la azotea, mientras que para los tejados planos (<37°) se montarán en el ángulo óptimo para la producción (37°).



Figura 18. Colocación de placas solares según la inclinación del tejado. Fuente: Renusol.

La irradiancia global obtenida en el SIG no es la recibida por el panel, ya que hay que asumir que en tejados planos los paneles pueden inclinarse. Por ello, es necesario estimar un coeficiente multiplicador. Según Montealegre et al. (2022), a los paneles de los tejados planos que se colocan a 37° se les dan un coeficiente de 1,18, mientras que a los tejados inclinados de 1. Mediante la herramienta ‘reclassify’ de ArcGIS, la de pendientes se ha reclasificado, asignando el valor de 1,18 a las pendientes menores de 37 ° y 1 a las mayores. Finalmente, esta capa se ha multiplicado por la capa de radiación solar anual generada previamente para obtener así la capa que representa la I_G .

4.5.2. Cálculo del coeficiente de eficiencia del panel (Npv)

En lugar de utilizar un coeficiente estándar, se ha utilizado el mismo que se tienen los paneles del proyecto Actur Barrio Solar. Como se puede observar en la Figura 19, el panel tiene una eficiencia energética del 20,4% es decir, el valor N_{pv} será de 0,204.

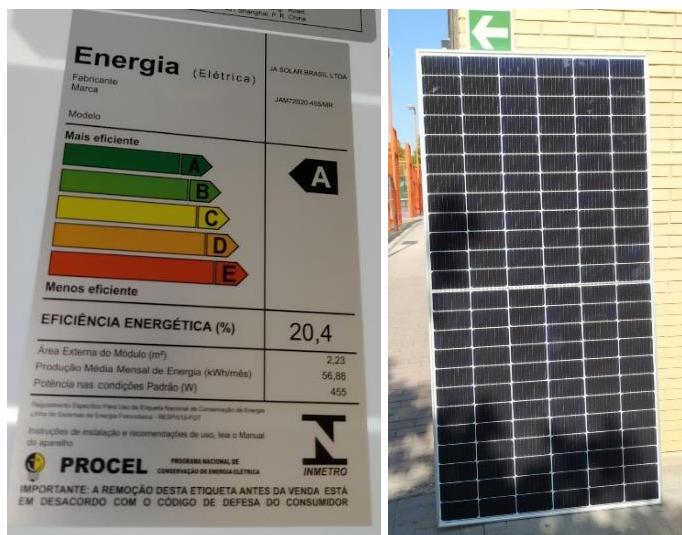


Figura 19. Características del panel fotovoltaico colocado en la iniciativa Actur Barrio Solar. Fuente: fotografías cedidas por Actur Barrio Solar.

4.5.3. Cálculo del área del panel (Apv)

Para el cálculo del área total de panel fotovoltaico a colocar, hay que considerar varias cuestiones. En primer lugar, hay que tener en cuenta las **pérdidas de energía por inclinación y orientación**, calculadas según el Código Técnico de la Edificación de España (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, 2009).

$$\text{Si } 15^\circ < \beta < 90^\circ \rightarrow \text{Pérdidas (\%)} = 100 \times [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \phi + 10)^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \alpha^2] \quad (\text{Eq.2})$$

$$\text{Si } \beta \leq 15^\circ \rightarrow \text{Pérdidas (\%)} = 100 \times [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \phi + 10)^2] \quad (\text{Eq.3})$$

Dónde:

α es el azimut opuesto de la cubierta en grados. Se ha calculado con la ‘raster calculator’ restando el valor de 180° a la capa de orientaciones generada con anterioridad.

β es la pendiente de la cubierta en grados.

ϕ es la latitud de Zaragoza ($41,49^\circ$).

Las ecuaciones 2 y 3 se han implementado en la ‘raster calculator’, como se muestra en la Figura 20.

El resultado es una capa ráster que expresa las pérdidas en función de la pendiente y de la orientación de los píxeles. Se considera que una superficie es apta para la instalación de un sistema fotovoltaico si las pérdidas de energía son inferiores al 20% (Martín Ávila et al., 2016). Por ello, se ha aplicado un ‘reclassify’ a esta nueva capa generada en la que los píxeles con pérdidas superiores al 20% serán no válidos (valor 0) y el resto serán adecuados (valor 1). El resultado es un ráster binario que muestra qué zonas son aptas y cuáles no para colocar los paneles.

En segundo lugar, hay que calcular la superficie horizontal disponible para colocar paneles. Como se dispone de una capa ráster que indica las zonas válidas para colocar paneles en función de las pérdidas por inclinación y orientación, y otro que indica las zonas afectadas por sombras, se han multiplicado con la ‘raster calculator’ para obtener un nuevo ráster cuyos píxeles indican las áreas

donde se pueden colocar los paneles fotovoltaicos. Es decir, la capa resultante representa las zonas de las cubiertas adecuadas para colocar los paneles con pérdidas inferiores al 20% y sin sombras entre las 10 AM y las 2 PM.

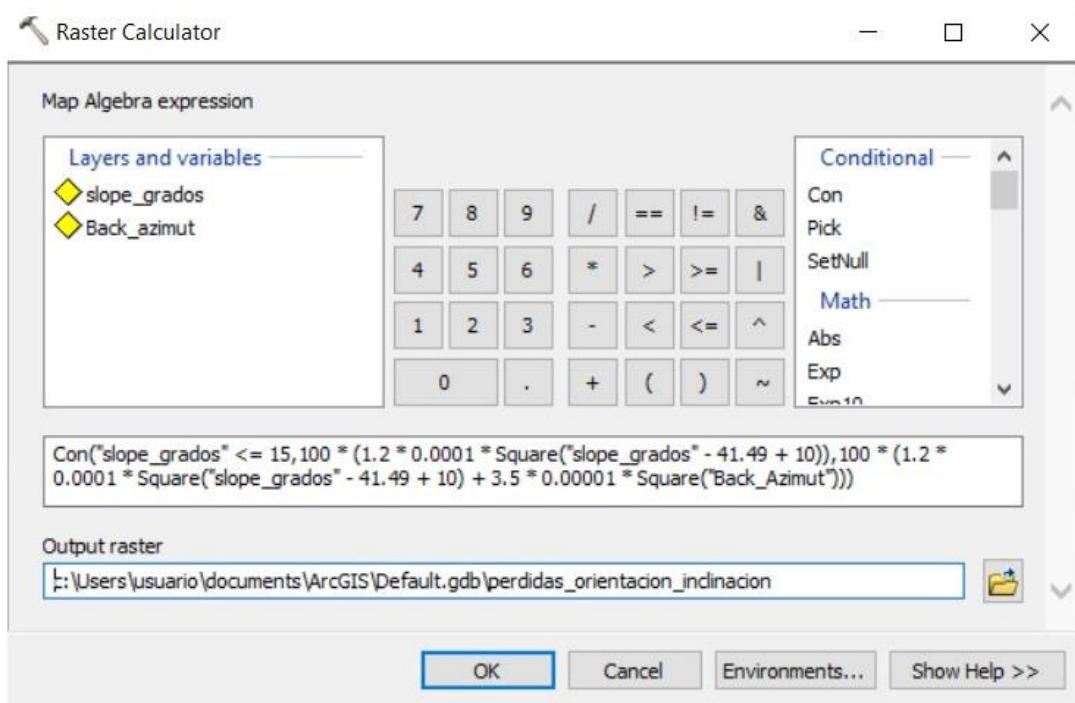


Figura 20. ‘Raster calculator’ con las fórmulas de pérdidas por inclinación y orientación.

En tercer y último lugar, hay que calcular la superficie real disponible para colocar paneles. En el paso anterior se han obtenido las zonas donde es adecuado colocar paneles, pero es necesario conocer la superficie real para colocarlos, ya que hay tejados inclinados que suponen una mayor superficie de panel. Para ello, se ha generado una capa de pendientes a partir del MDS expresada en porcentaje. Seguidamente, se ha aplicado la siguiente ecuación en la ‘raster calculator’, que permite calcular la superficie real de cada celda en función de su inclinación.

$$\text{SquareRoot}(\text{Power}((“slope_per” / 100), 2) + 1) \quad (\text{Eq.4})$$

Sin embargo, hay que aplicar unos coeficientes de reducción de la superficie de panel en función de la inclinación de la cubierta. Para cubiertas inclinadas ($>15^\circ$) hay que asignar espacio para mantenimiento y acceso, por lo que se aplica un coeficiente de 0,95 (Montealegre et al., 2022). Para tejados planos ($<15^\circ$) se ha aplicado el coeficiente de 0,43, que contempla el espacio para los trabajos de mantenimiento y las sombras entre paneles, al ir montados en el ángulo de inclinación óptimo ($\beta = 37^\circ$) (Montealegre et al., 2022).

Para llevar a cabo este proceso, en primer lugar, se ha reclasificado de nuevo la capa de pendientes expresada en grados, asignando el valor 1 para celdas planas ($<15^\circ$) y 0 para celdas inclinadas ($>15^\circ$). A continuación, se ha multiplicado esta capa reclasificada por la capa de superficie real disponible para ubicar paneles. El resultado es una nueva capa que muestra los píxeles que se corresponden con tejados planos y los que no. Por lo tanto, los píxeles cuyos valores estén comprendidos entre 0 y 1 m^2 hacen referencia a cubiertas planas, por lo que hay que aplicar un coeficiente de reducción de superficie de 0,43, mientras que el resto de píxeles se consideran inclinados y el coeficiente de reducción es de 0,95. Esta operación se realizó con la ‘raster calculator’, obteniéndose la capa ráster APV, que representa la superficie de panel fotovoltaico en m^2 a colocar en cada celda. El ejemplo del C.D.M Delicias puede verse en la Figura 21.

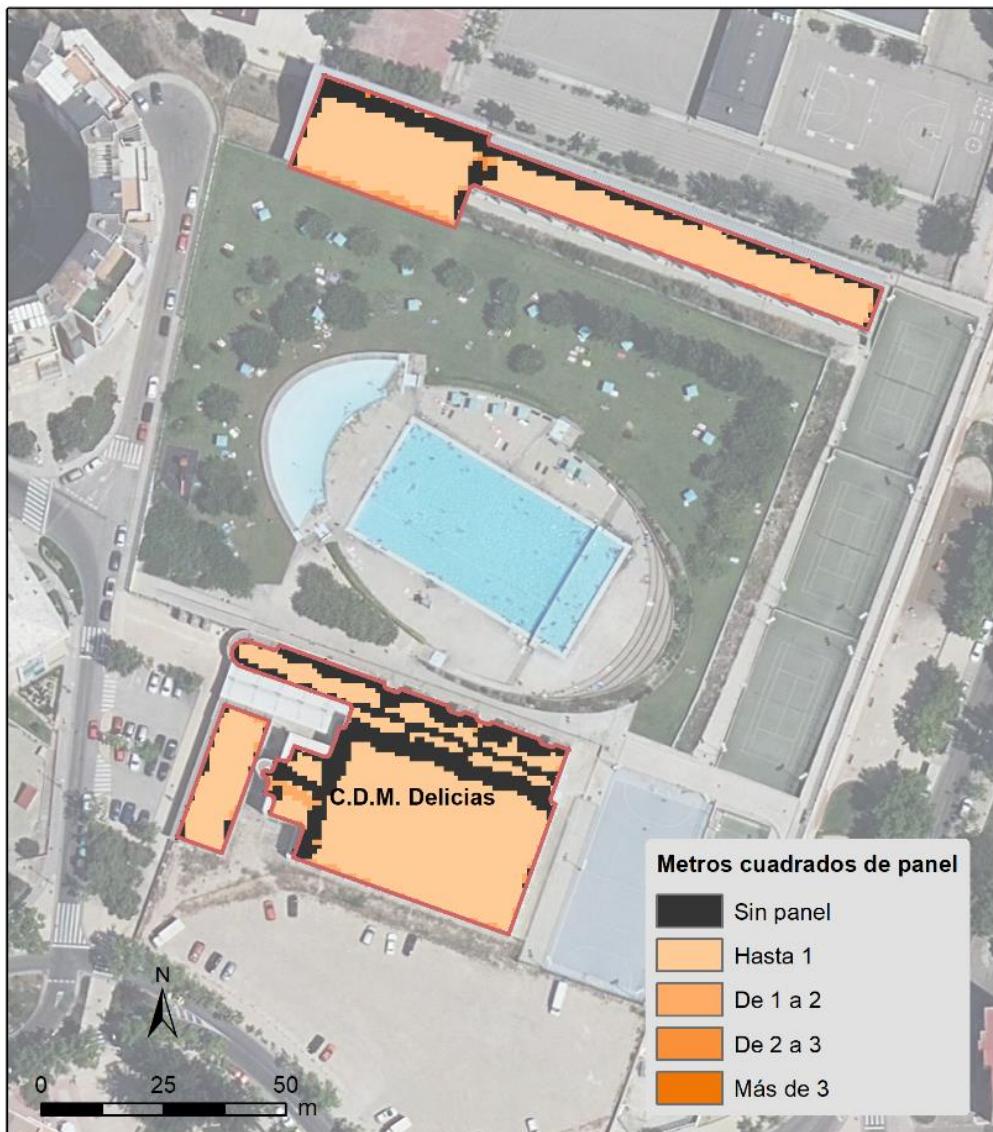


Figura 21. Superficie de panel fotovoltaico por píxel del C.D.M. Delicias.

4.5.4. Cálculo del coeficiente de pérdidas del sistema (PR)

Este apartado hace referencia a la pérdida de energía de los paneles asociada a la suciedad, el cableado, transformadores, etc. es decir, a las pérdidas propias del sistema.

Las pérdidas asociadas al sistema dependen de su montaje. Para ello hay que volver a considerar la colocación óptima de los paneles a 37° cuando la cubierta es plana. Por ello, los paneles colocados en tejados con una inclinación inferior a 37° tienen unas pérdidas del 21%, mientras que los situados en tejados con inclinaciones superiores a 37° tienen unas pérdidas del 24% (Montealegre et al, 2022). Para aplicarlas, se ha realizado una reclasificación de la capa de pendientes, de manera que las celdas con una inclinación inferior o igual a 37° se les aplicará un valor de 0,79 (100%-21% de pérdidas del sistema) y a las que cuentan con valores superiores a 37° se les aplicará un valor de 0,76 (100%-24%). Como resultado se obtiene la capa PR.

4.5.5. Cálculo de la energía total anual (Ee)

Una vez que ya se dispone de todas las capas ráster necesarias para aplicar la ecuación 1, se ha implementado en la ‘raster calculator’, obteniéndose la energía total (Ee) que puede producirse en las cubiertas de los equipamientos seleccionados. En la Figura 22 se muestra el proceso metodológico del análisis multi-criterio llevado a cabo para el cálculo del potencial fotovoltaico.

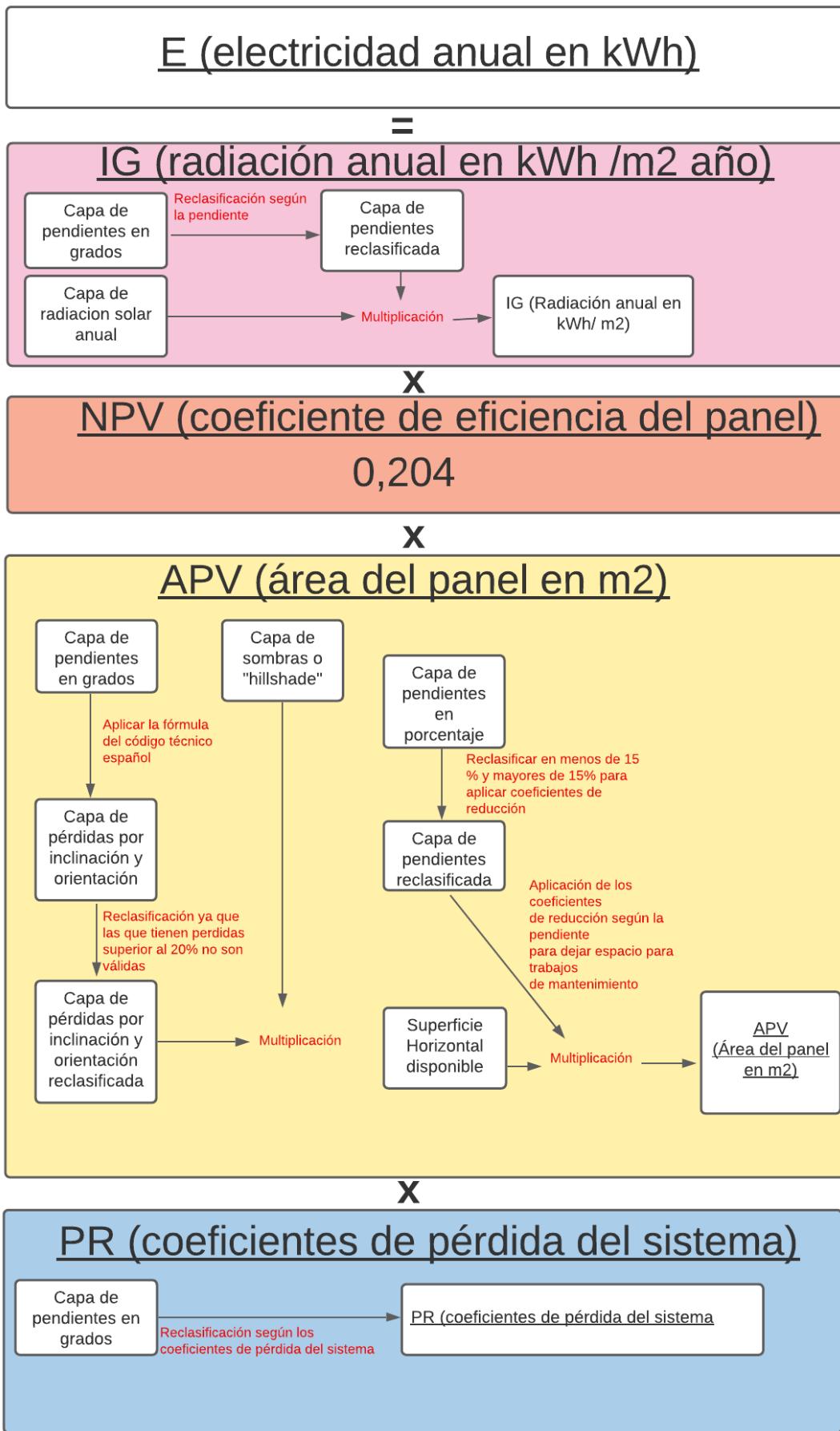


Figura 22. Esquema del proceso metodológico para obtener la energía (E_e).

4.6. Estimación del potencial de producción de energía de los equipamientos y del área de abastecimiento

Se ha extraído, para cada uno de los centros de salud, deportivos y pabellones, la cantidad total de energía producida (E_e) y el total de área de panel en m^2 (A_{pv}) mediante la función ‘Zonal statistics’ de ArcGIS. Asimismo, se ha calculado el número de paneles fotovoltaicos que se podrían llegar a colocar teniendo como referencia las dimensiones del panel de Actur Barrio Solar ($2,23 m^2$). Cabe destacar, que, debido a la ausencia de información, se ha asumido que los materiales de las diferentes cubiertas podrían aguantar el peso de todas las placas solares.

Como se comentó con anterioridad, según el Real Decreto Real Decreto 244/2019 sobre autoconsumo, solo podrían beneficiarse de este proyecto las viviendas que se encuentren a 500 m o menos de los centros productores (en este caso, los equipamientos seleccionados), por lo que para cuantificar el número de edificios y viviendas favorecidas se ha realizado un ‘buffer’ exterior de 500 m a cada equipamiento y, posteriormente, mediante diferentes selecciones por localización combinando las capas ofrecidas por el catastro y las de los buffers se han calculado de manera absoluta y relativa las viviendas favorecidas para cada distrito de la ciudad.

4.7. Datos demográficos y económicos

Con la finalidad de relacionar el potencial fotovoltaico de los equipamientos con las características demográficas y socioeconómicas de cada barrio de la ciudad, se han empleado los datos de población del padrón municipal de 2021 y de la renta por hogar, y por persona de los diferentes distritos según el documento “Zaragoza en datos, Informe global sobre la ciudad y sus distritos” (Ebropolis-GEOT con datos Urban Audit-INE, 2018). De esta forma, se verá dónde interesaría llevar a cabo esta iniciativa de abastecimiento de energía fotovoltaica, priorizando en los hogares vulnerables, en situación de pobreza energética y con riesgo de exclusión.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Estimación del potencial fotovoltaico de los equipamientos deportivos y de salud

El potencial fotovoltaico de los equipamientos hace referencia a la cantidad de kWh que podrían producir en un año si toda la cubierta que cumple los requisitos para colocación de paneles fotovoltaicos estuviese en funcionamiento. Como se puede apreciar en las Tablas 3 y 4, el potencial fotovoltaico no es el mismo para todos los centros de salud, y centros deportivos y pabellones. La principal razón es el tamaño del área disponible para colocar los paneles, así como la morfología del tejado en la que se incluye su inclinación y la orientación.

Los resultados muestran que el C.D.M. Siglo XXI, situado en el distrito Actur-Rey Fernando, es el que más potencial tiene, con un total de 230.476,57 kWh, habiendo sido elegido para el desarrollo de la iniciativa Actur Barrio Solar. Sin embargo, es uno de los que menos número de viviendas reúne en el entorno de 500 m (3481 viviendas). Esto se debe a que está localizado en las inmediaciones del recinto de la Expo 2008 y del río Ebro. Los siguientes centros con mayor potencial fotovoltaico son: el C.D.M Municipal José Garcés, situado en la zona sur del distrito de San José (156.770,69 kWh) y el C.D.M. Alberto Maestro, localizado entre la zona noroeste del distrito Las fuentes y la zona este del distrito Casco Histórico (118.937,65 kWh), siendo éste además el que mayor cantidad de hogares podría abastecer (14.176 viviendas).

Centro/Pabellón deportivo municipal	Potencial fotovoltaico (kWh)	Superficie total de paneles (m ²)	Nº total de paneles	Nº de viviendas abastecidas (radio de 500 m)
C.D.M. Actur	26.940,92	477,24	214	8.574
C.D.M. Alberto Maestro	118.937,65	1.754,04	787	14.176
C.D.M. Delicias	89.366,81	1.440,71	646	7.259
C.D.M. Gran Vía	39.475,54	618,00	277	6.043
C.D.M. José Garcés	156.770,69	2.301,33	1032	13.060
C.D.M. La Almozara	58.860,50	882,10	396	8.641
C.D.M. La Granja	72.246,50	1.150,42	516	7.397
C.D.M. La Jota	20.064,41	304,35	136	9.046
C.D.M. Miralbueno	17.387,19	276,65	124	1.882
C.D.M. Oliver	28.597,87	442,32	198	4.938
C.D.M. Perico Fernández	8.502,58	130,45	59	5.561
C.D.M. Siglo XXI	230.476,57	3.299,50	1480	3.481
C.D.M. Torrero	79.658,33	1.171,84	525	6.548
C.D.M. Valdefierro	107.070,62	1.677,83	752	1.845
P.D. Bomberos	104.232,51	1.605,45	720	5.887
P.D.M. Actur V	34.042,50	554,18	249	7.703
P.D.M. Arrabal	17.240,69	270,36	121	7.955
P.D.M. Cesar Augusto	17.391,41	302,51	136	6.942
P.D.M. La Jota	39.584,29	652,28	293	7.133
P.D.M. Río Ebro	57.711,40	855,25	384	3.877
P.D.M. Santo Domingo	7.468,11	346,53	155	9.066
P.D.M. Tenerías	4.4142,39	763,70	342	10.085

Tabla 3. Potencial fotovoltaico, superficie total de panel, número de paneles y viviendas abastecidas por los C.D.M y P.D.M.

En cuanto al menor potencial fotovoltaico, destaca el P.D.M. Tenerías, situado en la zona noreste del distrito Casco Histórico (4.4142,39 kWh), seguido por el P.D.M. Santo Domingo, situado también en el distrito Casco Histórico y con un potencial fotovoltaico de 7.468,11 kWh. A pesar de ser de los que menos potencial tienen son de los que más viviendas podrían abastecer, ya que están localizados en zonas muy densamente pobladas. El P.D.M. Tenerías favorecería a 10.085 viviendas y el P.D.M. Santo Domingo a 9.066 viviendas.

En el caso de los centros de salud, a nivel general el potencial fotovoltaico es algo menor que en los centros y pabellones deportivos, debido a que sus instalaciones suelen ser bastante más pequeñas que los centros y pabellones deportivos.

En cuanto a potencial fotovoltaico, destaca el C.S. Valdespartera, en el distrito Casablanca-Distrito Sur con un potencial fotovoltaico de 68.033,42 kWh pero solo afecta a 6.470 viviendas, ya que es una zona de nueva creación no muy densamente poblada y con una morfología urbana abierta. En segundo lugar está el C.E. Inocencio Jiménez, situado en la zona norte del distrito Delicias y con un potencial fotovoltaico de 50.253,99 kWh, favoreciendo a un total de 8.328 viviendas. A pesar de que está localizado en el distrito más densamente poblado de la ciudad, no afecta a un gran número de viviendas porque en el entorno de los 500 m se encuentra con el Parque del Castillo Palomar, la Estación Delicias y la zona de la Expo Zaragoza 2008. En tercer lugar está el C.S. Universitas, situado en el distrito Universidad (48.749,53 kWh), afectando a un total de 14.534 viviendas.

En cuanto al número total de viviendas que se podrían abastecer, destaca el C.S. San José Norte, localizado en la zona norte del distrito San José, que no solo afecta a ese distrito, sino que también favorece al distrito Las fuentes. En total afecta a 19.767 viviendas.

Centro de Especialidades/Salud municipal	Potencial fotovoltaico (kWh)	Superficie total de paneles (m²)	Nº total de paneles	Nº de viviendas abastecidas (radio de 500 m)
C.E. Grande Covián	30.626,18	412,77	185	5.226
C.E. Inocencio Jiménez	50.253,99	748,13	335	8.328
C.E. Ramón y Cajal	14.715,98	305,48	137	12.175
C.E. San José	18.050,38	273,39	123	14.822
C.S. Actur Norte	11.109,70	275,48	124	8.348
C.S. Actur Sur	19.742,79	357,90	160	3.720
C.S. Almozara	23.333,07	370,81	166	8.039
C.S. Amparo Poch (Actur Oeste)	13.910,61	265,38	119	8.463
C.S. Arrabal	10.776,46	158,81	71	6.752
C.S. Bombarda	39.603,63	554,88	249	13.010
C.S. Canal Imperial-San José Sur	23.879,47	348,57	156	12.081
C.S. Casablanca	9533,11	144,34	65	4.000
C.S. Delicias Norte	16.165,92	248,94	112	10.153
C.S. Delicias Sur	34.171,40	433,47	194	9.615
C.S. Fernando el Católico	12.646,35	203,78	91	5.294
C.S. José R. Muñoz Fernández	2.202,18	38,13	17	16.320
C.S. La Jota	11.786,05	225,78	101	7.569
C.S. Las Fuentes Norte	42.590,97	625,52	281	12.477
C.S. Mental Romareda	2.420,36	56,23	25	5.322
C.S. Miralbueno- Garrapinillos	39.749,56	555,63	249	2.704
C.S. Oliver	14.844,69	208,31	93	4.045
C.S. Parque Goya	36.463,57	483,70	217	2.488
C.S. Picarral	24.844,32	372,24	167	5.121
C.S. Rebolería	11.327,75	160,57	72	10.422
C.S. Romareda (Seminario)	18.799,86	243,11	109	7.677
C.S. San José Norte	28.195,56	419,33	188	19.767
C.S. San Pablo	10.908,36	164,72	74	10.986
C.S. Torre Ramona	24.040,42	340,72	153	7.877
C.S. Torrero-La Paz	16.426,35	518,19	232	4.684
C.S. Univérsitas	48.749,53	691,41	310	14.534
C.S. Valdefierro	14.361,02	174,81	78	3.576
C.S. Valdespartera	68.033,42	1070,18	480	6.470

Tabla 4. Potencial fotovoltaico, superficie total de panel, número de paneles y viviendas abastecidas por los C.E. y C.S.

5.2.Análisis del potencial fotovoltaico por distritos urbanos

Como se puede observar en la Tabla 5, existen grandes contrastes entre los distintos distritos de la ciudad. En primer lugar, respecto a población total se observa que el distrito de Delicias es el más poblado de la ciudad, superando los 100.000 habitantes y representando por sí mismo casi 1/6 de la población urbana de la ciudad. Es seguido por El Rabal y San José. Entre estos tres distritos representan casi el 40 % de la población de la ciudad de Zaragoza. Por debajo se encuentra Miralbueno, con casi una décima parte que Delicias, La Almozara y Oliver-Valdefierro. Entre estos tres distritos apenas suponen un 11% de la población total de la ciudad.

Si se tiene en cuenta la densidad de población también hay grandes diferencias. Estos datos pueden inducir a error ya que los distritos de Torrero-La Paz, Casablanca-Distrito Sur, Las Fuentes y

Miralbueno incluyen grandes áreas no construidas, como es el caso de Los Pinares de Venecia en Torrero-La Paz, la zona de huertos y futura expansión urbana de la ciudad en Casablanca-Distrito Sur, la zona de campos y huertas en las Fuentes y la zona de campos y solares en Miralbueno. A pesar de ello, cabe destacar la alta densidad de población del distrito Delicias y Centro, en torno a los 30.000 hab/km².

Distrito	Población (Padrón 2021)	Densidad de población (hab/km ²)	Área (km ²)
Torrero-La paz	42.852	383	111,88
San José	66.815	18.152	3,68
Centro	53.045	29.329	1,81
Las Fuentes	42.613	6.748	6,31
Casco histórico	46.930	23.649	1,98
Universidad	50.342	16.669	3,02
Delicias	103.592	31.539	3,28
La Almozara	29.583	7.924	3,77
Casablanca- Distrito Sur	49.443	747	66,19
Oliver-Valdefierro	32.517	7.493	4,34
Miralbueno	13.250	1.611	8,22
El Rabal	78.997	9.431	8,38
Actur-Rey Fernando	58.074	6.005	9,67
Zona urbana de Zaragoza	668.053	2872,78	232,55

Tabla 5.Población y densidad de población de los distritos de la ciudad de Zaragoza. Fuente: INE

Respecto a la renta por hogar y por persona (Tabla 6), también hay unas desigualdades muy marcadas en la ciudad de Zaragoza. Destaca el distrito Centro, con más de 43.000 € de renta media por hogar y casi 18.000 € por persona, seguido del distrito Universidad, con casi 39.000 € de renta media por hogar y más de 15.200 € por persona, y del distrito Casablanca-Distrito Sur con más de 37.000 € de renta media por hogar y casi 15.300 € por persona. En la situación más desfavorable se encuentra el distrito de Las Fuentes, con casi la mitad que el Centro, menos de 25.000 € de renta por hogar y menos de 9.600 € por persona, seguido de Torrero-La Paz con una renta por hogar muy poco superior a los 25.000 € y una renta por persona rozando los 10.000 € por persona.

Distrito	Renta por hogar (€)	Renta por persona(€)
Torrero-La paz	25.023,38	10.003,09
San José	27.111,37	10.686,54
Centro	43.375,45	17.846,86
Las Fuentes	24.610,00	9.599,05
Casco histórico	25.886,36	10.339,86
Universidad	38.851,51	15.212,16
Delicias	27.014,48	10.282,80
La Almozara	31.141,88	11.717,25
Casablanca- Distrito Sur	37.271,72	15.290,04
Oliver-Valdefierro	33.604,45	11.841,67
Miralbueno	29.887,11	10.140,05
El Rabal	28.958,11	10.716,23
Actur-Rey Fernando	33.148,36	11.751,78

Tabla 6. Renta por hogar y por persona de los distritos de la ciudad de Zaragoza. Fuente: Ebropolis-GEOT (2017).

Teniendo en cuenta estos datos, sobre población y renta de los distritos, se observa que el porcentaje de las viviendas que se podrían ver favorecidas por la implantación de paneles fotovoltaicos en los equipamientos municipales también es dispar (Tabla 7). Esta heterogeneidad es causada por la disposición irregular en la ciudad de los centros de salud, centros deportivos y pabellones (Figura 23).

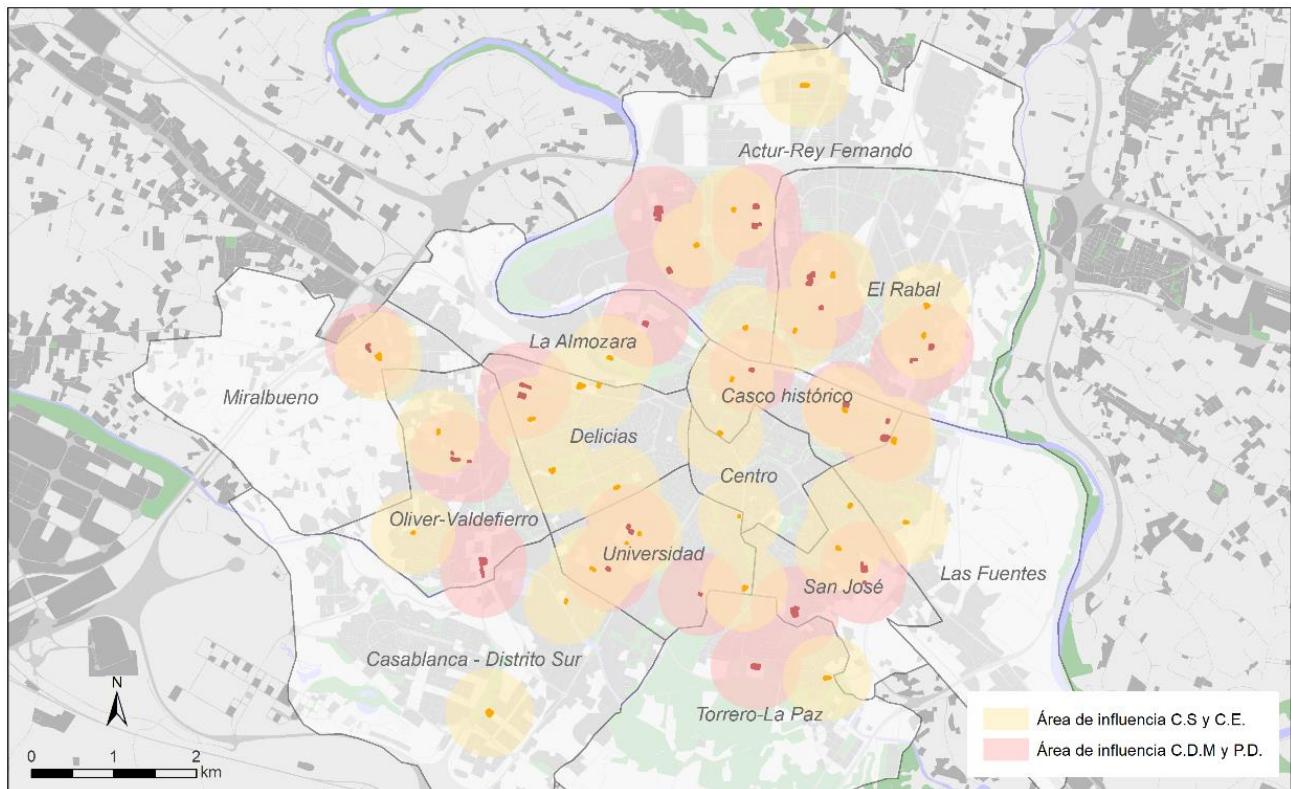


Figura 23. Áreas de influencia (500 m) de los centros deportivos (C.D.M.), pabellones deportivos (P.D.), centros de salud (C.S.) y centros de especialidades (C.E.) para el abastecimiento de energía fotovoltaica a los hogares.

Como se muestra en la Tabla 7, destaca el distrito Las Fuentes con un 98% de viviendas que se podrían abastecer. La razón fundamental se debe a la alta intensidad del espacio construido, a una morfología urbana compacta, y sobre todo a que convergen las áreas de influencia de los centros de salud San José Norte, Torre Ramona, y Las Fuentes Norte y el C.D.M. Alberto Maestro. Con valores muy altos de viviendas favorecidas también están los distritos Oliver-Valdefierro, con un 95%, y San José con un 93%.

En el lado contrario, con menos porcentaje de viviendas beneficiadas están los distritos Casablanca-Distrito Sur y Miralbueno. Casablanca-Distrito Sur a diferencia de los barrios más céntricos, está mucho más expandido a lo ancho que a lo alto (tejido urbano abierto) y solo se verían favorecidas un 49% de las viviendas del distrito. A pesar de que un total de dos centros de salud y dos centros deportivos podrían producir energía, solo el C.S. Valdespartera lo haría dentro de los límites del distrito. En el caso de Miralbueno, con un 62% de viviendas beneficiadas, ocurre que solo se ve favorecido por el C.S. Miralbueno-Garrapinillos y por el C.D.M. que además están muy próximos y solapan gran parte de sus áreas de influencia.

El distrito Centro también es un caso especial, ya que es el tercero más bajo, con un 63% de viviendas favorecidas y sin presencia de ningún centro de salud, deportivo ni pabellones en toda el área del distrito, viéndose beneficiado por el C.E. Ramón y Cajal, y por el C.S. José R. Muñoz Fernández, situado en el distrito Universidad. Una de las razones puede ser que es un área pequeña de la ciudad más enfocada a los servicios, comercio, hostelería, turismo, cultura y ocio, situándose los centros de salud y deportivos y los pabellones en los distritos contiguos.

De este análisis también cabe destacar que los dos distritos con menor porcentaje de viviendas beneficiadas (Miralbueno y Casablanca-Distrito-Sur) son los más nuevos de la ciudad, estando actualmente en expansión, por lo que es posible que se incluyan nuevos centros de salud, deportivos y pabellones en un futuro cercano.

Distrito	Nº total de viviendas	Nº total de viviendas beneficiadas	% de viviendas beneficiadas sobre el total
Las Fuentes	20.036	19.573	98
Oliver-Valdefierro	14.622	13.842	95
San José	32.610	30.342	93
Actur-Rey Fernando	22.837	20.591	90
Casco histórico	24.660	21.798	88
Torrero-La Paz	19.832	16.630	84
La Almozara	11.216	9.005	80
El Rabal	34.018	26.643	78
Universidad	25.983	19.270	74
Delicias	51.347	35.034	68
Centro	28.675	18.109	63
Miralbueno	3.922	2.423	62
Casablanca- Distrito Sur	19.286	9.438	49

Tabla 7. Viviendas beneficiadas por la producción de energía de los equipamientos municipales.

5.3. Estimación del autoabastecimiento de los hogares afectados por el área de influencia de los equipamientos municipales

El presente trabajo se ha basado en la iniciativa Actur Barrio Solar para estimar el grado de autoabastecimiento de los hogares. Tendría un coste de 6,9 € mensual, lo que equivale a 82,8 € anuales y ofrece acceso a una potencia de 0,5 kWp, equivalente a unos 1.000 kWh, según las características del panel colocado y la localización de la ciudad de Zaragoza.

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), se estima que el consumo de electricidad medio por hogar en España es de 3487 kWh anual, por lo que el abastecimiento de energía desde los equipamientos a las viviendas que participaran en el proyecto supondría un 28,6 % del consumo total de energía anual en el hogar.

Con el precio actual medio del kWh en España a 5/11/2021 de 0,23 € el kWh, los 1.000 kWh ofrecidos por los equipamientos supondrían 230 € de coste a precio del mercado, por lo que con esta iniciativa implicaría un ahorro de unos 147 € anuales, es decir, un ahorro del 64% en los 1.000 kWh ofrecidos, pasando de costar 230 € a 82,8 €, y un 18% en la factura anual media de 3487 kWh, pasando de 802 € a 655 €.

Como los datos de consumo no se han podido extraer por hogar ni distrito, se ha asumido el dato medio nacional para toda la zona de estudio. Se presupone que habrá una alta correlación entre renta y consumo energético por hogar en los diferentes distritos de Zaragoza.

5.4. Propuestas de zonas de actuación preferente

Los objetivos de este trabajo no eran solo el cálculo del potencial fotovoltaico de los distintos equipamientos de salud y deporte, sino también proponer zonas de actuación preferente en función de las características socioeconómicas de la zona. En los distritos que más interesaría actuar son: Las Fuentes, Torrero-La Paz, Delicias y Casco Histórico, ya que son las zonas de la ciudad con la renta anual por hogar más baja, entre 24.600 € y 27.000 €. En este sentido, se han seleccionado los

siguientes centros según su alto potencial fotovoltaico y el número de viviendas a las que podrían beneficiar:

- C.D.M. Alberto Maestre que favorece al distrito de Las Fuentes y al distrito Casco Histórico.
- C.D.M. Torrero que beneficia al distrito Torrero.
- C.D.M. Delicias que favorece al distrito Delicias.
- C.E. Inocencio Jiménez que favorece en su mayoría al distrito Delicias.
- C.S. Rebolería que beneficia al distrito Casco Histórico.
- C.S. Torre Ramona que favorece al distrito Las Fuentes.

Centro de Salud / Deportivo	Nº de viviendas beneficiadas	Potencial fotovoltaico (kWh)	Nº de viviendas beneficiadas en un año
C.D.M. Alberto Maestre	14.176	118937,65	118
C.D.M. Torrero	6.548	79658,33	79
C.D.M. Delicias	7259	89366,81	89
C.E. Inocencio Jiménez	8.328	50253,99	50
C.S. Reboleria	10.422	11327,75	11
C.S. Torre Ramona	7.877	24040,42	24

Tabla 8: Características de la selección de los centros de salud, centros deportivos y pabellones de actuación preferente.

Las características de lo que aporta cada equipamiento se muestran en la Tabla 8, y en la Figura 24 se representan las zonas de actuación preferente y sus áreas de afección. En el caso del distrito Delicias, se han seleccionado dos centros, ya que es el barrio con más población y rentas más bajas. En el caso del distrito Las Fuentes y del distrito Casco Histórico, cada uno tiene un centro propio y el C.D.M Alberto Maestre que beneficia a ambos dado que está situado en el punto de unión entre ellos. En el distrito Torrero se ha seleccionado solo un C.D.M ya que este tiene un gran potencial fotovoltaico.

Con esta propuesta, un total de 371 hogares se verían beneficiados. En una segunda fase, se podrían incluir los siguientes distritos de renta más baja, como es el caso de San José y El Rabal. En el distrito San José destaca el C.D.M. la Granja con un potencial fotovoltaico de 72.246 kWh, lo que permitiría que un total de 72 viviendas pudieran beneficiarse a lo largo de un año. En el distrito de El Rabal, el Pabellón Bomberos, con un potencial fotovoltaico de 104.232 kWh permitiría que un total de 104 viviendas pudieran conectarse a lo largo de un año.

Otro tipo de actuación que se puede llevar a cabo es proponer otros lugares para la colocación de paneles fotovoltaicos para los distritos que menos porcentaje de viviendas se ven beneficiadas, ya que el objetivo ideal es que gran parte de la energía consumida en la ciudad sea auto-producida de manera sostenible en la misma. En este caso, los distritos con menos porcentaje de viviendas que se podrían ver favorecidas son: Casablanca-Distrito Sur, Miralbueno y Centro. Se podrían utilizar las azoteas de los centros educativos y bibliotecas públicas. En el caso del distrito Casablanca-Distrito Sur se proponen dos colegios públicos: Valdespartera y Montecanal. En el distrito de Miralbueno se plantea el Centro Público Integrado Río Sena y el Centro Público Integrado Julio Verne. Y en el distrito Centro el Colegio Público Miraflores y la Biblioteca Pública de la DGA. Al igual que ocurre con los equipamientos analizados, suele tratarse de azoteas planas y de dimensiones suficientes para colocar una instalación fotovoltaica.

La incorporación de estos centros, que no son de salud ni deportivos, supondría un incremento en el número de viviendas que podrían verse beneficiadas. En el caso del distrito de Miralbueno, se pasaría de 2.423 a 3.794 viviendas, lo que supone un incremento del 62% al 96,7%. En el caso del distrito Centro, las viviendas que podrían verse beneficiadas con la incorporación del colegio y la biblioteca pasarían de 18.109 a 23.383, suponiendo un aumento del 63% al 81,5%. Finalmente, en el caso de Casablanca-Distrito Sur se pasaría de 9.435 a 12.134 viviendas favorecidas, es decir, de un

49% a un 63%. La evolución de estos tres distritos puede verse plasmada en la Figura 25, donde se observa una mayor cobertura de la zona residencial de las 3 zonas que se han propuesto.

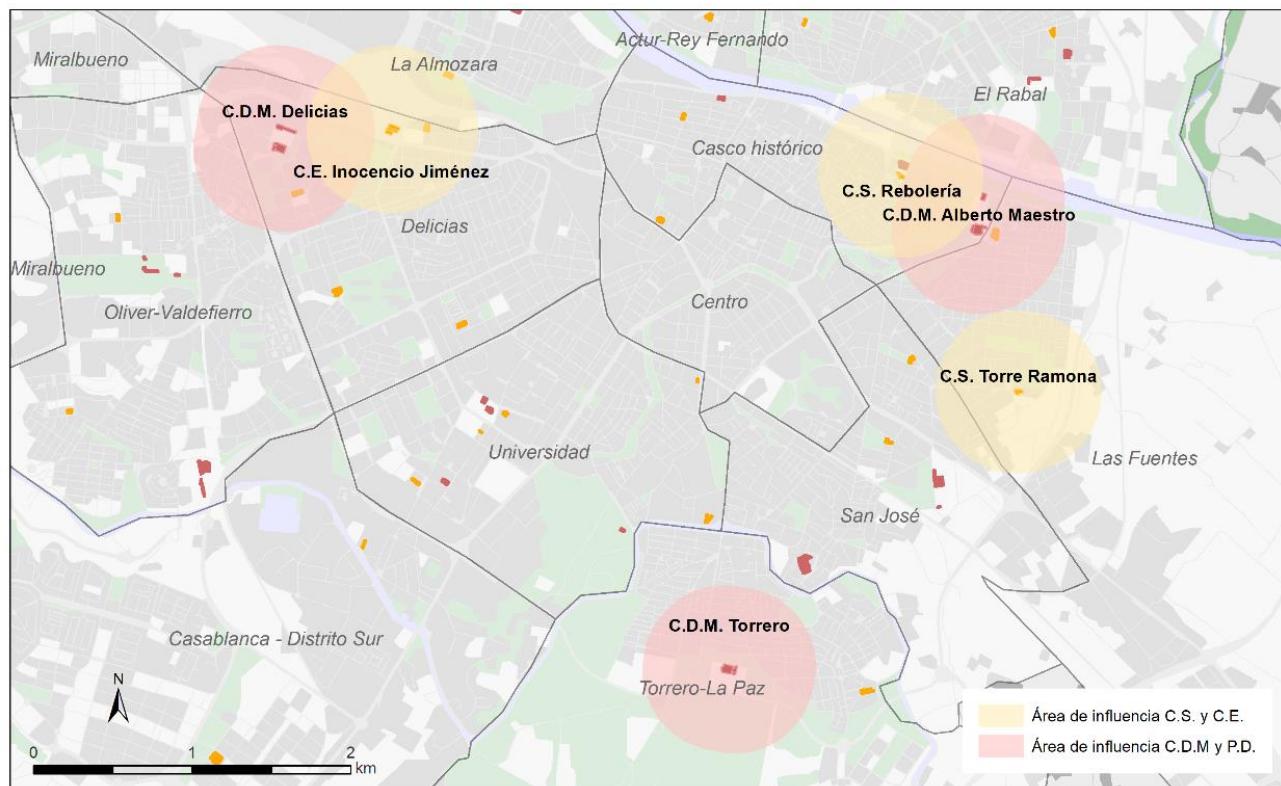


Figura 24. Zonas de actuación preferente y área de afección.

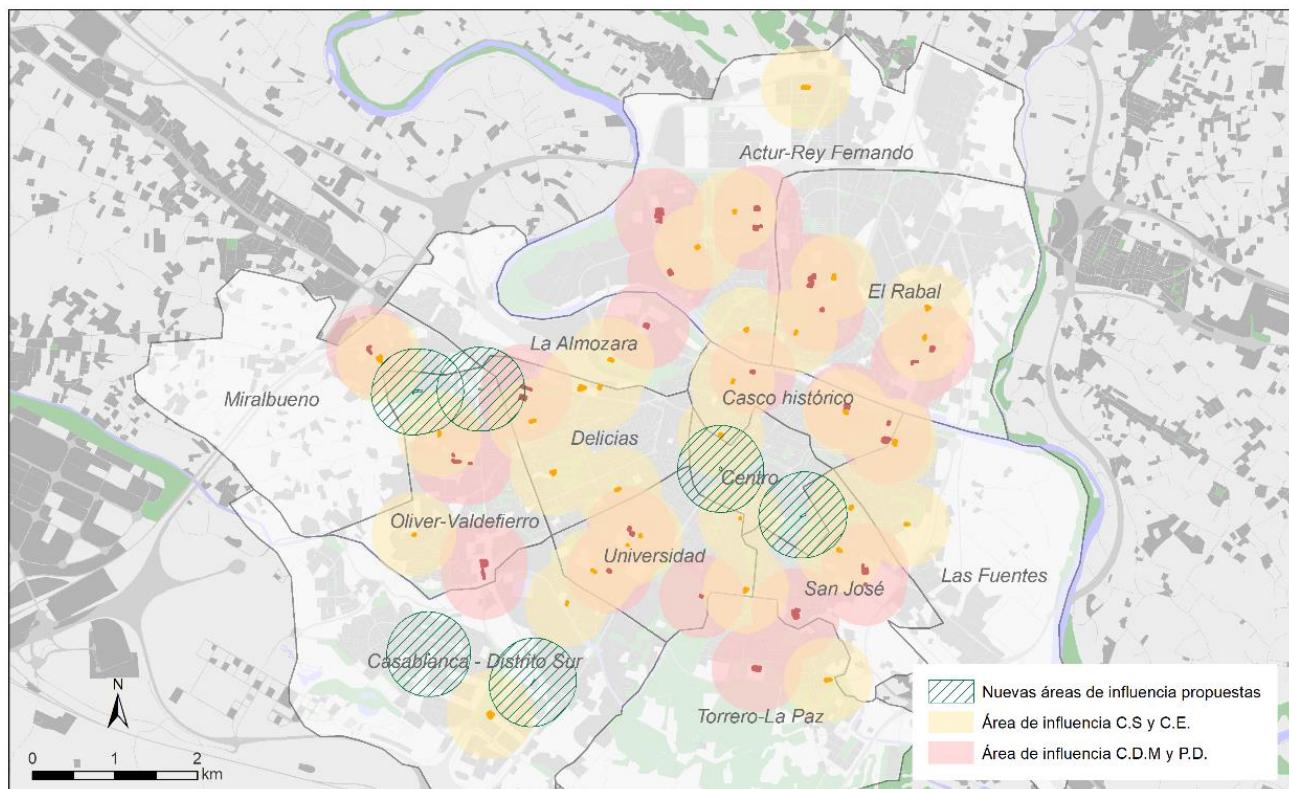


Figura 25. Nuevas propuestas de centros para la colocación de paneles fotovoltaicos

6. CONCLUSIONES

Las ciudades son espacios en continuo crecimiento, aglomerando población, actividades económicas, etc. pero también consumiendo grandes cantidades de recursos, especialmente no renovables, y contaminando el medio ambiente. Por ello, los poderes públicos cada vez están más concienciados de la necesidad de rediseñar las ciudades para hacerlas más sostenibles. En este contexto de búsqueda de soluciones, las tecnologías de la información geográfica pueden ayudar en el análisis de la realidad desde un enfoque transversal.

En este trabajo se presenta una metodología de análisis multicriterio en un entorno SIG para determinar las zonas más adecuadas para la instalación de sistemas fotovoltaicos en las azoteas de las edificaciones correspondientes a equipamientos municipales de salud y deporte del núcleo urbano de Zaragoza. De esta forma es posible realizar una aproximación sobre la cantidad de energía eléctrica que estos espacios, hasta ahora infrautilizados, podrían producir. Para ello ha sido necesario el uso de nubes de puntos LiDAR-PNOA para obtener un Modelo Digital de Superficies con el cual caracterizar la morfología de las cubiertas y su disposición espacial (inclinación, orientación, sombreado, y soleamiento), así como datos catastrales para conocer el número de viviendas a las que se podría dar servicio desde estos equipamientos, teniendo en cuenta un área de influencia de 500 m según el Real Decreto 244/2019 sobre autoconsumo.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto una heterogeneidad en el potencial de los distintos equipamientos seleccionados, a lo que hay que sumar su desigual distribución en la ciudad. Esto implica que el número de viviendas que se podrían abastecer de energía fotovoltaica también es variable. Los contrastes se manifiestan por distritos, donde la densidad del tejido urbano juega un papel muy importante. A pesar de no contar con datos detallados de personas por hogar, renta y consumo, se pueden proponer zonas donde sería aconsejable materializar este tipo de iniciativas basadas en la sostenibilidad energética y la lucha contra la pobreza energética, como por ejemplo en el distrito de Las Fuentes, Torrero-La Paz, Delicias y Casco Histórico.

Teniendo en cuenta que las propuestas han sido exclusivamente realizadas para ciertos edificios de carácter público, se podría extender a otros edificios como colegios, institutos o bibliotecas para favorecer una distribución más equitativa por los distritos urbanos.

Cabe destacar ciertos factores limitantes en la investigación llevada a cabo, como la baja densidad de puntos de las nubes LiDAR-PNOA, que implica una caracterización general y vaga de las cubiertas. Sería deseable contar con datos de mayor densidad para descartar los posibles errores que se pueden introducir en el Modelo Digital de Elevaciones, como salidas de evacuación de humos, chimeneas, ascensores, cables, antenas, etc. presentes en las azoteas. Asimismo, convendría disponer de la capacidad portante de las cubiertas, para saber si es posible la colocación de los paneles fotovoltaicos en toda la superficie o solo en parte.

En resumen, aunque todavía se está lejos del autoabastecimiento completo, si es posible la autoproducción dentro del propio entorno urbano. Prueba de ello es la, ya iniciada, propuesta de Barrio Solar Actur en el distrito de Actur-Rey Fernando.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aemet. Atlas de la radiación solar en España, (2012) Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar

Agenda 2030. Objetivos de desarrollo sostenible. Disponible en: <https://www.agenda2030.gob.es/objetivos/home.htm>

Asociación de Ciencias Ambientales. Tercer estudio de la pobreza energética en España, (2016) . Nuevos enfoques. Disponible en: <https://www.cienciasambientales.org.es/index.php/comunicacion/noticias/567-3er-estudio-pobreza-energetica-en-espana-nuevos-enfoques-de-analisis>

Ayuntamiento de Zaragoza, (2021). Servicios y equipamientos. Disponibles en: <https://www.zaragoza.es/sede/portal/tramitesservicios/servicio/catalogo/?query=equipamientos>

Ayuntamiento de Zaragoza, (2021). Cifras de Zaragoza. Datos Demográficos Obtenidos del Padrón Municipal de Habitantes. Disponible en: <https://www.zaragoza.es/cont/paginas/estadistica/pdf/Cifras-Zaragoza-2021.pdf>

Bergamasco, L. y Asinari, P., (2011). *Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Further improvements by ortho-image analysis an application to Turin (Italy)*. Solar Energy, 85, pp. 2741-2756. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/229227336_Scalable_methodology_for_the_photovoltaic_solar_energy_potential_assessment_based_on_available_roof_surface_area_Application_to_Piedmont_Region_Italy

Boj Perez, M. (2021). *El autoconsumo de energía solar y comunidades energéticas como herramientas de lucha contra la Pobreza Energética y empoderamiento de la ciudadanía en el cambio de modelo energético*. Disponible en: <https://zaguau.unizar.es/record/101730?ln=es>

Comisión Europea, J.R.C, (2019). Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).

Comisión Europea, (2020). En el punto de mira: La eficiencia energética de los edificios. Disponible en: https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_es

Comisión Europea. La energía renovable, (2021) Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/70/la-energia-renovable>

Díaz-Vilariño, L., Lagüela, J., Armesto, J. y Arias, P., (2013). *Semantic as-built 3d models including shades for the evaluation of solar influence on buildings*. Solar Energy, 92, pp.269-279. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/256855114_Semantic_as-built_3D_models_including_shades_for_the_evaluation_of_solar_influence_on_buildings

Dirección General del Catastro, (2016). Cartografía Catastral Urbana [WWW Document].

Dirección General del catastro. Clasificación y codificación de los elementos. Disponible en: https://www.catastro.meh.es/documentos/formatos_intercambio/FICCcodigosUnificado07.pdf

Dirección general del catastro. Servicio Inspire de Cartografía catastral. Disponible en: <https://www.catastro.minhap.es/webinspire/index.html>

Ebrópolis. Observatorio Urbano, (2019). Renta media neta de Zaragoza y su entorno. Disponible en: <http://observatoriourbano.ebropolis.es/files/File/Observatorio/Documentos/UARenta2019.pdf>

Ecodes, (2020). Investigación para la prevención de la contaminación en edificaciones urbanas: rehabilitación, regeneración, autoconsumo de energía, generación de empleo verde y desarrollo de herramientas. Disponible en: <https://ecodes.org/images/que>

[hacemos/pdf_20_MITECO/Investigacion_diseno_herramientas_elaboracin_estrategias_locales_regen
eracin_rehabilitacin_urbana.pdf](hacemos/pdf_20_MITECO/Investigacion_diseno_herramientas_elaboracin_estrategias_locales_regen
eracin_rehabilitacin_urbana.pdf)

Eurostat, (2021) Electricity prices statistics. Disponible en: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (2009). Sección HE 5 Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica. Doc. Básico HE Ahorr. Energía, pp. 1–17.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, (2009): Código Técnico de la Edificación de España. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). Consumo del Sector Residencial en España. Resumen de información básica. Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Documentacion_Basica_Residencial_Unido_c93da537.pdf

Instituto nacional de estadística, (2021). Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176951&menu=ultiDatos&idp=1254735572981

Izquierdo, S., Rodrigues, M. y Fueyo, N., (2008). *A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations.* Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X08000625>

Martín Ávila, A.M. (2014). *Modelo Geográfico para la estimación del potencial fotovoltaico en tejados. Caso de estudio: Miraflores de la Sierra.* Disponible en: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/25543/>

Martín Ávila, A.M., Domínguez Bravo, J. (2015). *Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos.* Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/312218692_Desarrollo_de_un_modelo_geografico_para_la_evaluacion_del_potencial_fotovoltaico_en_entornos_urbanos

Martín Ávila, A.M., Amador Guerrera., J. Domínguez Bravo, J. (2015). *Estudio del Potencial Fotovoltaico sobre los Tejados del Núcleo Urbano de Miraflores de la Sierra (Madrid).* Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/283258576_Estudio_del_Potencial_Fotovoltaico_sobre_los_Tejados_del_Nucleo_Urbano_de_Miraflores_de_la_Sierra_Madrid

Martín Ávila, A.M., Amador Guerrera., J. Domínguez Bravo, J. (2016). *Desarrollo de un Modelo geográfico para evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos.* Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/312218692_Desarrollo_de_un_modelo_geografico_para_la_evaluacion_del_potencial_fotovoltaico_en_entornos_urbanos

Montealegre, A.L., García-Pérez, S., Guillén-Lambea, S., Monzón-Chavarriás, M., Sierra-Pérez, J. (2022). *GIS-based assessment for the potential of implementation of food-energy-water systems on building rooftops at the urban level.* Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721050385>

Observatorio Urbano de Zaragoza y su Entorno, (2018). Zaragoza en datos. Informe global sobre la ciudad y sus distritos. Zaragoza (Spain). Disponible en: <http://www.ebropolis.es/files/File/Observatorio/Distritos/DossierZaragoza-marzo2018-Ebropolis.pdf>

Renslow, M., 2013. *Manual of airborne topographic LiDAR.* The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 504 pp.

- Renusol. Sistemas de montajes para modulos solares. Disponible en: <https://www.renusol.com/es/>
- SoDa 2, (2021). Solar Radiation Data. Solar Energy Services for Professionals. Disponible en: <http://www.soda-pro.com/web-services/astronomy/solar-geometry-2>
- Suomalainen, K., Wang, V., Sharp, B. (2017). *Rooftop solar potential based on LiDAR data: Bottom-up assessment at neighbourhood level.* Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/316344401_Rooftop_solar_potential_based_on_LiDAR_data_Bottom-up_assessment_at_neighbourhood_level
- Thebaulta, M., Clivilleb, V., Berrahb, L., Desthieuxc, G., (2020). *Multicriteria roof sorting for the integration of photovoltaic systems in urban environments.* Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/341556725_Multicriteria_roof_sorting_for_the_integration_of_photovoltaic_systems_in_urban_environments
- Vosselman, G., & Maas, H.G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning.* Whittles. Disponible en: http://explore.bl.uk/primo_library/libweb/action/display.do?tabs=detailsTab&gathStatTab=true&ct=display&fn=search&doc=ETOCRN278808359&indx=1&recIds=ETOCRN278808359
- Weather and climate. (2021). Disponible en: <https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine,zaragoza,Spain>
- Wiginton, L.K., Nguyen, H.T., Pearce, J.M. (2010). *Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy.* Computers, Environment and Urban Systems, 34, 345-357 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971510000025>
- World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. (2018) Disponible en: <https://doi.org/10.18356/b9e995fe-en>.