

TRABAJO fin de máster

**IDENTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE ÓPTIMA EN
TEJADOS DE EDIFICACIONES URBANAS PARA LA
INSTALACIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOL-
TAICOS EN DISTINTOS SECTORES DE LA CIUDAD
DE ZARAGOZA (ESPAÑA)**

Autor: Alejandro Ortín Gual

Director: Severino Escolano Utrilla

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del te-
rritorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Noviembre de 2021



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Este trabajo consiste en un análisis de la radiación solar registrada en las zonas óptimas de los tejados de tres muestras de edificios localizadas en los barrios de Valdespartera, el Actur y San Pablo en la ciudad de Zaragoza. Se han utilizado ortofotos del PNOA, nubes de puntos PNOA LiDAR y capas vectoriales del catastro además de los software ArcGIS Pro y ArcGIS Desktop para realizar la creación de rásteres y filtrado de píxeles aplicando requisitos de pendiente y orientación. Los resultados de radiación solar de los píxeles obtenidos después del filtrado son comparados para conocer cómo condiciona la tipología del tejado, el entramado urbano y la morfología del edificio a la hora de instalar placas solares fotovoltaicas en los tejados.

Palabras clave: *Tejados de edificios, Radiación solar, Paneles solares fotovoltaicos, SIG, Planificación energética urbana.*

Abstract

This work consists in an analysis of the solar radiation recorded in the optimal areas of rooftops of three samples of buildings located in the neighbourhoods of Valdespartera, Actur and San Pablo in the city of Zaragoza. PNOA orthophotos, PNOA LiDAR point clouds and vector layers from catastro have been used as well as ArcGIS Pro and ArcGIS Desktop software to generate raster layers and to filter pixels based on slope and aspect requirements. The solar radiation results of pixels obtained after the filtering process are compared in order to know the typology of the roof, the urban framework and the morphology of the building affect the installation of photovoltaic solar panels on the roofs.

Key words: *Building roofs, Solar radiation, Photovoltaic solar panels, GIS, Urban energy planning*

Índice

1. INTRODUCCIÓN	pág. 4
2. MARCO LEGAL	pág. 9
3. METODOLOGÍA Y DATOS	pág. 10
3.1. Área de estudio	pág. 11
3.2. Procedimientos.....	pág. 16
3.3. Datos utilizados	pág. 31
3.4. Software utilizado	pág. 32
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	pág. 32
4.1. Radiación solar media anual por metro cuadrado de cada una de las celdas urbanas prefiltrado y posfiltrado y su potencial eléctrico en paneles fotovoltaicos.....	pág. 33
4.2. Cambios en los píxeles debido al filtrado por orientación y pendiente y su impacto en la radiación solar	pág. 37
4.3. Metros cuadrados disponibles para instalar paneles fotovoltaicos, la radiación solar media anual por metro cuadrado y su potencial eléctrico	pág. 40
5. CONCLUSIONES	pág. 42
6. BIBLIOGRAFÍA	pág. 44

Índice de figuras

Figura 1. Producción de energías renovables en España entre 2015 y 2019. Fuente: Eurostats. Elaboración propia.....	pág. 6
Figura 2. Evolución del IPC en España desde septiembre de 2020 a septiembre de 2021. Fuente: INE. Elaboración propia.....	pág. 8
Figura 3. Esquema de la legislación española aplicable en energía fotovoltaica. Fuente y elaboración: Censolar.....	pág. 9
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología del trabajo.....	pág. 11
Figura 5. Mapa a escala provincial junto con un mapa a escala municipal destacando la localización de los tres distritos de estudio de la ciudad de Zaragoza.	pág. 12
Figura 6. Mapa de la zona de estudio de Valdespartera a escala distrital y destacando la muestra de edificios seleccionada.	pág. 13
Figura 7. Mapa de la zona de estudio del Actur a escala distrital y destacando la muestra de edificios seleccionada.....	pág. 14
Figura 8. Mapa de la zona de estudio de San Pablo a escala distrital y destacando la muestra de edificios seleccionada.	pág. 15
Figura 9. Muestra de tejados de la zona de estudio Valdespartera.....	pág. 17
Figura 10. Muestra de tejados de la zona de estudio del Actur.....	pág. 18
Figura 11. Muestra de tejados de la zona de estudio de San Pablo.....	pág. 18
Figura 12. Obstáculos identificados en la muestra de tejados de Valdespartera.....	pág. 20
Figura 13. Visualización del MDS de la zona de estudio de San Pablo.....	pág. 22
Figura 14. Visualización del MDS de la zona de estudio del Actur.....	pág. 24
Figura 15. Visualización del MDS de la zona de estudio de Valdespartera.....	pág. 26
Figura 16. Visualización de la radiación solar de la zona de estudio de San Pablo.....	pág. 28
Figura 17. Visualización de la radiación solar de la zona de estudio del Actur.....	pág. 29
Figura 18. Visualización de la radiación solar de la zona de estudio de Valdespartera.....	pág. 30
Figura 19. Radiación solar prefiltrado en la muestra de tejados de Valdespartera.	pág. 34
Figura 20. Radiación solar posfiltrado en la muestra de tejados de Valdespartera.	pág. 34
Figura 21. Radiación solar prefiltrado en la muestra de tejados del Actur.	pág. 35
Figura 22. Radiación solar posfiltrado en la muestra de tejados del Actur.	pág. 35
Figura 23. Radiación solar prefiltrado en la muestra de tejados de San Pablo.	pág. 36
Figura 24. Radiación solar posfiltrado en la muestra de tejados de San Pablo.	pág. 36
Figura 25. Distribución de los valores de radiación de los píxeles prefiltrado en Valdespartera. .	pág. 38
Figura 26. Distribución de los valores de radiación de los píxeles prefiltrado en el Actur.....	pág. 38
Figura 27. Distribución de los valores de radiación de los píxeles prefiltrado en San Pablo.	pág. 38
Figura 28. Distribución de los valores de radiación de los píxeles posfiltrado en Valdespartera. .	pág. 39
Figura 29. Distribución de los valores de radiación de los píxeles posfiltrado en el Actur.	pág. 39
Figura 30. Distribución de los valores de radiación de los píxeles posfiltrado en San Pablo.	pág. 39
Figura 31. Presencia de paneles fotovoltaicos, obstáculos y zonas libres en los tejados de la muestra de Valdespartera.....	pág. 41

Índice de tablas

Tabla 1. Producción bruta de electricidad por combustible en la UE entre 1990 y 2019. Fuente: Eurostat.....	pág. 5
Tabla 2. Evolución de la factura mensual de la luz en España desde agosto de 2020 a octubre de 2021. Fuente: OCU.....	pág. 7
Tabla 3. Valores de radiación solar media anual y potencial eléctrico en los tejados de las zonas de estudio de Valdespartera, Actur y San Pablo, antes y después del filtrado.....	pág. 37
Tabla 4. Evolución del número de píxeles, el máximo de radiación y el mínimo de radiación.....	pág. 37
Tabla 5. Número de píxeles, área, radiación solar media anual y potencial eléctrico de las zonas libres de obstáculos de los tejados de Valdespartera.....	pág. 42

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene por objeto analizar los tejados de los edificios de la ciudad de Zaragoza para conocer su idoneidad para colocar instalaciones de paneles solares fotovoltaicos. La evaluación del potencial de la energía solar para uso urbano es un reto, ya que existen importantes variaciones espaciales y temporales en la radiación solar que están sumamente afectadas por diversos factores como la orientación de la superficie, los efectos de las sombras y las características del terreno (Li, Ding, Liu & Wang, 2016). En este trabajo se analizaron muestras de tejados de los distritos de Valdespartera, Actur y San Pablo localizados en la ciudad de Zaragoza, para estudiar cómo influyen estos factores a la hora de instalar placas fotovoltaicas y a su vez, cómo afectan a la radiación solar que incide sobre ellos.

La energía tiene una gran importancia desde el punto de vista social, económico, ambiental y estratégico, tanto a escala local como a escala global.

La energía ha permitido a las sociedades sobrevivir y desarrollarse a lo largo de los años, por esa razón no sería de extrañar que pudiera ocupar el primer peldaño de la pirámide de Maslow como una de las necesidades básicas. No se puede concebir una acción que no requiera consumo de energía en algún momento. Desde iluminar una ciudad entera como Nueva York hasta calentar un café, desde lanzar un satélite al espacio hasta cargar un teléfono móvil, todo requiere de energía. Desde el principio de los tiempos los seres humanos han estado utilizando la naturaleza como principal fuente para obtener energía, ya que contiene una gran cantidad de recursos y es de fácil acceso y en esos recursos se distinguen dos grupos: los recursos no renovables y los renovables. Durante la mayor parte de su existencia el ser humano ha estado utilizando los recursos no renovables debido a que tenían un gran potencial energético, se podían extraer relativamente fácil del entorno y siempre han sido fiables y abundantes. Sin embargo, tienen sus desventajas como son su alto nivel de contaminación y su cantidad finita, que incrementan el cambio climático y la progresiva escasez de recursos. Por estos motivos, las personas se plantearon la posibilidad de producir energía de manera más limpia a partir de recursos inagotables y de ahí surgieron técnicas y tecnologías para obtener energía a partir de recursos terrestres renovables como el agua, la radiación solar y el viento. En la actualidad la sociedad está apostando por una transición del modelo energético basado en recursos no renovables a otro basado en recursos renovables.

La energía es también imprescindible para el modelo económico del siglo XXI. Históricamente, el crecimiento económico ha ido estrechamente ligado a la energía (Centro Complutense de Estudios e Información Medioambiental [CCEIM], 2011). Aquellos países con los recursos naturales o económicos y la tecnología para producir energía eran los que experimentaban un mayor desarrollo y enriquecimiento debido a que su industria podía mantener una elevada producción continua gracias a la alta capacidad energética. Sin embargo, este crecimiento económico exponencial resultó ser una amenaza para el modelo energético de los países desarrollados, ya que al aumentar la producción aumentaba la demanda de energía por parte de las empresas. También cada vez había más y más personas que se podían permitir un alto consumo energético doméstico que contribuía considerablemente a ese aumento generalizado de la demanda de energía. Este bucle tan inestable es lo que caracteriza al modelo económico- energético en las sociedades actuales.

Para hacer frente a este problema, muchos países han seguido la estrategia de aumentar la extracción de recursos para producir más energía y saciar la demanda sin considerar que esta estrategia es cortoplacista e insostenible y no soluciona el problema sino que lo empeorará en el futuro, un futuro en el que se prevé un aumento de la población mundial y un crecimiento de las ciudades. Según un informe de Naciones Unidas del 2018 se estima que para el 2030 el 60% de la población mundial vivirá en ciudades y habrá unas 706 ciudades de más de un millón de habitantes en todo el mundo (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2018). En las ciudades es donde se registra un mayor consumo energético ya que concentra a la gran mayoría de consumidores, además según datos de la Agencia Internacional de la Energía, las ciudades son responsables del 67 % del consumo energético global (Pérez & Lumbreras, 2020). Teniendo en cuenta estos datos, las economías mundiales tendrán que apostar por las energías renovables para evitar una crisis energética que ya se hace de notar con sucesos como el encarecimiento del gas natural y el barril de petróleo, el au-

mento de las tarifas eléctricas, el cierre de fábricas y el encarecimiento del transporte y los alimentos. Un colapso energético provocaría una recesión económica que afectaría a todo el mundo, pero en especial a los grupos sociales más desfavorecidos, ya que aumentaría la pobreza en las ciudades y en consecuencia muchas personas no podrían permitirse el acceso a la electricidad.

Empeorando lo anterior también hay que tener en cuenta la crisis climática causada por la contaminación antrópica, principalmente generada en la producción de energía, ya que los impactos del cambio climático son notables y destructivos, y sus consecuencias amenazan a los seres vivos que habitan el planeta. Por esa razón, las mayores economías mundiales han elaborado programas, normativas y estrategias que impulsan una transición hacia unas fuentes de energía renovables mucho menos contaminantes con la esperanza de reducir y solucionar los efectos del cambio climático. Sin embargo, el cambio climático también afecta directamente a las renovables: el aumento de la temperatura terrestre y la mayor presencia de partículas en suspensión y aerosoles en la atmósfera disminuyen la eficiencia y rendimiento de las placas solares, las variaciones en la velocidad y dirección del viento disminuyen la eficiencia de los aerogeneradores y las fuertes sequías disminuyen el rendimiento de las centrales hidroeléctricas (Barral, 2020). La comunidad científica continúa arrojando luz sobre el problema del cambio climático e intenta buscar soluciones con el apoyo de los gobiernos. Aunque estos últimos son los principales encargados de proteger legalmente a las energías renovables e impulsarlas.

A nivel mundial la Unión Europea es el continente que más está invirtiendo para el desarrollo de las energías renovables como una forma de luchar contra el cambio climático y sus efectos. Como bien se muestra en la tabla 1 la producción de electricidad con fuentes renovables se ha triplicado en los últimos 20 años mientras que la producción con combustibles fósiles y petróleo se ha reducido a la mitad (Eurostat, 2021).

Otro dato importante de la tabla 1 es que la Unión Europea produjo en 2019 casi un tercio de su electricidad total a partir de renovables. De estas fuentes renovables la solar fotovoltaica fue la tercera que más produjo, pero fue la que experimentó el mayor aumento de producción desde 1990 a 2019.

Tabla 1. Producción bruta de electricidad por combustible en la UE entre 1990 y 2019. Fuente: Eurostat.

Unidades: GWh	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Total	2275046	2408653	2656927	2917664	2980976	2900616	2904012
Combustibles fósiles sólidos	794919	775906	800340	808882	701230	705029	450935
Gas natural	187563	204622	331482	515570	590110	396339	569284
Petróleo y productos petrolíferos (excluida la parte del biocombustible)	189523	213006	172850	137435	82090	63295	51954
Renovables y biocombustibles	319775	374153	435915	476990	682003	883818	1005272
Hidro	301519	346647	379103	340546	401280	363238	345265
Geotérmica	3226	3478	4785	5398	5602	6614	6726
Eólica	769	3677	21276	68095	139842	263205	367115
Solar térmica	0	0	0	0	761	5593	5683
Solar fotovoltaica	16	46	113	1459	22463	95265	120035
Oceánica	503	507	507	481	476	487	499

Biocombustibles sólidos primarios	10925	14952	19767	40584	64982	72046	80721
Nuclear	729114	791857	859930	916081	854470	786676	765338

Por lo tanto este aumento en la producción hace pensar que la energía solar fotovoltaica es más fiable que hace unos años atrás y por eso los países están apostando con fuerza por este tipo de energía. El origen de esta forma de producir electricidad fue a finales de los años cincuenta cuando se inventó la primera celda solar capaz de alimentar un dispositivo eléctrico, su principal componente era el silicio y tenía una eficiencia del 2% (Grupo JAB, 2018). Es en esta celda solar donde se produce el efecto fotoeléctrico, provocado por la luz solar, en el cual se liberan electrones que generan una corriente eléctrica (Acciona, n.d.).

Hoy en día se sigue utilizando el silicio como principal componente para fabricar celdas solares, aunque la eficiencia ha mejorado hasta un 20-25%. Además la media de vida útil de una placa solar suele ser de unos 25 años a pleno rendimiento con un mantenimiento simple de hacer (AutoSolar, 2021). Los equipos fotovoltaicos no tenían estas características hace unos años por lo que los países tenían que hacer grandes desembolsos económicos en proyectos solares que no lograban amortizar energéticamente, por esa razón se prefería apostar por la energía hidráulica, eólica o la biomasa que eran más rentables.

En el caso de España, el tipo de energía renovable que más electricidad neta produjo en 2019 fue la eólica con 54289 GWh, seguida de la hidráulica con 26411, la fotovoltaica con 9326 y la biomasa con 2903 de acuerdo con el gráfico de la figura 1.

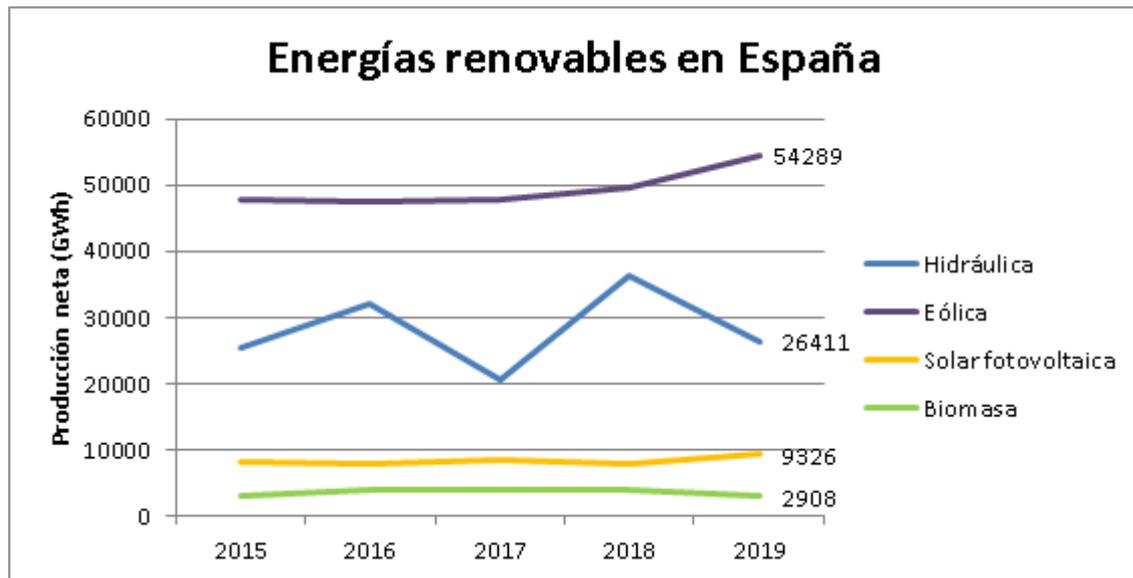


Figura 1. Producción de energías renovables en España entre 2015 y 2019. Fuente: Eurostats. Elaboración propia

España es un país que cuenta con un alto potencial de recursos renovables en su territorio lo que le puede permitir evolucionar hacia un escenario futuro de cero emisiones. Sin embargo, no todo es positivo ya que dos de las fuentes renovables utilizadas por la industria energética española están disminuyendo y es debido a la sequía y a las precipitaciones irregulares. Por un lado, las centrales hidroeléctricas tienen una producción eléctrica muy irregular y por otro las centrales de biomasa cada vez generan menos, ya que reciben menos materia para producir energía debido a una reducción de la productividad de los cultivos agrícolas y forestales orientados a la producción de biomasa (Solaun & Cerdá, 2019). Estos problemas hídricos están incentivando a que las empresas energéticas y la administración estén valorando otras fuentes renovables como son la energía eólica y la energía solar fotovoltaica. En un principio, España se decantó por la energía eólica como alternativa y empezó a construir la

infraestructura necesaria para conseguir consolidarla y que fuera rentable. En sentido opuesto, la energía fotovoltaica ha tenido mucho menos desarrollo aunque España sea un país con una gran cantidad de horas de sol. En 2019 España tenía unos 25515 GW de capacidad eléctrica instalada en infraestructura eólica y tan solo alrededor de 8887 GW de capacidad en infraestructura solar fotovoltaica, comparativamente la energía solar está muy por debajo de la eólica (Eurostat, 2021). En la actualidad la bajada de los precios de las placas solares está provocando que el acceso a la energía solar fotovoltaica sea más asequible y empresas así como particulares puedan instalar sus propios sistemas fotovoltaicos. Esto les permite un ahorro económico considerable, especialmente ahora que los precios de la electricidad en España están subiendo a valores desorbitados. Si se observa la tabla 3 elaborada por la Organización de Consumidores y Usuarios (OCU) se podrá ver claramente el incremento en el precio de la factura de la luz en España, con una subida de 42,77 € en un año natural.

Tabla 2. Evolución de la factura mensual de la luz en España desde agosto de 2020 a octubre de 2021. Fuente: OCU

Factura mensual de electricidad (PVPC)	
Mes	Precio (€/mes)
Octubre 2021 (provisional)	100
Septiembre 2021	87,40
Agosto 2021	78,30
Julio 2021	72,20
Junio 2021	68,81
Mayo 2021	70,55
Abril 2021	70,73
Marzo 2021	62,25
Febrero 2021	55,22
Enero 2021	69,88
Diciembre 2020	60,96
Noviembre 2020	60,33
Octubre 2020	57,23
Septiembre 2020	58,97
Agosto 2020	56,57

Uno de los impactos indirectos de este incremento en la factura de la electricidad fue un periodo de inflación donde los precios de los bienes de consumo subieron progresivamente a lo largo del año.

Si se observa el gráfico de la figura 2 se podrá ver el incremento mensual del IPC en un periodo de doce meses. En un año natural el IPC de alimentos y bebidas no alcohólicas aumentó 1,87 puntos.

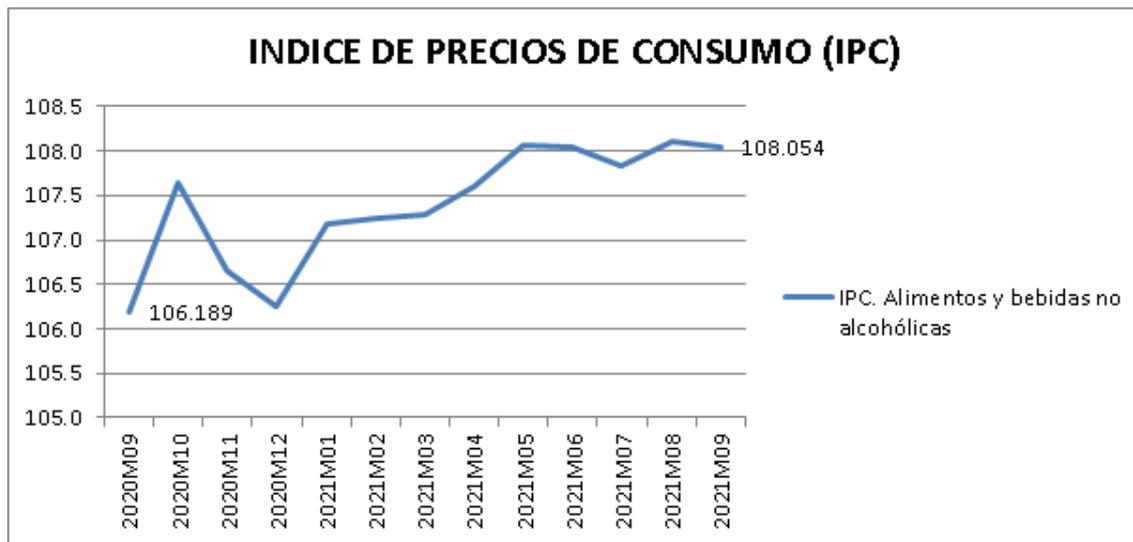


Figura 2. Evolución del IPC en España desde septiembre de 2020 a septiembre de 2021. Fuente: INE. Elaboración propia.

Al mismo tiempo el consumo doméstico de electricidad es mayor ya que cada vez hay más aparatos eléctricos en las casas y eso conlleva a un gasto más elevado. En general, esto está agrabando la brecha económica entre los ciudadanos, también está empeorando la calidad de vida de muchos de ellos y las desigualdades sociales se hacen más notorias.

Ante esta tesitura una de las soluciones más viables sería el autoconsumo energético. Una de las ventajas del autoconsumo es que el consumidor final produce y consume la electricidad que genera por lo que no tiene que comprarla a terceros. Otra ventaja es que la instalación se localizaría muy cerca del consumidor por lo que las pérdidas en el transporte de electricidad serían mínimas. Además este autoconsumo se debe llevar a cabo mediante la utilización de energías renovables para frenar el cambio climático, teniendo en cuenta que las ciudades son uno de los mayores focos de contaminación. Hay países que ya cuentan con proyectos pioneros en este tema y la mayoría utilizan la radiación solar como fuente de energía. En Portugal, el ayuntamiento de Lisboa instaló placas solares en los edificios públicos para que abastecieran a las viviendas de los alrededores. Además también elaboraron una aplicación para calcular la cantidad de electricidad generada por el tejado de un edificio a partir de la energía solar incidente (Lisbon E-Nova, 2019). En 2013, la organización Environment America inició en Estados Unidos un proyecto llamado Shinning Cities que promovía la instalación de placas solares en los tejados de los edificios de las ciudades del país (Environment America Research and Policy Center & Frontier Group, 2020). Un proyecto similar llamado Solar Cities fue iniciado en 2007 por el gobierno de Australia en el cual se pretendía conseguir ciudades energéticamente autosuficientes (Cowley, 2007). En España, en Zaragoza en concreto, se inició en 2021 el proyecto Actur Barrio Solar que consiste en la instalación de placas solares en dos edificios municipales para proporcionar electricidad a las viviendas y comercios de la zona (Zaragoza Noticias, 2011).

A la hora de plantear una forma de convertir un espacio urbano en más sostenible energéticamente, se presenta la cuestión de qué energía renovable podría ser la más económica, accesible y duradera. Los organismos públicos han optado por la energía solar fotovoltaica como forma de producir electricidad en las ciudades porque es la energía renovable más adecuada y cuya instalación se puede realizar en el interior del espacio urbano para evitar las pérdidas en el transporte. En general, en un espacio urbano no se puede construir una central hidroeléctrica, ni una central de biomasa, ni una planta nuclear, ni un parque eólico, debido a que es un espacio habitado por personas, con escasez de suelo libre y sin la presencia de recursos hídricos en la mayoría de los casos. Pero por otro lado, las ciudades cuentan con millares de edificios lo que significa millones de metros cuadrados de tejado para la insta-

lación de paneles fotovoltaicos. Además se pueden diseñar paneles solares con tamaños reducidos que se pueden adaptar a muchas tipologías de tejados diferentes. También, su instalación y mantenimiento es sencillo, y producen electricidad constante siempre que reciban radiación solar, que es el tipo de fuente más común en las ciudades. Por consiguiente, Zaragoza es una ciudad con un gran potencial para desarrollar un modelo energético de autoconsumo basado en la energía solar fotovoltaica.

Teniendo en cuenta este contexto, esta investigación tiene por objetivos:

- Identificar las zonas de tejados adecuadas para la instalación de sistemas fotovoltaicos teniendo en cuenta la orientación y pendiente.
- Valorar cómo afecta la complejidad del tejido urbano a la distribución de la radiación solar.
- Analizar cómo afectan los obstáculos en los tejados a la cantidad de radiación solar.

Para abordar estos objetivos se ha elaborado este trabajo que está organizado de la siguiente manera: un marco legal, una descripción de la metodología y los datos utilizados, un análisis de los resultados obtenidos y una conclusión.

2. MARCO LEGAL

Los gobiernos de muchos países durante los últimos años han creado y ejecutado normativas relacionadas con el sector energético para regular la producción, el transporte y el consumo de energía teniendo en cuenta la conservación de los ecosistemas terrestres, la disminución de la contaminación y el desarrollo sostenible de la actividad humana. Este marco legal va a recoger aquellas normativas vigentes en Europa y España.

A nivel europeo desde 2018 el apoyo a la electricidad procedente de energías renovables en los Estados miembros de la UE se rige por la Directiva 2018/2001 que sustituye a la anterior Directiva 2009/72/CE.

Según esta directiva, los Estados miembros están obligados a fomentar la energía procedente de fuentes renovables. Además establece una serie de normas sobre las ayudas financieras, los procedimientos administrativos y la cooperación entre Estados miembros para implantar y usar fuentes de energía renovables en sus territorios (Directiva (UE) 2018/2001, 2018).

En cuanto a España, la figura 3 muestra la legislación fotovoltaica vigente en el año 2021. Se distinguen tres tipos de sistemas: Sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA), centrales fotovoltaicas (CFV) y sistemas de autoconsumo (SFCA), y según el sistema fotovoltaico instalado se aplicará un tipo de normativa u otra. Este trabajo está centrado en la parte aplicable al autoconsumo.

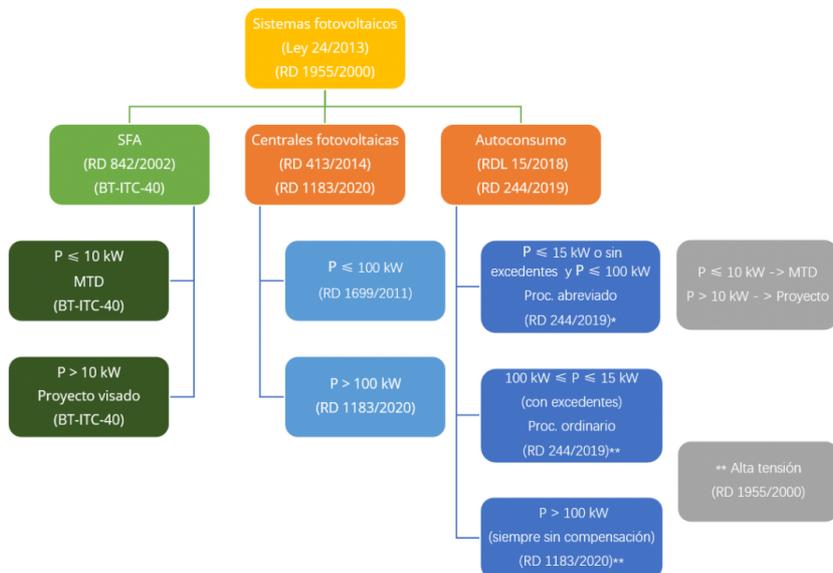


Figura 3. Esquema de la legislación española aplicable en energía fotovoltaica. Fuente y elaboración: Censolar

Comenzando por la normativa común a los tres tipos de sistemas, primero está la Ley 24/2013, de 26 de diciembre de 2013, del Sector Eléctrico reemplazando a la Ley 54/1997, de 27 de noviembre. El contenido de esta Ley se encuentra a su vez redactado en diferentes reales decretos, sobre todo en el Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre. Esta ley se adapta a los cambios experimentados en los últimos años en el mercado eléctrico español y se encarga de defender y promover las tecnologías de generación de electricidad basadas en fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos. También estipula que todos los consumidores tendrán derecho al acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica en el territorio nacional. En su contenido se destacan el artículo 9 relacionado con el autoconsumo y los artículos 13 y 14 relacionados con la retribución para producir energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración de alta eficiencia y residuos, como aquellos que están más directamente vinculados a la temática del proyecto (Ley 24/2013). Otra norma común a los tres tipos de sistemas es el Real Decreto 1955/2000 que tiene por objeto establecer el régimen jurídico aplicable a las actividades de transporte, distribución, comercialización y suministro de energía eléctrica y a las relaciones entre los distintos sujetos que las desarrollan, estableciendo las medidas necesarias encaminadas a garantizar este servicio esencial a todos los consumidores finales (Real Decreto 1955/2000). Las dos normas anteriores fijan un marco legal para la actividad de autoconsumo a la que afectan directamente dos normativas que son el Real Decreto-ley 15/2018 y el Real Decreto 244/2019 (Soria, 2021)

Según lo redactado en el artículo 9 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, el autoconsumo se define como el consumo de energía eléctrica proveniente de instalaciones de generación conectadas en el interior de una red de un consumidor o a través de una línea directa de energía eléctrica asociadas a un consumidor. Este artículo se amplía mediante el Real Decreto 244/2019 que recoge una serie de contenidos.

Este Real Decreto hace una clasificación de las modalidades de autoconsumo existentes las cuales pueden ser con excedentes en la cual la energía sobrante se inyecta a la red, en este caso los productores pueden recibir una retribución por los excedentes. Y la otra es sin excedentes en la cual la energía sobrante no se inyecta a la red. Además a estos tipos hay que añadirles la posibilidad de ser autoconsumo individual, disfrutado por un consumidor, o autoconsumo colectivo, disfrutado por varios consumidores.

También describe las características de los diferentes sistemas de autoconsumo que legalmente se pueden instalar además de los requisitos que deben de cumplir. Cada tipología de autoconsumo tiene sus propios requisitos. Además también contiene las sanciones que se aplicarán sobre aquellas personas que instalen un sistema de autoconsumo y no cumplan con lo establecido en el Real Decreto 244/2019 (Real Decreto 244/2019).

Otra norma a tener en cuenta en el autoconsumo es el Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores. Ante un proceso de descarbonización, subida del precio de la electricidad y aumento del consumo eléctrico en los hogares, este Real Decreto tiene por objetivo fijar medidas de implantación del autoconsumo renovable. Con esto se pretende abordar la pobreza energética, mejorar las condiciones ambientales y reducir la importación de hidrocarburos en España (Real Decreto-ley 15/2018).

Estas normativas están fundamentadas en los objetivos básicos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Ante esto, el gobierno de España pretende con esta legislación impulsar y proteger el crecimiento de la energía fotovoltaica y a su vez incentivar al ciudadano a optar por el autoconsumo y de esta forma desarrollar un modelo energético más sostenible y económico para el país.

3. METODOLOGÍA Y DATOS

En el esquema de la figura 4 se muestra el proceso lógico de transformación de los datos y las operaciones necesarias para alcanzar los objetivos del trabajo.

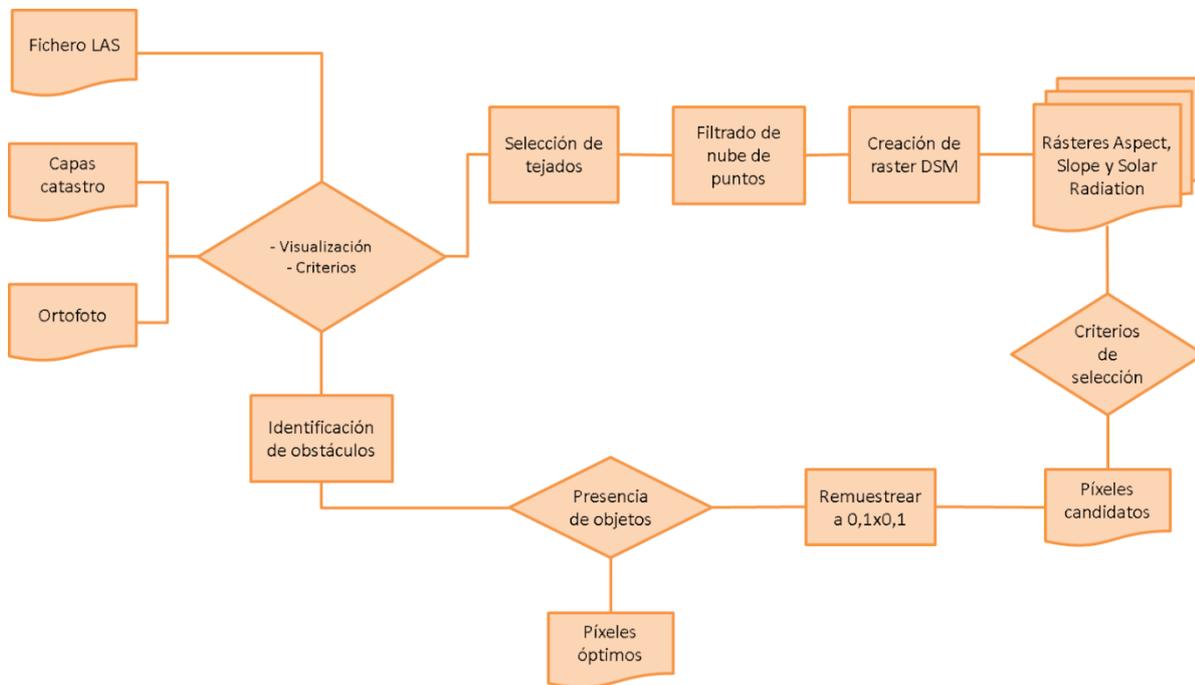


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología del trabajo.

3.1. Área de estudio

Este trabajo se ha aplicado en sectores de tres distritos de la ciudad de Zaragoza (España): Actur-Rey Fernando, Casco Histórico y Casablanca, que se muestran destacados en rojo en la figura 5. En cada uno de ellos se han seleccionado varias parcelas de edificios. Las parcelas del distrito del Actur se localizan en la zona sureste del distrito y se muestran en la figura 7, las parcelas del distrito del Casco Histórico se localizan en el barrio de San Pablo y se muestran en la figura 8, y las parcelas del distrito de Casablanca se localizan en el barrio de Valdespartera y se muestran en la figura 6.

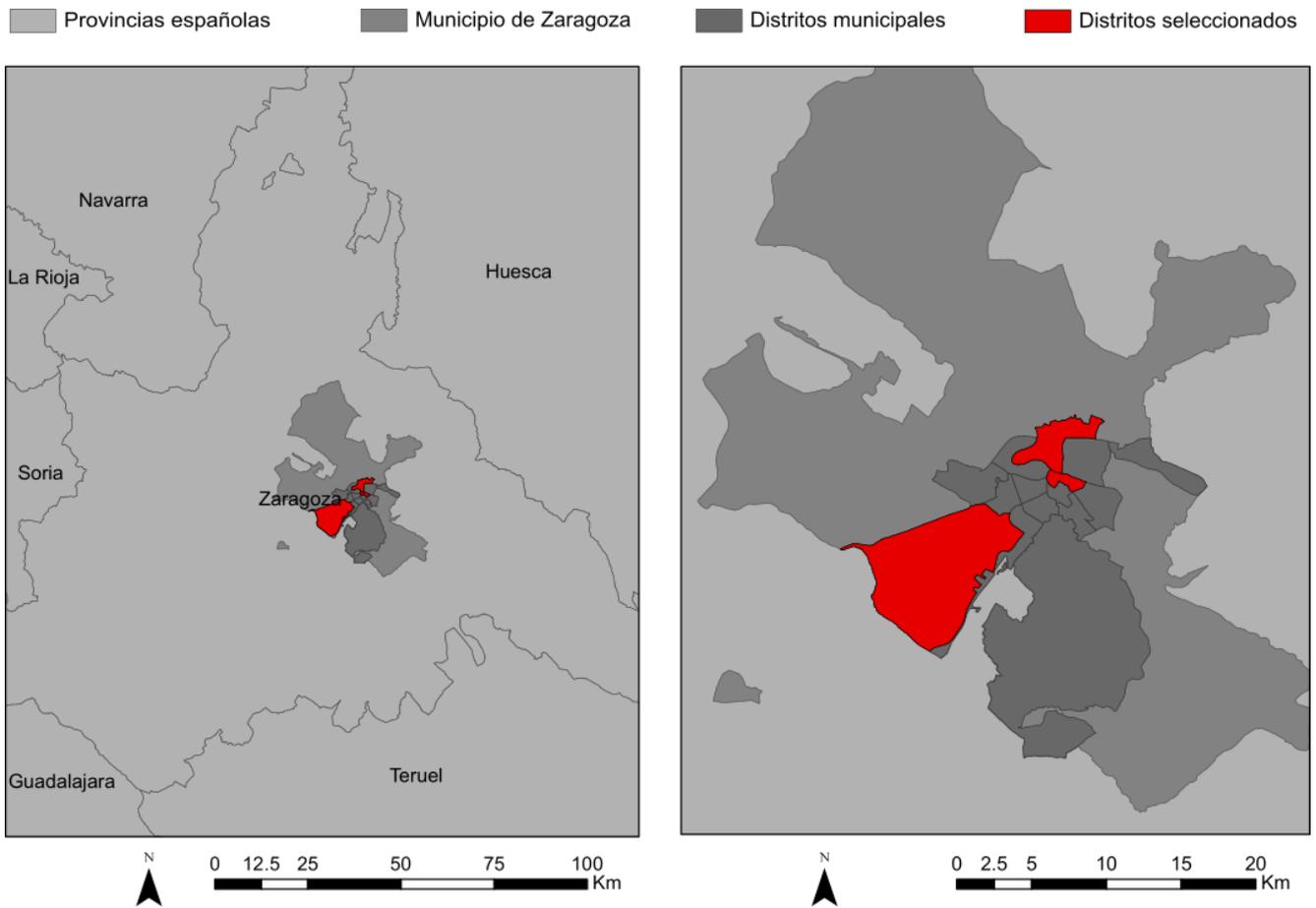


Figura 5. Mapa a escala provincial junto con un mapa a escala municipal destacando la localización de los tres distritos de estudio de la ciudad de Zaragoza.

Zona de estudio del Valdespartera

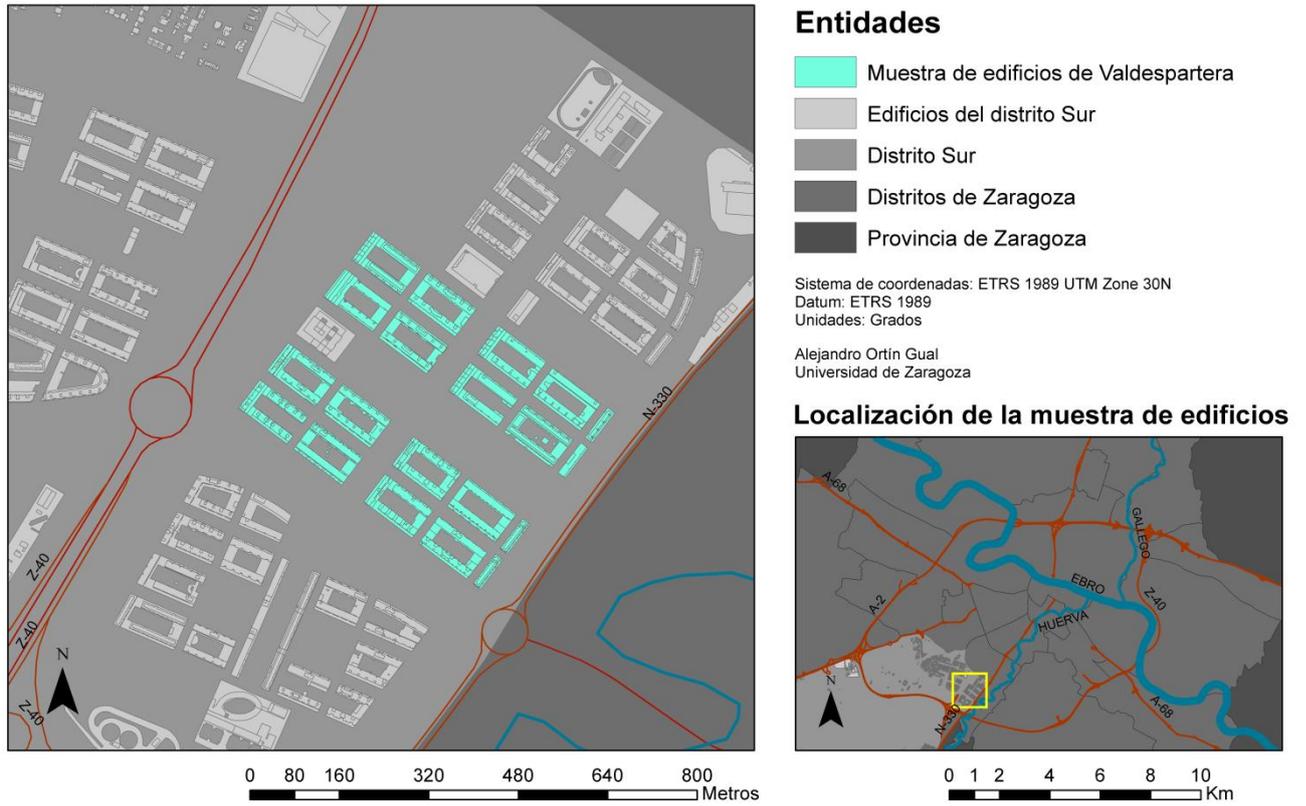


Figura 6. Mapa de la zona de estudio de Valdespartera a escala distrital y destacando la muestra de edificios seleccionada.

Zona de estudio del Actur



Entidades

- Muestra de edificios del Actur
- Edificios del distrito Actur
- Distrito Actur-Rey Fernando
- Distritos de Zaragoza
- Provincia de Zaragoza

Sistema de coordenadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N
Datum: ETRS 1989
Unidades: Grados

Alejandro Ortín Gual
Universidad de Zaragoza

Localización de la muestra de edificios

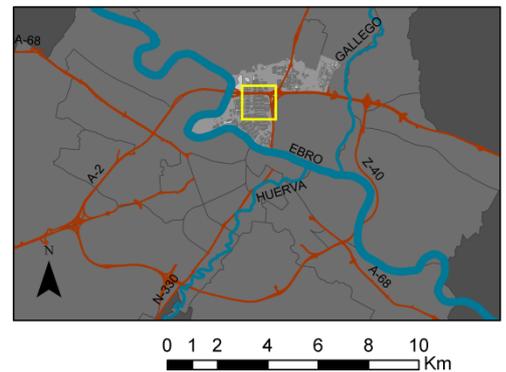


Figura 7. Mapa de la zona de estudio del Actur a escala distrital y destacando la muestra de edificios seleccionada.

Zona de estudio del San Pablo

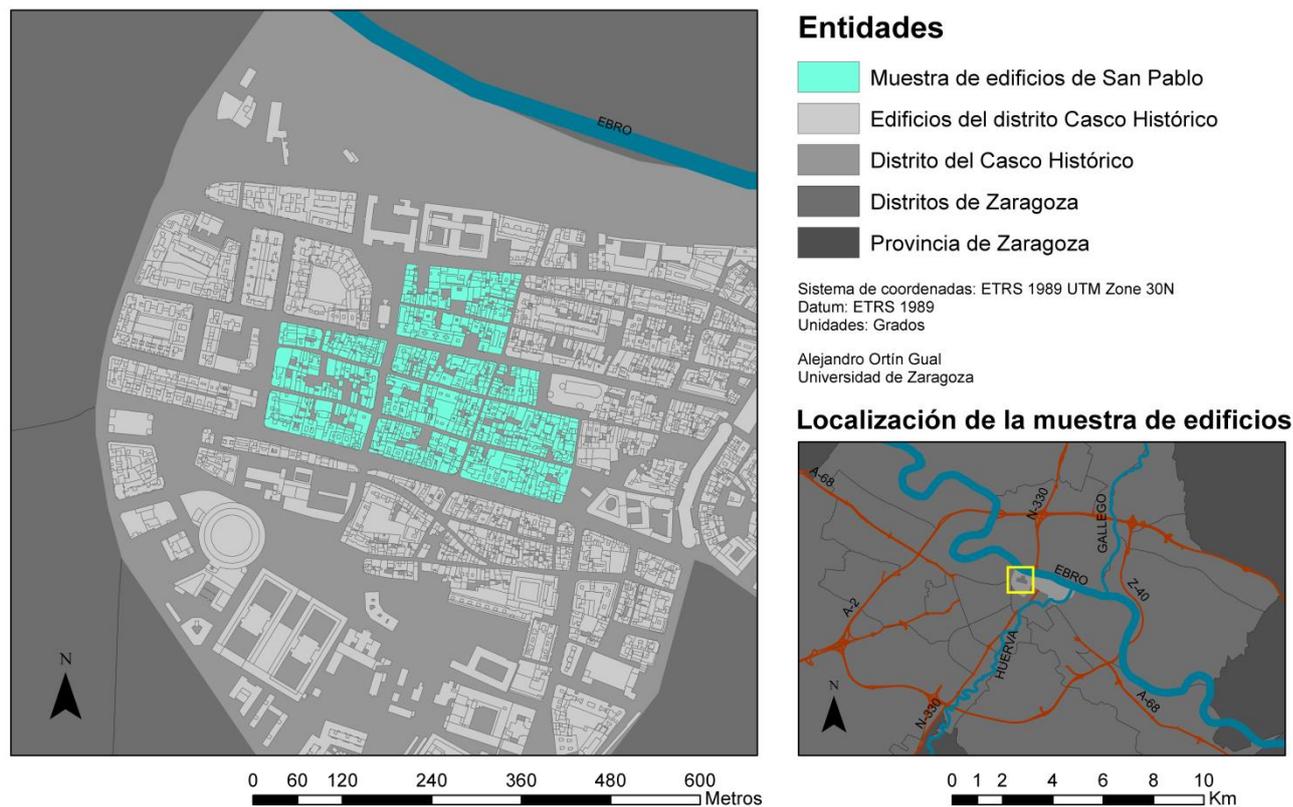


Figura 8. Mapa de la zona de estudio de San Pablo a escala distrital y destacando la muestra de edificios seleccionada.

Cuando se escogieron estas áreas representativas se prestó mucha atención a que tuvieran un grado de desigualdad en los siguientes aspectos: Altura de los edificios, características de los tejados, tipología de edificio, densidad de edificios por hectárea y entramado urbano. Para ello los edificios debían de pertenecer a diferentes tipologías de tejido urbano los cuales fueron construidos en distintas épocas. De esta forma se podría llegar a comparar los resultados obtenidos en el análisis de cada área y ver cómo en realidad condicionan esos aspectos a su potencial para producir energía solar fotovoltaica.

El barrio de San Pablo es el más antiguo de los tres, empezó a ser construido en el siglo XIII y planificado de forma regular en el siglo XIV (Zaragozago, n.d.). En este barrio la tipología de edificios que predomina son las viviendas en edificio plurifamiliar entre medianeras, es decir, bloques de viviendas individuales agrupados en manzanas (Trujillano,n.d.), los cuales pueden presentar diferentes tipos de tejado a distintas alturas. Se caracteriza por tener un entramado urbano cerrado, dando lugar a una disposición compacta de edificaciones.

El barrio del Actur se empezó a construir en el año 1970 y en los años 80 se amplió con la construcción de centros comerciales y un campus universitario (Actur- Rey Fernando, n.d.). La tipología de edificio predominante en este barrio son las viviendas en edificio plurifamiliar aislado, como las urbanizaciones (Trujillano,n.d.). En este caso el bloque de viviendas tiene el mismo estilo de tejado. Se caracteriza por tener un entramado urbano más abierto que cerrado. Una razón por la que se seleccionó este barrio fue porque a principios del 2021 se inició el proyecto ‘Barrio Solar’ llevado a cabo por EDP y ECODES como un proyecto pionero en España que permitirá a los vecinos y comercios de este barrio aprovechar la energía solar generada en edificios municipales. Este proyecto consta de la instalación de dos plantas fotovoltaicas de 50 kWp en las cubiertas de los centros deportivos municipales Siglo XXI y Actur V para el autoconsumo colectivo (Zaragoza Noticias, 2011).

El barrio de Valdespartera es el más moderno de los tres, el cual empezó a construirse en el 2001. Se trata de un barrio donde predominan las viviendas en edificio plurifamiliar aislado, al igual que en

el Actur, donde cada edificio tiene el mismo estilo de tejado (Trujillano,n.d.). Se caracteriza por un entramado urbano abierto, donde los edificios se localizan de manera aislada con mucha separación entre ellos. Además se escogió el barrio de Valdespartera por ser un barrio diseñado de forma sostenible y construido bajo criterios bioclimáticos.

Estos principios de la arquitectura bioclimática favorecen en gran medida la utilización de energía solar, tanto térmica como fotovoltaica, implementando: Una ordenación urbanística basada en una orientación de los edificios para favorecer la captación solar y un diseño arquitectónico de los edificios con unas condiciones específicas como pueden ser la exigencia de cubiertas planas para la colocación eficaz de paneles solares, el diferente tratamiento de fachada según orientación de la misma y la colocación de galerías acristaladas en las fachadas sur que sirvan como colectores pasivos de calor (Portero & Vela, 2013).

Por el contrario, estas zonas de estudio debían ser similares en un aspecto y ese era el tamaño de sus áreas, porque así se podían analizar en igualdad de condiciones.

- La muestra de estudio del barrio del Actur con un área total de 112208,39 m². A partir de un filtrado se dejó un área de tejados de 49094,82 m².
- La muestra de estudio del barrio de Valdespartera con un área total de 80843,50 m². A partir de un filtrado se dejó un área de tejados de 49001,73 m².
- La muestra de estudio del barrio de San Pablo con un área total de 58583,17 m². A partir de un filtrado se dejó un área de tejados de 48923,68 m².

Estas zonas de estudio seleccionadas se denominan ‘celdas urbanas’ y también es una técnica que utilizaron los autores Gropi, de Santoli, Cumo y Astiaso (2018) en su trabajo para poder comparar los resultados obtenidos en dos zonas urbanas diferentes: un centro histórico y un nuevo distrito suburbano.

Atendiendo a las características de los tres barrios, la hipótesis que se formuló fue que la zona de estudio de Valdespartera iba a presentar los mejores resultados de radiación posfiltrado, seguida de la zona del Actur y por último la zona de San Pablo.

3.2. Procedimientos

Una vez seleccionadas las áreas de estudio, se realizaron ordenadamente los pasos de la metodología. Es primordial comprender que el propósito es analizar los edificios de cada uno de los distritos en igualdad de condiciones para posteriormente comparar los resultados y saber cómo sus características arquitectónicas afectan a la pendiente y orientación de los tejados y especialmente a la radiación solar que incide sobre ellos. Como se ha mencionado anteriormente no fue necesario trabajar con todos los edificios, sino que fue suficiente con una muestra, por eso se delimitaron unas celdas urbanas a partir de una capa vectorial del catastro que contenía las partes de los edificios de la ciudad de Zaragoza.

Al utilizar celdas urbanas para la obtención de la muestra de edificios, se pudo reducir el número de edificios a un área específica mediante la selección de aquellos relevantes y que cumplieran con una serie de requisitos de uso, estructura y tipología. De esta forma fue más sencillo aplicar la metodología, hubo un menor coste computacional y las operaciones fueron más rápidas. Una vez creadas, fue importante conocer que no todos las entidades contenidas en las celdas se correspondían a tejados de edificios, sino que representaban las diferentes partes de un bloque de viviendas. Por esa razón, se pasó a seleccionar los polígonos que verdaderamente se correspondían a tejados, para ello se aplicaron una serie de criterios:

- Los edificios tenían que ser de uso residencial principalmente.
- Las partes seleccionadas tenían que tener un número de pisos determinado, para cumplir con la altura real del tejado, ya que algunas partes correspondían a patios o terrazas de planta baja.
 - En el barrio del Actur se seleccionaron aquellas que tenían 5 o más pisos.

- En el barrio de Valdespartera se seleccionaron aquellas que tenían 5 o más pisos.
- En el barrio de San Pablo se seleccionaron aquellas que tenían 2 o más pisos.
- Los tejados se encuentran en una zona y a una altura donde no se proyectan sombras sobre ellos de árboles o de otros edificios, aunque en algunos casos en el barrio de San Pablo esta norma no se cumple.
- Las tres celdas tenían que tener aproximadamente la misma extensión en metros cuadrados de tejados.

Se realizó la visualización de los edificios como un modelo 3D en ArcGIS mediante un método llamado extrusión en el cual cada parte del edificio era alzada según el número de pisos que tenía (Universidad Politécnica de Valencia, 2014). De esta forma se podían identificar visualmente las partes que efectivamente correspondían a tejados y además facilitó la identificación de aquellos edificios residenciales que tenían sus tejados por encima del resto y lo más probable era que no tuvieran sombras proyectadas sobre ellos.

Después de la aplicación de estos criterios y del filtrado, las muestras de tejados resultantes de Valdespartera, del Actur y de San Pablo se exponen en las figuras 9, 10 y 11.

Zona de estudio del Valdespartera

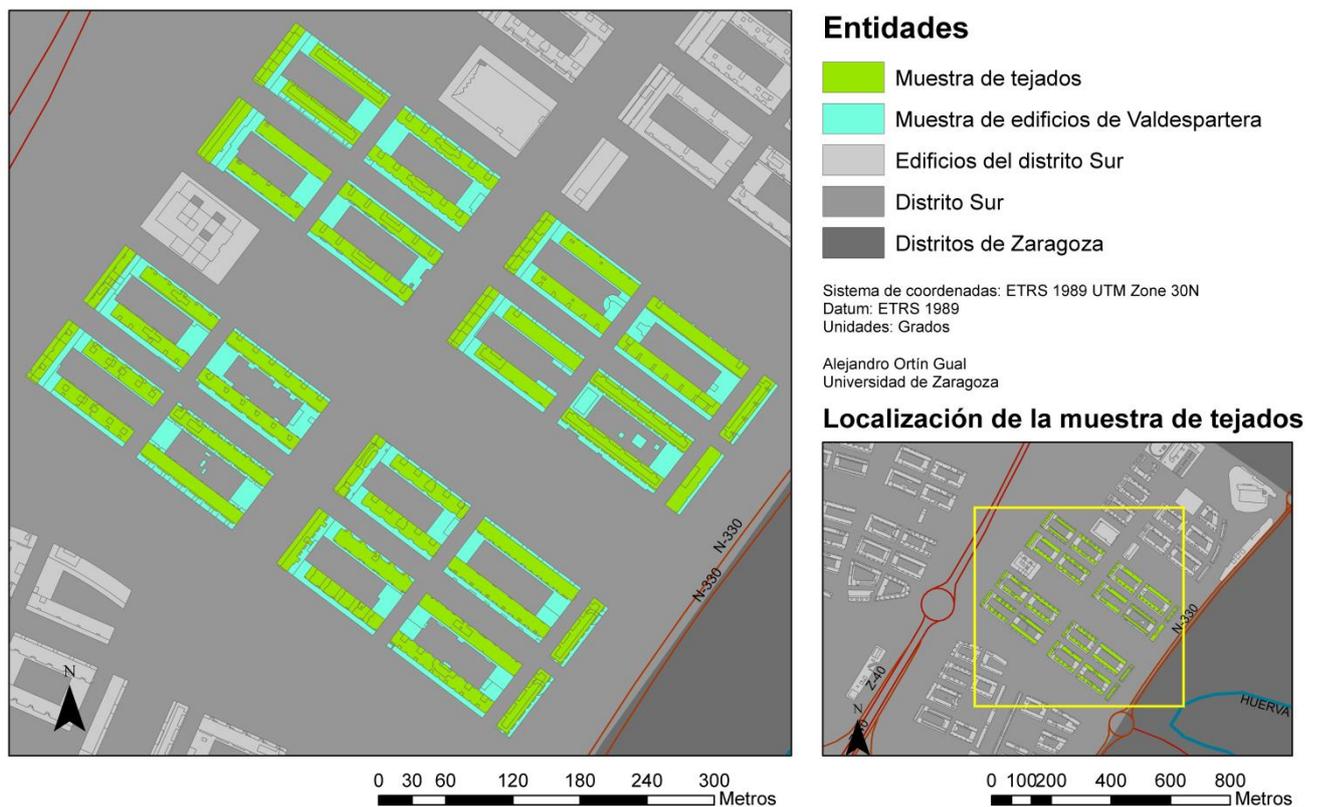


Figura 9. Muestra de tejados de la zona de estudio Valdespartera.

Zona de estudio del Actur

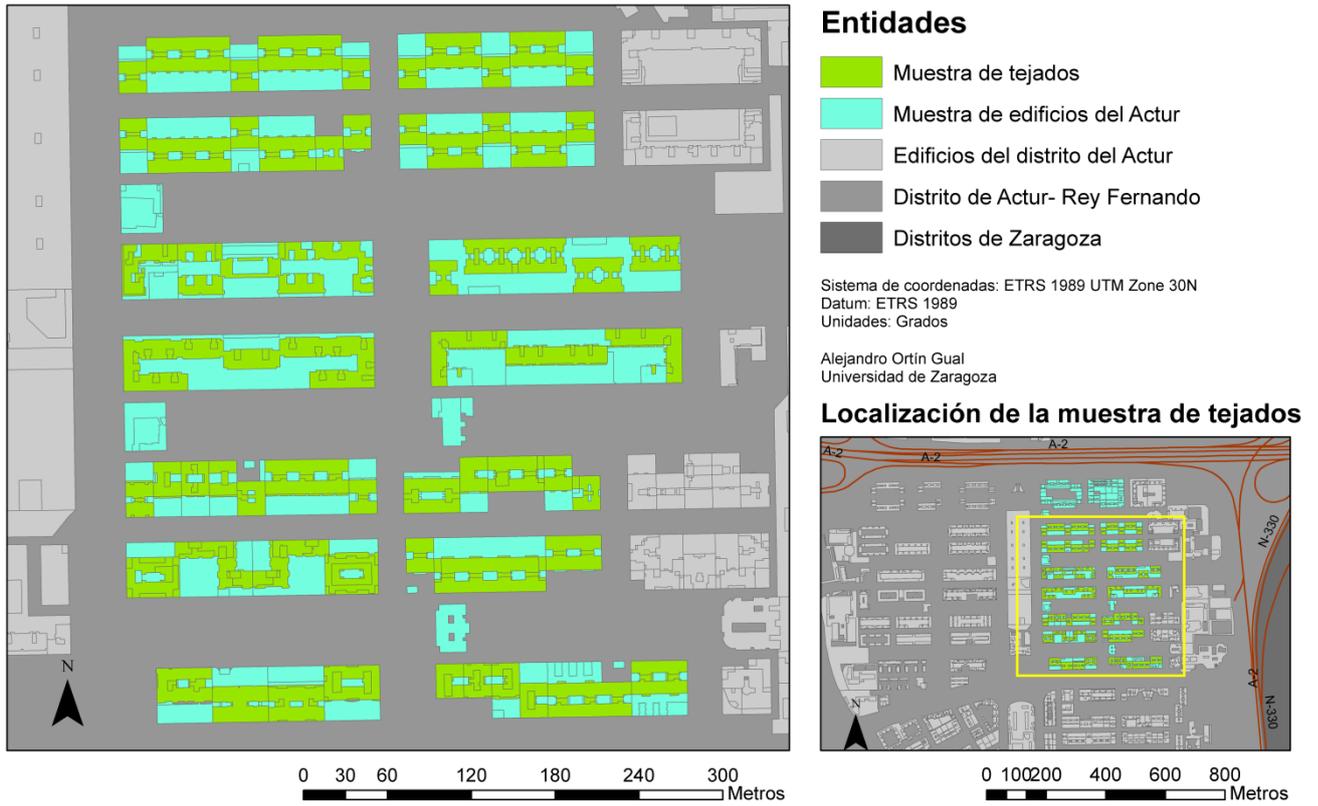


Figura 10. Muestra de tejados de la zona de estudio del Actur.

Zona de estudio de San Pablo

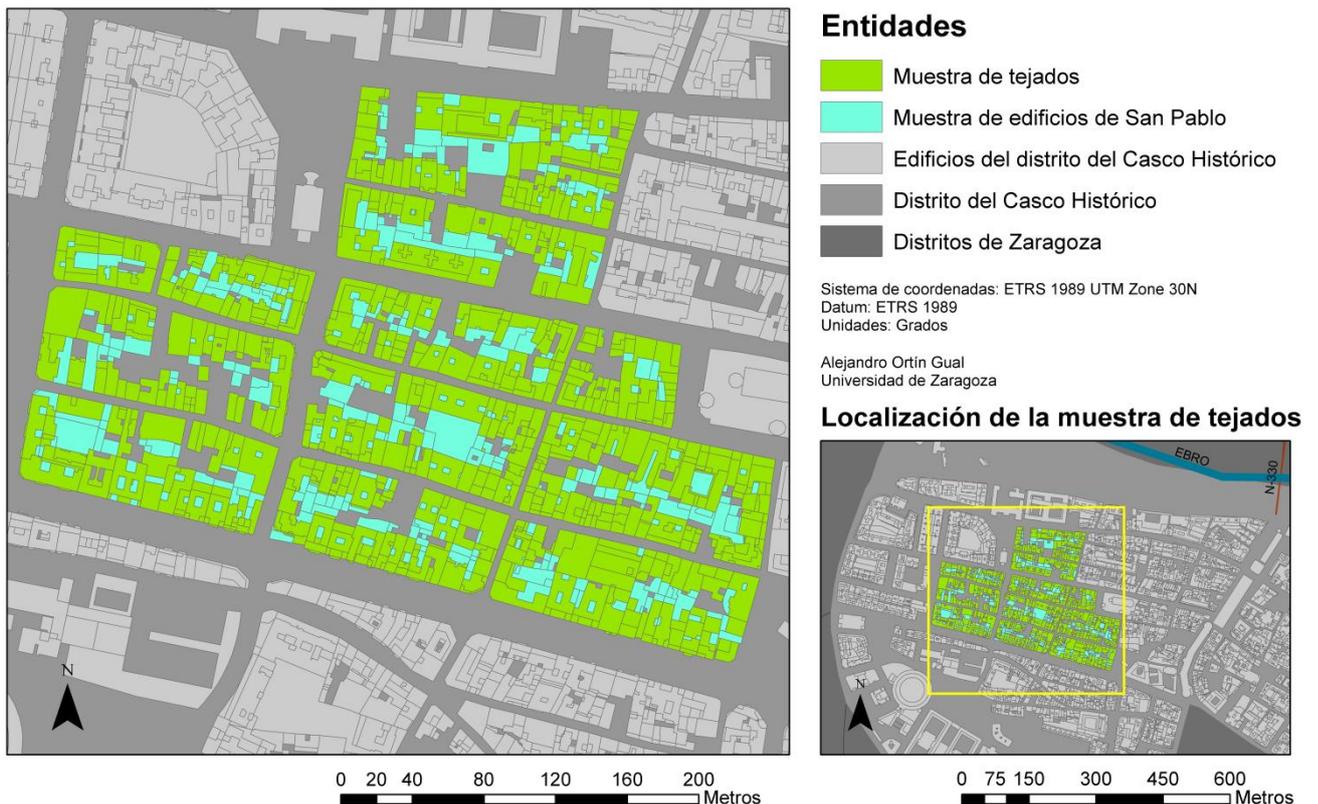


Figura 11. Muestra de tejados de la zona de estudio de San Pablo.

Una vez seleccionados los tejados del área de estudio, se prosiguió con la búsqueda de un método que pudiera encontrar los obstáculos localizados en esos tejados. Esta parte es fundamental ya que los obstáculos limitan el área disponible para la colocación de paneles fotovoltaicos.

En primer lugar se generó un modelo 3D de la misma manera como se hizo en el paso de selección de tejados, pero lamentablemente no era un método efectivo para la identificación de los elementos presentes en los tejados, como antenas, chimeneas o posibles paneles solares, ya que no estaban digitalizados en las capas del catastro. Por esa razón se pensó en aplicar técnicas que utilizaban datos LiDAR y otras que utilizaban imágenes de alta resolución espacial, como la ortofoto del PNOA, para detectarlos.

La técnica que utilizaba los datos LiDAR necesitaba de una densidad de puntos mayor que la que tenía el LiDAR PNOA de la zona de Zaragoza, la cual era de 0,5 puntos/m² (Instituto Geográfico Nacional, n.d.). Con esta densidad tan baja era imposible llegar al grado de detalle necesario para la identificación de los objetos. Los autores Álvarez, Raposo, Miranda y Bello, trabajaron con un archivo LiDAR que tenía una densidad de 4 puntos/m², lo que les permitió elaborar un modelo urbano tridimensional de la ciudad de Lorca (España) que se ajustaba a la realidad con detalle.

Por consiguiente se optó por el método de identificación visual de obstáculos. Para llevarlo a cabo era necesario contar con imágenes satelitales de alta resolución espacial, por lo que se utilizaron ortofotos del PNOA con una resolución espacial de 0,25m. Además estos obstáculos debían de ser identificados en la muestra de tejados seleccionada, por lo que para conseguir esto se superpuso el perímetro de los tejados a la ortofoto y de esta forma se fueron digitalizando uno a uno los obstáculos que se encontraban dentro del perímetro de cada tejado. Este proceso se hizo exclusivamente sobre la muestra de tejados de Valdespartera debido a que contaba con los tejados más regulares y además la densidad de elementos sobre ellos era bastante baja por lo que era más sencillo visualizarlos que en las otras dos muestras. Los elementos registrados fueron: chimeneas, paneles solares ya instalados, y otros elementos, estos últimos englobaban a los elementos cuya tipología no se podía reconocer visualmente. Los obstáculos encontrados se muestran en la figura 12. Este es un método largo y no tiene tanta precisión como otros, pero cumple con el propósito de identificación de obstáculos.

Obstáculos en la muestra de tejados

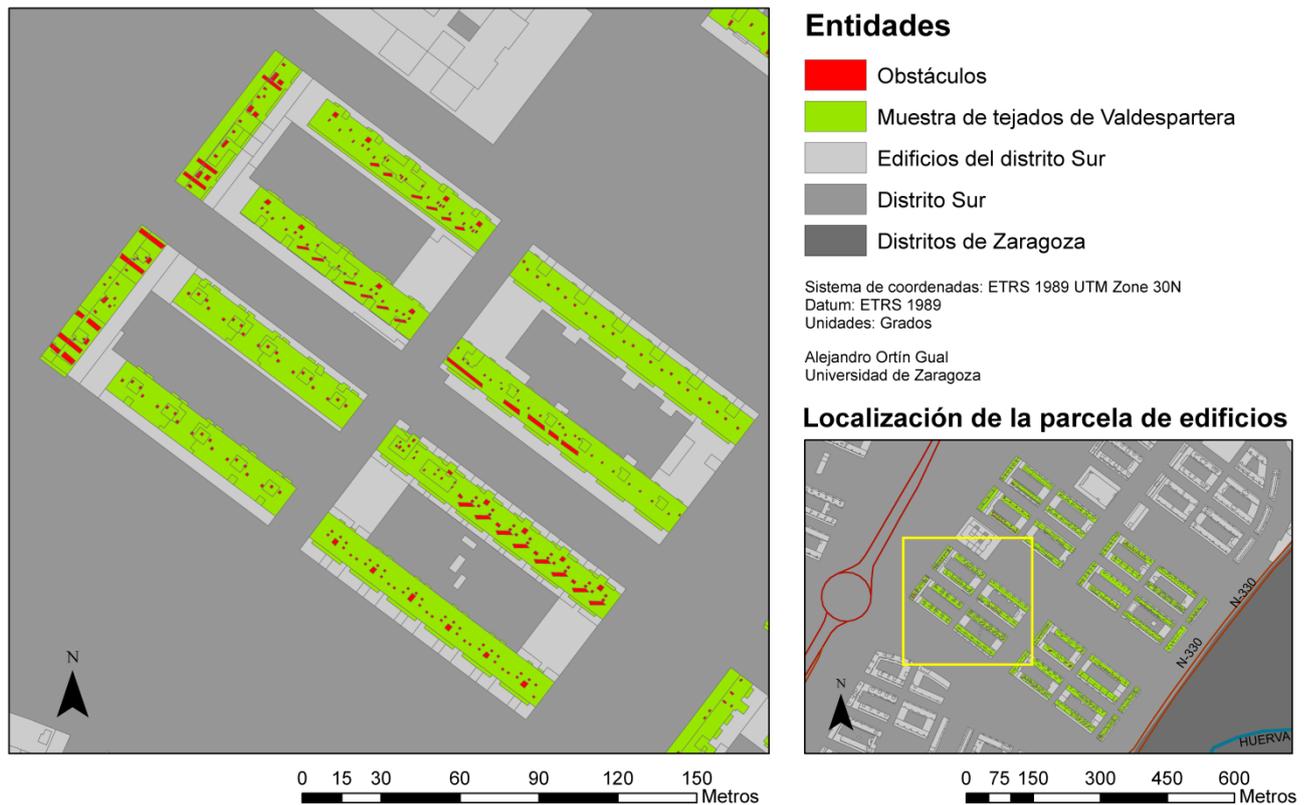


Figura 12. Obstáculos identificados en la muestra de tejados de Valdespartera.

La otra parte fundamental del trabajo era la elaboración de los rásteres de pendiente, orientación y radiación solar de los tejados. A la hora de instalar un sistema de paneles fotovoltaicos existen algunas características que el tejado debe cumplir para que la instalación sea eficiente y tenga un alto rendimiento eléctrico. Estos rásteres se obtuvieron a partir de Modelos Digitales de Superficie (MDS) que posteriormente hubo que filtrar para obtener las zonas de tejado que eran óptimas en orientación, pendiente y radiación solar. El MDS es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno y de los objetos (naturales o antrópicos) localizados sobre ella (Lamelas & Montealegre, 2020).

A la hora de generar el modelo, la disponibilidad de datos LiDAR de la ciudad de Zaragoza fue una gran ventaja. El LiDAR es un sistema de medición y detección de objetos muy preciso en el que una aeronave de prospección emite ráfagas rápidas de láser y registra el tiempo hasta su retorno visual mientras rastrea su ubicación mediante sistemas de posicionamiento global (GPS). Los datos de localización y retorno cronometrado recogidos se procesan posteriormente en datos de puntos localizados geográficamente. En la práctica, el LiDAR es la forma más precisa de medir toda una zona urbana, incluidas las formas detalladas de los tejados y el paisaje (Jakubiec & Reinhart, 2012). La densidad de puntos del LiDAR PNOA de la ciudad de Zaragoza es de 0,5 puntos/m² la cual era suficiente para crear los modelos que se utilizaron en el trabajo. También era importante conocer la separación entre los puntos, ya que sabiendo la separación y la densidad de puntos se pudo ajustar un tamaño de píxel adecuado para el modelo. En el trabajo se optó por generar rásteres con un tamaño de píxel 2x2 de esta forma se estimó que teóricamente habría un punto por cada píxel.

La nube de puntos LiDAR del PNOA estaba contenida en archivos de formato “.las” donde sus puntos ya estaban clasificados, siguiendo los códigos definidos por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS), y tenían alturas ortométricas, que es la altura de la superficie terrestre respecto al geode. Debido a estas características se pudo empezar a trabajar con ellos sin necesidad de hacer ajustes posteriores a la descarga. En el caso de que los datos LiDAR fueran row data se

tendría que hacer una identificación de los valores de la variable z (altura) de los puntos y posteriormente una clasificación en grupos basándose en esos valores. Continuando con el tratamiento de la nube de puntos para la obtención de los modelos digitales, se tuvo en cuenta que los puntos clasificados como ruido (grupo 7) y solapamiento (grupo 12) no debían de ser utilizados por lo que hubo que filtrar la nube antes de hacer cualquier operación. Otro aspecto que se tuvo en cuenta fue la exactitud de los datos, los cuales tenían que ajustarse lo máximo posible a la realidad. Al hacer una superposición de la nube de puntos sobre la ortofoto se pudo comprobar que algunos puntos que deberían corresponder a la clase ‘edificio’ estaban clasificados como ‘vegetación alta’ debido probablemente al parecido en altura. Para solucionar esto, se comprobó que las entidades vectoriales de la capa ‘partes de edificios’ del catastro coincidían con las huellas de puntos clasificadas como edificios, de esta forma se pudo usar esa capa vectorial como límite perimetral para corregir ese fallo en la clasificación de la nube de puntos.

En cuanto a la generación del Modelo Digital de Superficie no fue necesario utilizar todos los puntos LiDAR. Este modelo se calculó utilizando los datos del primer retorno de los puntos de la clase “suelo” y otras clases como por ejemplo vegetación y edificios (Lamelas & Montealegre, 2020). Una vez generados se realizó una observación de cada uno de ellos prestando atención a la altura de los edificios, características de los tejados, tipología de edificio, densidad de edificios por hectárea y entramado urbano (O’Neil-Dunne, 2019).

Modelo Digital de Superficie del barrio de San Pablo



Sistema de coordenadas: ETRS 1989
UTM Zone 30N
Datum: ETRS 1989
Unidades: Grados

0 75 150 300 450 Metros

Altitud de las parcelas de la zona de estudio



Alejandro Ortín Gual
Universidad de Zaragoza

Altitud

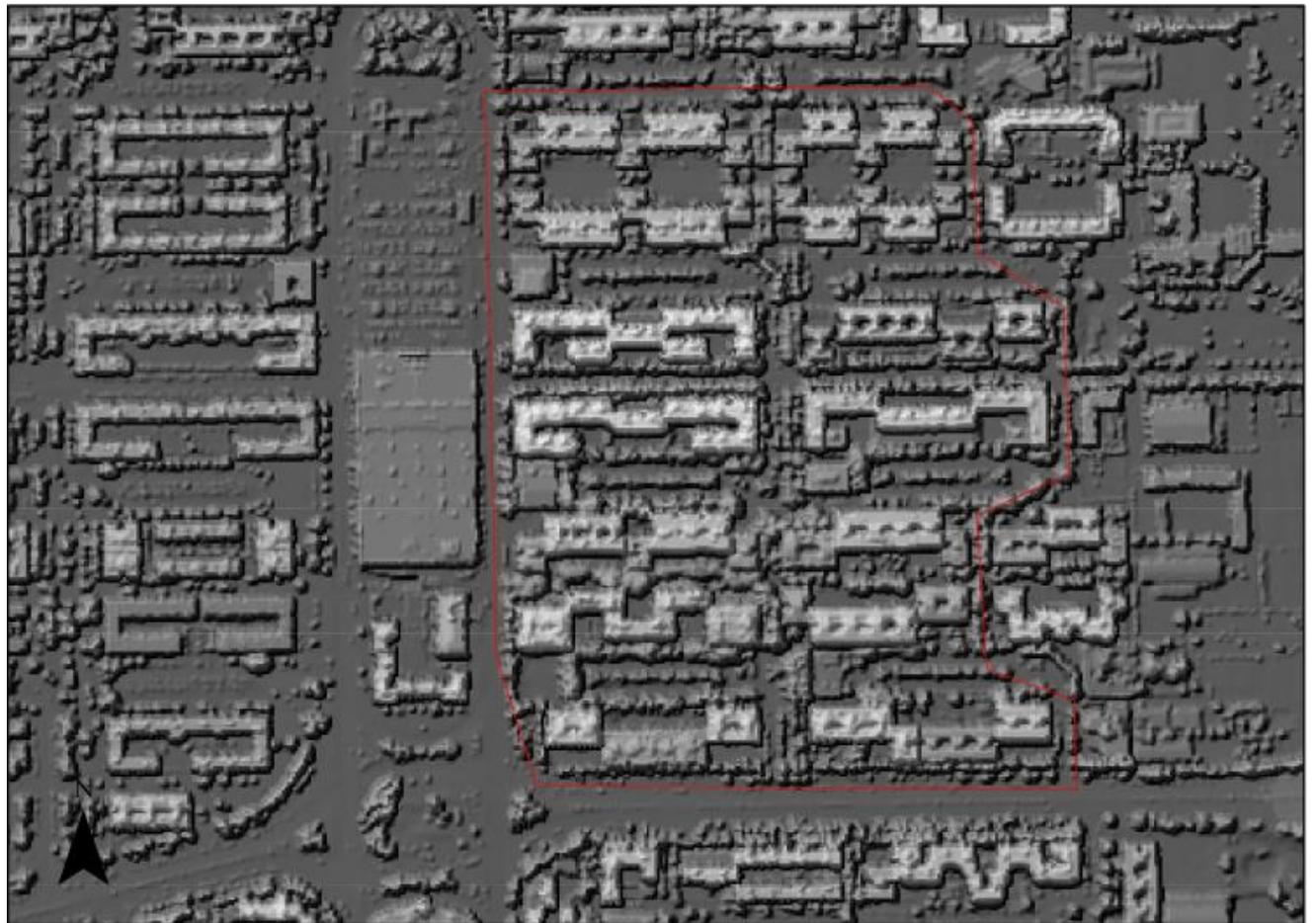
	189,60 m - 197,3 m
	197,31 m - 204,6 m
	204,61 m - 210,8 m
	210,81 m - 216,7 m
	216,71 m - 222,5 m
	222,51 m - 228,4 m
	228,41 m - 234,2 m
	234,21 m - 240,4 m
	240,41 m - 250,7 m
	250,71 m - 283 m

 Perímetro de la zona de estudio

Figura 13. Visualización del MDS de la zona de estudio de San Pablo.

En la representación del modelo digital de superficies del distrito de San Pablo, mostrada en la figura 13, lo que más llama la atención es la heterogeneidad en el tejido urbano. Como bien se comentó anteriormente esta parte de la ciudad forma parte del casco histórico de Zaragoza y está compuesta principalmente por edificaciones independientes unidas por medianeras. Se puede observar el relieve irregular derivado de la diferencia de alturas además de los patios interiores en muchas de las manzanas. El modelo no cuenta con una resolución espacial lo suficientemente alta como para identificar la tipología de tejado, pero se puede intuir que la mayoría tiene cierta inclinación por lo que pueden ser tejados a dos aguas, tejados con una vertiente y tejados a cuatro aguas (Seicorlan, n.d.). Estas características tendrán un gran peso a la hora de filtrar los píxeles por requisitos de pendiente y orientación. A su vez, la falta de homogeneidad entre los edificios seguramente influya en la distribución de la radiación solar.

Modelo Digital de Superficie del barrio del Actur



Sistema de coordenadas: ETRS 1989 0 100 200 400 600
UTM Zone 30N
Datum: ETRS 1989
Unidades: Grados

0 100 200 400 600 Metros

Altitud de las parcelas de la zona de estudio

Alejandro Ortín Gual
Universidad de Zaragoza

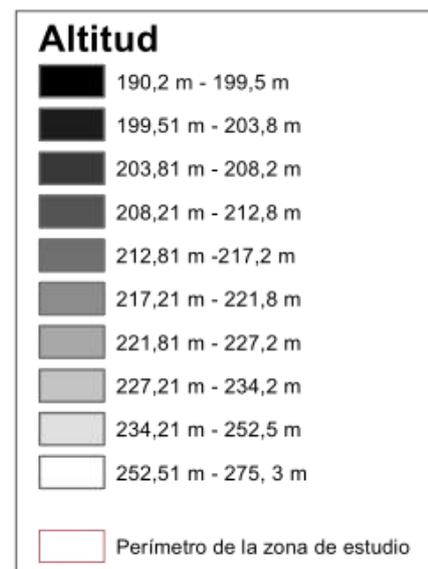
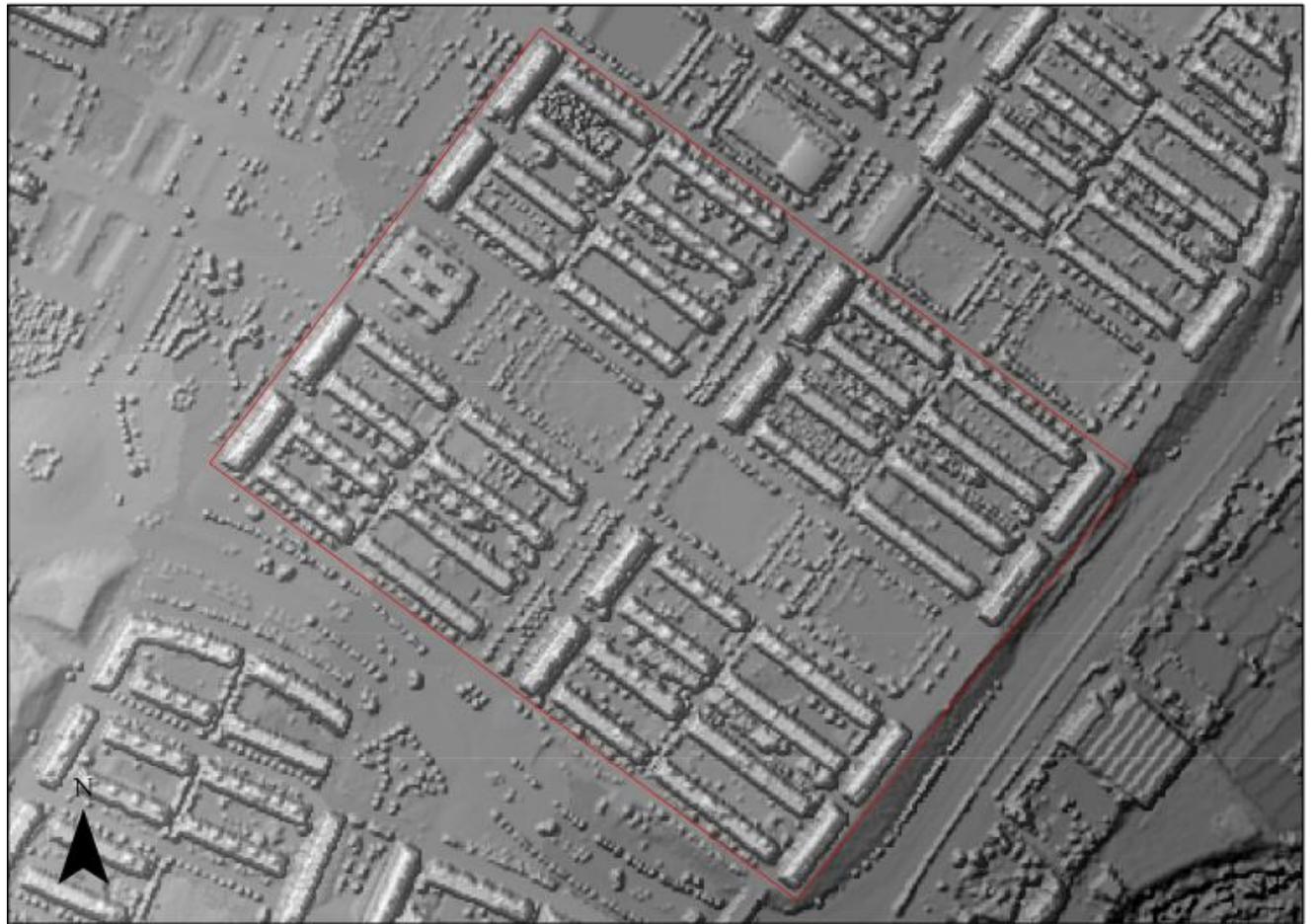


Figura 14. Visualización del MDS de la zona de estudio del Actur.

En la representación del modelo digital de superficies del distrito del Actur, mostrada en la figura 14, se puede observar edificios grandes aislados los cuales tienen una geometría muy irregular con partes que sobresalen e incluso partes que están por encima de otras. También se aprecia una gran presencia de vegetación, mayoritariamente árboles. El modelo no cuenta con una resolución espacial lo suficientemente alta como para identificar la tipología de tejado, pero se pueden distinguir píxeles con distintas tonalidades en la superficie de los tejados que hacen pensar en tejados a dos aguas, tejados con una vertiente y tejados a cuatro aguas o en tejados planos con construcciones en la superficie (Seicorlan, n.d.). En este caso los edificios presentan algo más de homogeneidad que en el caso del distrito de San Pablo por lo que puede que el filtrado de los píxeles por orientación y pendiente sea más leve.

Modelo Digital de Superficie del barrio de Valdespartera



Sistema de coordenadas: ETRS 1989
UTM Zone 30N
Datum: ETRS 1989
Unidades: Grados

0 100 200 400 600 Metros

Altitud de las parcelas de la zona de estudio

Alejandro Ortín Gual
Universidad de Zaragoza

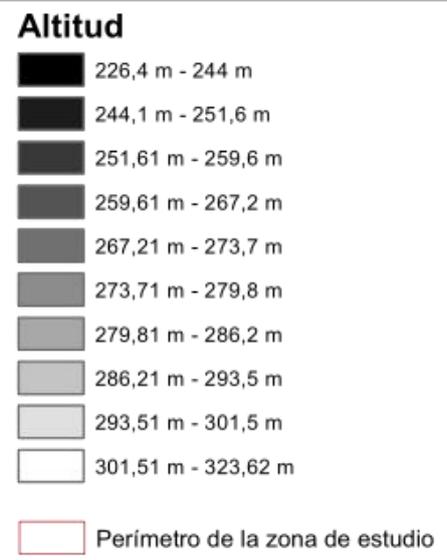
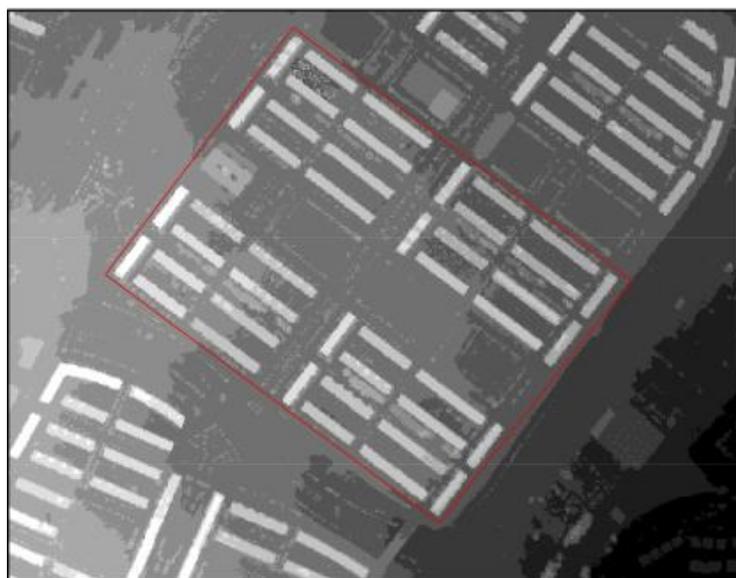


Figura 15. Visualización del MDS de la zona de estudio de Valdespartera.

En la representación del modelo digital de superficies del distrito de Valdespartera, mostrada en la figura 15, lo que más destaca es su tejido urbano regular característico de su planeamiento bioclimático. Se visualizan claramente cuatro sectores compuestos por varias parcelas de edificios. Estos edificios son rectangulares y se sitúan de forma paralela con edificios laterales perpendiculares a ellos. Además los edificios centrales tienen la misma altura y los laterales son más altos para frenar el viento. A pesar de que el modelo no cuenta con una resolución espacial lo suficientemente alta como para identificar la tipología de tejado, se puede intuir, debido a los principios bioclimáticos aplicados en su construcción, que principalmente son planos o con una inclinación leve y que están orientados al sur geográfico (Seicorlan, n.d.). También se pueden distinguir levemente elementos en la superficie de los tejados que podrían dificultar la instalación de paneles solares.

Una vez generados los MDS y hecho el análisis visual para identificar las características de cada uno de ellos, se prosiguió con la generación de las capas raster de orientaciones y de pendientes. Además también se crearon las capas raster de radiación solar; una individual para los tejados seleccionados en cada celda urbana y otra de toda la celda urbana. Una herramienta esencial en este proceso fue Area Solar Radiation que emplea un elaborado algoritmo que calcula la energía solar potencial en una superficie determinada teniendo en cuenta las variaciones diarias y anuales de la exposición al sol y las obstrucciones que afectarían a la cantidad de luz solar que recibe una superficie (Bashar, 2017). La cantidad de radiación total calculada para un área en particular se proporciona como radiación global, que es el resultado de la suma de la radiación directa y difusa de todos los sectores del mapa solar y mapa del cielo, respectivamente (Esri, n.d.). El raster de radiación solar de salida está medido en unidades de vatios hora por metro cuadrado (Wh/m²).

Se fijaron los mismos parámetros en la herramienta para que pudiera haber equivalencia entre las capas de radiación solar de los tres distritos. Se calculó la radiación anual para el año 2020 con un intervalo horario de una hora, es decir, la herramienta calculó la cantidad de radiación solar cada hora para cada día muestreado, además se dejó el parámetro por defecto de direcciones de cálculo en 32, es decir, la herramienta comprobó 32 direcciones alrededor de cada píxel para buscar obstáculos que bloquean la luz. Los valores de salida de radiación solar son en wattios por hora (Wh), pero se convirtieron a kilovatios por hora ya que es una unidad más utilizada en el mercado de la energía (Khanna, n.d.). Se consideró importante realizar un análisis visual de los rásteres obtenidos, ya que así se pudo obtener una primera idea de cómo iban a afectar las características del entramado urbano a la distribución de la radiación solar en cada una de las áreas de estudio.

Distribución de la radiación solar en el barrio de San Pablo

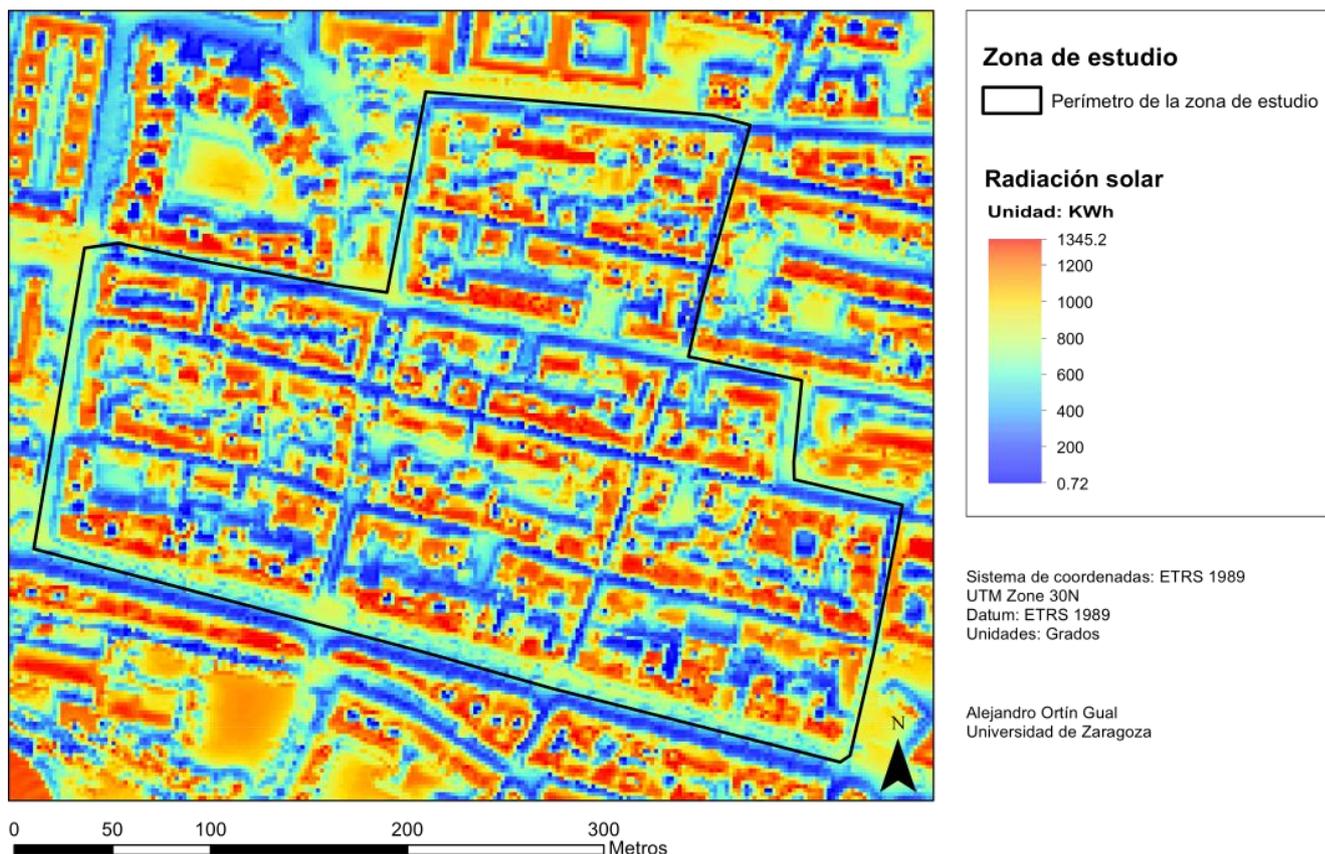


Figura 16. Visualización de la radiación solar de la zona de estudio de San Pablo.

Se puede observar claramente en el raster de radiación solar del sector del barrio de San Pablo, mostrado en la figura 16, que tiene un máximo de radiación solar de 1345,2 kWh y un mínimo de 0,72 kWh. En el mapa se visualiza una mayor concentración de la radiación (rojo) en las cubiertas orientadas hacia el sur geográfico. El entramado urbano cerrado característico de este barrio hace que haya zonas, como patios interiores, con valores bajos de radiación e incluso los edificios que están rodeados por edificios más altos también presentan valores de radiación bajos (azul). Esto deriva en una distribución muy irregular de la radiación solar.

Distribución de la radiación solar en el barrio del Actur

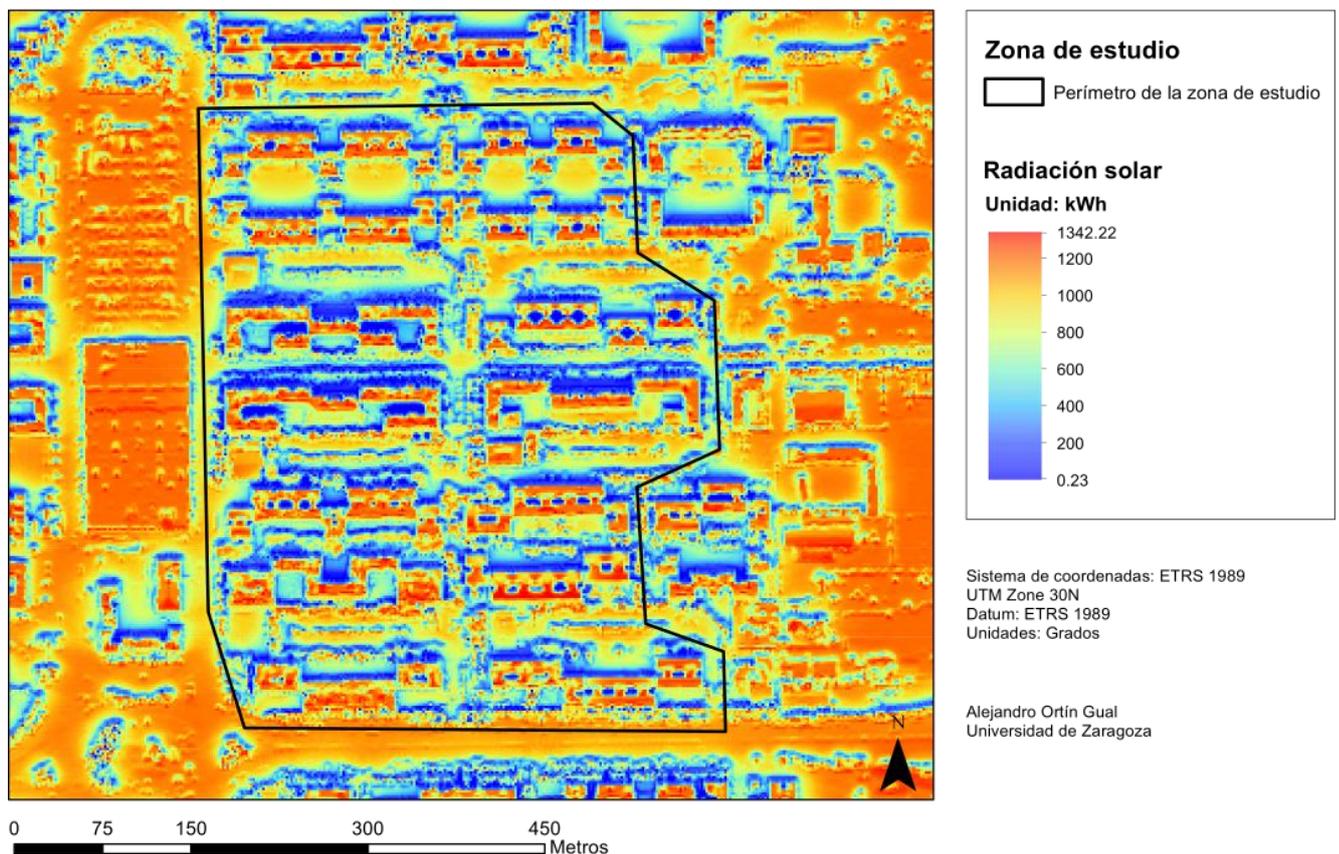


Figura 17. Visualización de la radiación solar de la zona de estudio del Actur.

Se puede observar en el raster de radiación solar del distrito del Actur, mostrado en la figura 17, que tiene un máximo de radiación solar de 1342,22 kWh y un mínimo de 0,23 kWh. En este mapa se puede distinguir claramente las zonas orientadas geográficamente hacia el sur como aquellas que presentan valores de radiación más altos en color rojo y aquellas que están orientadas geográficamente hacia el norte que presentan valores de radiación bajos de color azul. En esta zona la obstaculización de la radiación causada por las sombras de otros edificios seguramente sea menos significativa, sin embargo las formas irregulares de los bloques de edificios puede que afecten en cierta manera a los valores de radiación.

Distribución de la radiación solar en el barrio de Valdespartera

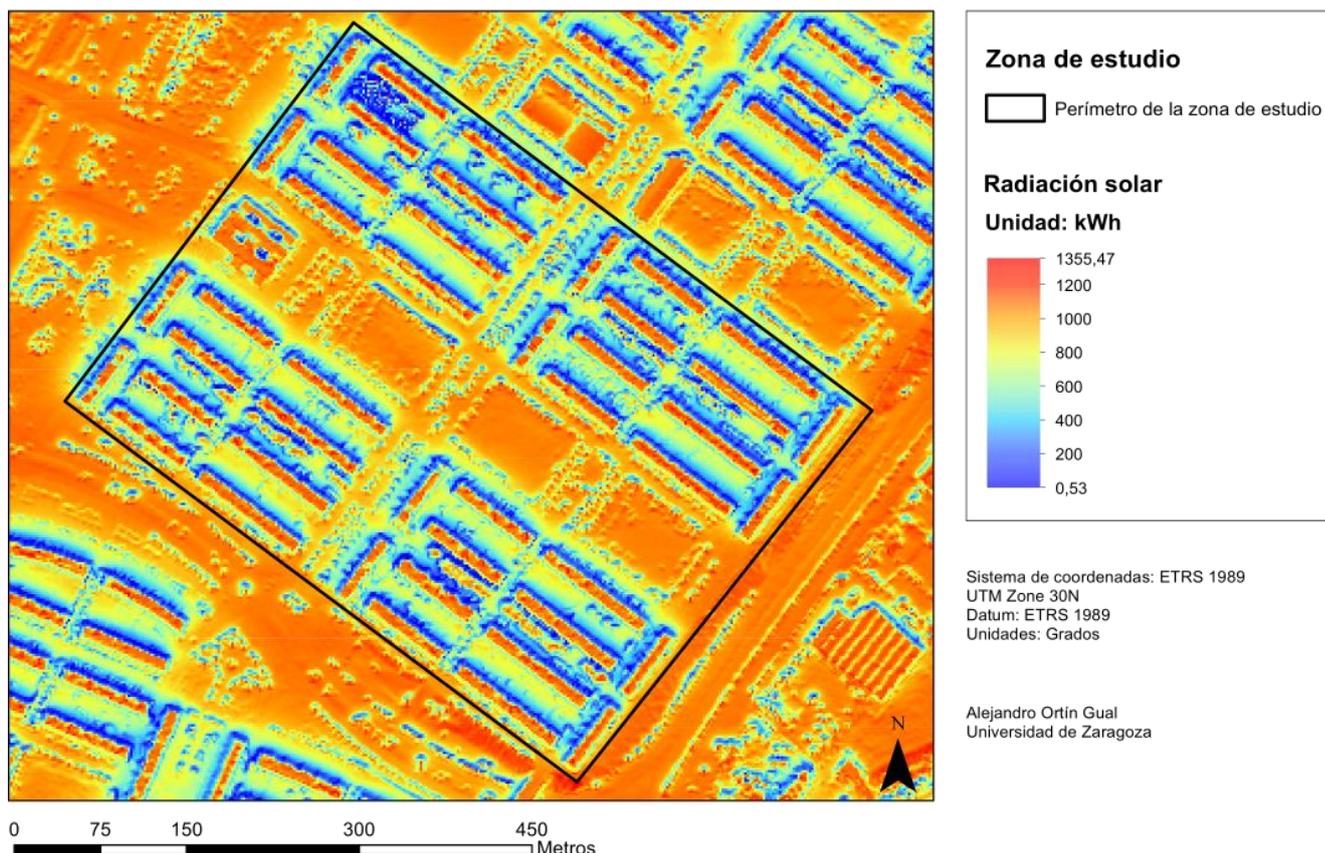


Figura 18. Visualización de la radiación solar de la zona de estudio de Valdespartera.

Por último, este raster de radiación solar del distrito de Valdespartera, mostrado en la figura 18, tiene un máximo de radiación solar de 1355,47 kWh y un mínimo de 0,54 kWh. En este mapa también se distinguen valores altos (rojo) de radiación en los tejados de los edificios y los valores de radiación bajos (azul) corresponden principalmente a las zonas donde se proyectan sus sombras. Al contrario que en los otros dos modelos, en este se puede apreciar que hay una distribución homogénea de la radiación a lo largo de todo el tejado en la mayoría de los edificios, además esos valores de radiación son altos. Esto puede ser debido principalmente a que es una tipología de tejado plano y orientado al sur geográfico. Además al ser un entramado urbano abierto los edificios tienen una separación entre ellos suficiente para que no proyecten sus sombras sobre otros.

A continuación se utilizaron los rásteres de pendientes y orientaciones para filtrar las áreas de tejado, este paso fue fundamental para la obtención de los resultados finales. Este filtrado se realizó en base a unos parámetros de orientación y pendiente que se obtuvieron a partir de trabajos de distintos autores.

Groppi et al. en su trabajo fijaron una serie de parámetros para localizar los píxeles de área de tejado adecuados para la colocación de paneles solares. En cuanto a la inclinación, estos autores consideraron que sólo eran adecuados los tejados planos y aquellos con una pendiente no superior a los 40 grados. En cuanto a la orientación, consideraron adecuados los tejados que tenían orientación sur, suroeste y sureste, porque trabajaban con un área de estudio situada en el hemisferio norte y la orientación al sur geográfico garantizaba que los paneles solares estuvieran radiados durante la mayor parte del día, es decir, las horas centrales y cercanas al mediodía (Solideo, n.d.). En cuanto a la radiación solar, las superficies con una irradiación media anual inferior a 1200 kWh/m² no se consideraron adecuadas. En otro trabajo elaborado por Bashar (2017), el autor consideraba adecuados aquellos tejados que tenían una pendiente inferior a 50 grados. En cuanto a la orientación, este autor consideró adecuados los píxeles con orientaciones sur, suroeste, sureste, oeste y este, porque el área de estudio también se localizaba en el hemisferio norte. También generó un raster de radiación solar pero no fijó ningún límite de radiación mínima. Khanna (n.d.) fijó en su trabajo otros parámetros para identificar los píxe-

les de tejado adecuados. Consideró adecuados aquellos píxeles que tenían una pendiente de 45 grados o inferior, aquellos que tenían una orientación sur, sureste, suroeste, este, oeste, noreste y noroeste, y aquellos que recibían al menos 800 kWh/m² de radiación solar. Se tuvieron en consideración los parámetros de los tres autores relacionados con pendientes y orientaciones, pero se ignoraron aquellos relacionados con la radiación solar, porque se iba a tener en cuenta la radiación solar de todos los píxeles posfiltrado sin importar que fuera alta o baja.

En cuanto a este trabajo, se decidió que los píxeles aptos serían aquellos que tuvieran una orientación sur, sureste y suroeste ya que la ciudad de Zaragoza se encuentra localizada geográficamente en el hemisferio norte. Respecto a la pendiente, se decidió que los píxeles aptos serían aquellos con una inclinación menor o igual a 45 grados. Además a la hora de hacer el filtrado por orientación se tuvieron en cuenta los píxeles planos o con menos de 10 grados de pendiente, los cuales se designaron como aptos debido a que no se podía calcular una orientación definida (Khanna, n.d.).

Después de ajustar los parámetros de filtrado, se prosiguió con las operaciones entre capas ráster. La primera operación fue entre la capa de pendientes y la capa de radiación solar para obtener como resultado una capa de radiación solar cuyos píxeles tenían pendientes de 45 grados o inferiores. La segunda operación fue entre la capa de orientaciones y la capa producto de la operación anterior. Se tuvo en cuenta que los píxeles con pendientes entre 0 y 10 grados se conservaban independientemente de su orientación geográfica. En este caso se obtuvo como resultado una capa de radiación solar cuyos píxeles tenían pendientes de 45 grados o inferiores y orientaciones sur, suroeste y sureste. Se realizó este proceso para cada una de las áreas de estudio y la capa final obtenida mostraba las superficies de tejado adecuadas para la instalación de paneles solares sin tener en cuenta los obstáculos que pudiera haber presentes en ellos. En el apartado Resultados se van a mostrar las capas de radiación solar filtradas y se realiza la comparación entre ellas.

Como paso final se realizó un último filtrado únicamente en la muestra de tejados del barrio de Valdespartera, debido a una falta de recursos para llevarlo a cabo en las otras dos muestras. En este proceso se utilizó la capa ráster de radiación solar obtenida en el filtrado anterior y la capa vectorial de obstáculos obtenida en uno de los primeros pasos del trabajo. De esta forma se obtuvieron las áreas de tejado con orientaciones y pendientes adecuadas y libres de obstáculos para colocar paneles fotovoltaicos. El resultado de esta operación se muestra en el apartado de Resultados.

3.3. Datos utilizados

Los datos utilizados fueron los siguientes: ortofotos del PNOA, capas vectoriales del catastro y datos LiDAR del PNOA. Las ortofotos y los datos LiDAR fueron descargados de la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN, n.d.) y las capas vectoriales fueron descargadas de la Sede Electrónica del Catastro (Sede Electrónica Catastro, n.d.). Se descargaron siete ortofotos con tres bandas, una en el rojo, otra en el verde y otra en el azul. Estas imágenes mostraban la totalidad de la ciudad de Zaragoza a una resolución espacial (tamaño del píxel) de 0,25 metros y una resolución radiométrica de 8 bits, lo que significaba una gran capacidad de detalle. Una vez localizadas las celdas urbanas, solo se mantuvieron las tres ortoimágenes que las contenían, que tenían las siguientes denominaciones:

- PNOA_354_8_8_2018_25830, que contenía la celda urbana del distrito de Actur- Rey Fernando.
- PNOA_383_7_3_2018_25830, que contenía la celda urbana del distrito de Casablanca.
- PNOA_383_8_1_2018_25830, que contenía la celda urbana del distrito de Casco Histórico.

La descarga de los datos LiDAR fue posterior a la selección de las celdas urbanas, de esta forma solo se descargaron aquellas teselas que coincidían con las zonas de estudio. Se descargó una tesela para la zona de estudio del distrito de Casablanca, dos para el del Actur- Rey Fernando y dos para el Casco Histórico. Los archivos descargados estaban en formato laz por lo que para trabajar con ellos había que transformarlos a formato las.

Las nubes de puntos se descargaron de la página del IGN y ya estaban clasificadas y con coordenadas ortométricas. Se descargaron los datos RGB (Red, Green, Blue) que corresponden al ancho de banda del visible entre 0,4 y 0,7 nanómetros.

Las capas vectoriales que se descargaron de la Sede Electrónica del Catastro fueron tres:

- La capa ‘Partes de edificios’ es cada una de las construcciones de una parcela catastral que tiene volumen homogéneo, y pueden ser sobre y bajo rasante. Tiene los atributos relacionados con la altura (Sede Electrónica del Catastro, 2014).
- La capa ‘CONSTRU’ que contiene información sobre las subparcelas urbanas que representan los volúmenes edificados dentro de una parcela (Sede Electrónica del Catastro, 2014).
- La capa ‘Edificios’ es el objeto principal que define el edificio y representa la geometría de la huella de los edificios una serie de atributos definidos en esquema 2D extendido. Tiene los atributos relacionados con el uso que ostenta cada edificio, si es comercial, residencial, industrial o público (Sede Electrónica del Catastro, 2014).

Algo que se observó fue que la resolución temporal no era la misma en los tres datos, pero no había una gran diferencia temporal entre ellos. Se visualizaron y analizaron cuidadosamente las tres áreas seleccionadas para comprobar que los datos eran acordes.

- Resolución temporal de las ortofotos: El año de captura fue el 2018.
- Resolución temporal de las capas del catastro: Actualizadas al año 2021.
- Resolución temporal de los archivos LAS: El año de captura fue el 2016.

3.4. Software utilizado

El software utilizado para transformar los archivos LiDAR de formato ‘.laz’ a formato ‘.las’ ha sido el software de la Comunidad Autónoma de Navarra llamado LiDAR Converter, cuyo uso es sencillo y totalmente gratuito.

El software utilizado para realizar los procesos de edición y análisis de las capas vectoriales, capas raster y nubes de puntos ha sido ArcGIS Pro. Se ha utilizado este software SIG de escritorio porque es el más actualizado de la compañía Esri y las herramientas que ofrece se ajustaban perfectamente a las necesidades del trabajo.

Los software utilizados para realizar las cartografías han sido ArcGIS Desktop e Inkscape. El primero de ellos permite elaborar la totalidad de la cartografía y el segundo permite la edición de la cartográfica para darle un aspecto más agradable.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se van a mostrar en este apartado son el producto final del proceso metodológico del trabajo, un proceso metodológico que comenzó con datos contenidos en capas vectoriales y nubes de puntos y finalizó con capas ráster que contenían información sobre radiación solar en las áreas de tejado óptimas para la instalación de paneles solares. Un aspecto importante fue que las zonas de estudio debían pasar por las mismas fases del proceso para que los resultados finales pudieran ser comparables y ver las diferencias en la distribución de la radiación solar causadas principalmente por las propias características de la muestra de edificios. Además se calcularon dos valores numéricos a partir de los datos proporcionados por los rásteres de radiación solar obtenidos, tanto posfiltrado como prefiltrado. Estos valores fueron la radiación solar media anual por metro cuadrado calculada a partir de la suma de los productos de las áreas y radiaciones medias de los píxeles, que se expresa en MWh/m², y el otro valor fue el potencial de producción de energía eléctrica calculado a partir de la multiplicación de la radiación solar media anual y la eficiencia de un panel solar y el rendimiento de la instalación. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos ofrece la mejor estimación conservadora de una eficiencia del 15 por ciento y un ratio de rendimiento del 86 por ciento. Estos valores significan que los paneles solares pueden convertir el 15 por ciento de la energía solar que reciben en electricidad, y que el 86 por ciento de la electricidad se mantiene a lo largo de la instalación (Khanna, n.d.).

En relación con los objetivos del trabajo se formularon una serie de subapartados. Lo que se pretendía con estos subapartados era mostrar los resultados de una forma ordenada y concreta y que el lector directamente pudiera comprender que objetivo se abordaba en cada caso.

4.1. Radiación solar media anual por metro cuadrado de cada una de las celdas urbanas prefiltrado y posfiltrado y su potencial eléctrico en paneles fotovoltaicos

En este subapartado se llamó celda urbana al área de estudio que contenía la totalidad de la muestra de tejados seleccionados en cada barrio.

En un primer paso se obtuvieron los rásteres de radiación solar de la muestra de tejados de cada zona. Estos rásteres se generaron con la herramienta Solar Area Radiation de ArcGIS y se ajustaron a la extensión de los tejados, y consistieron en la primera comparación entre las muestras de tejados, una comparación prefiltrado que tenía en cuenta la morfología del tejado y el entramado urbano. El raster de radiación solar en los tejados de Valdespartera se muestra en la figura 19, el del Actur se muestra en la figura 21 y el de San Pablo se muestra en la figura 23.

El valor de la radiación solar media anual sobre los tejados de la celda urbana de Valdespartera prefiltrado fue de 48070,68 MWh/m², el valor en los tejados del Actur prefiltrado fue de 45130,52 MWh/m² y el valor en los tejados de San Pablo prefiltrado fue de 47737,63 MWh/m². En un caso ideal, si se pudiera utilizar toda el área de tejados para la instalación de paneles solares fotovoltaicos se conseguiría un potencial eléctrico de 6201,12 MWh en la celda urbana de Valdespartera, un potencial de 5821,84 MWh en la celda del Actur y un potencial de 6158,15 MWh en la celda de San Pablo. Estos datos se muestran en la tabla 4.

En un segundo paso se filtraron los rásteres de radiación solar de cada muestra de tejados seleccionando los píxeles con orientación sur, sureste y suroeste y los píxeles con una inclinación menor o igual a 45 grados. El raster filtrado de radiación solar de Valdespartera se muestra en la figura 20, el del Actur en la figura 22 y el de San Pablo en la figura 24. Este paso consiste en la segunda comparación de las muestras, una comparación posfiltrado en la que se pudo comprobar qué muestras tenían una morfología de tejado que se ajustaba mejor a los requisitos para la instalación de paneles fotovoltaicos.

El valor de la radiación solar media anual de la celda urbana de Valdespartera posfiltrado fue de 12656,20 MWh/m², el valor de la celda urbana del Actur posfiltrado fue de 13617,52 MWh/m² y el valor de la celda urbana de San Pablo posfiltrado fue de 4740,96 MWh/m². Teóricamente si se pudiera utilizar toda el área filtrada para la instalación de paneles solares fotovoltaicos se conseguiría un potencial eléctrico de 1632,65 MWh en la celda urbana de Valdespartera, un potencial de 1756,66 MWh en la celda del Actur y un potencial de 611,58 MWh en la celda de San Pablo. Los datos se muestran en la tabla 4.

Radiación solar prefiltrado en el barrio de Valdespartera

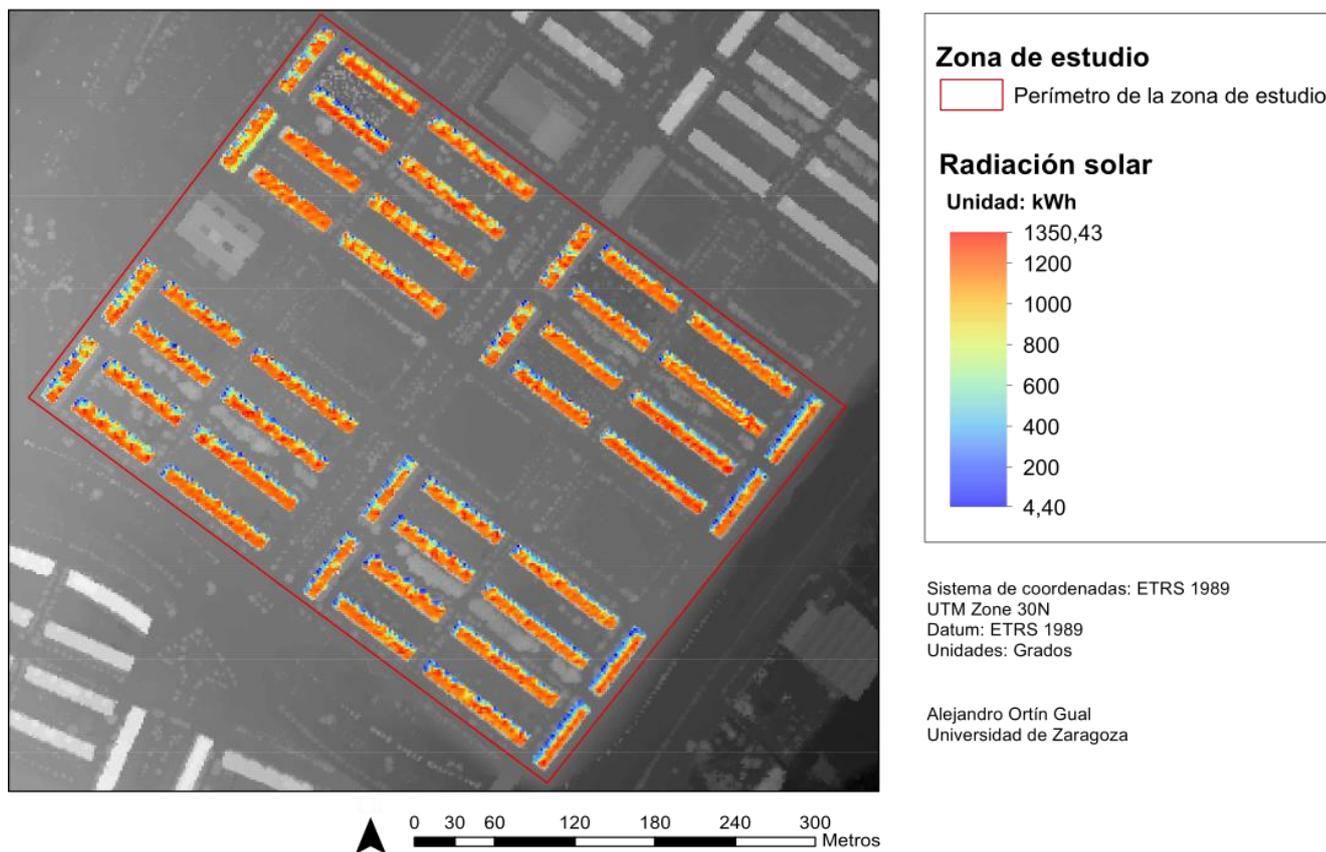


Figura 19. Radiación solar prefiltrado en la muestra de tejados de Valdespartera.

Radiación solar post filtrado en el barrio de Valdespartera

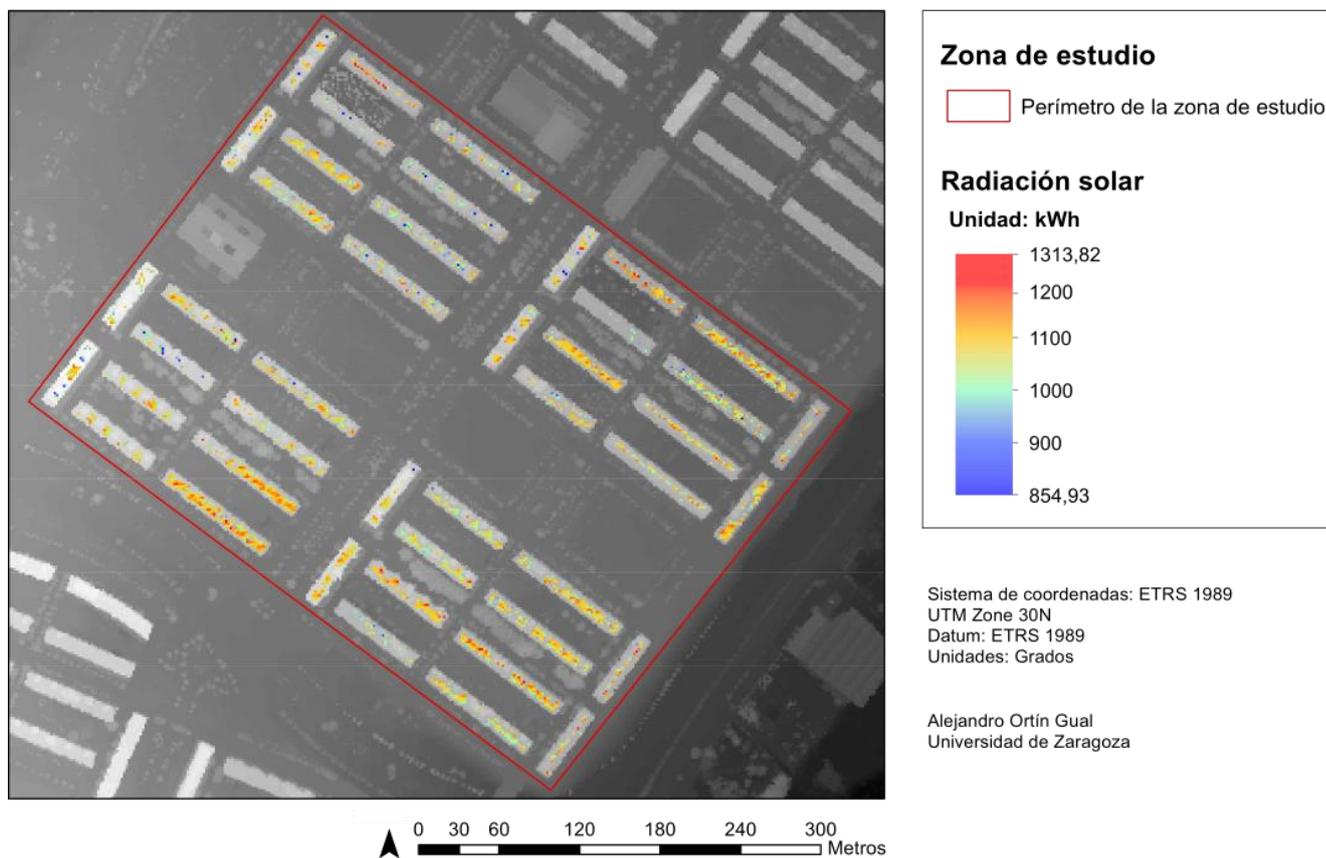


Figura 20. Radiación solar posfiltrado en la muestra de tejados de Valdespartera.

Radiación solar pre filtrado en el barrio del Actur

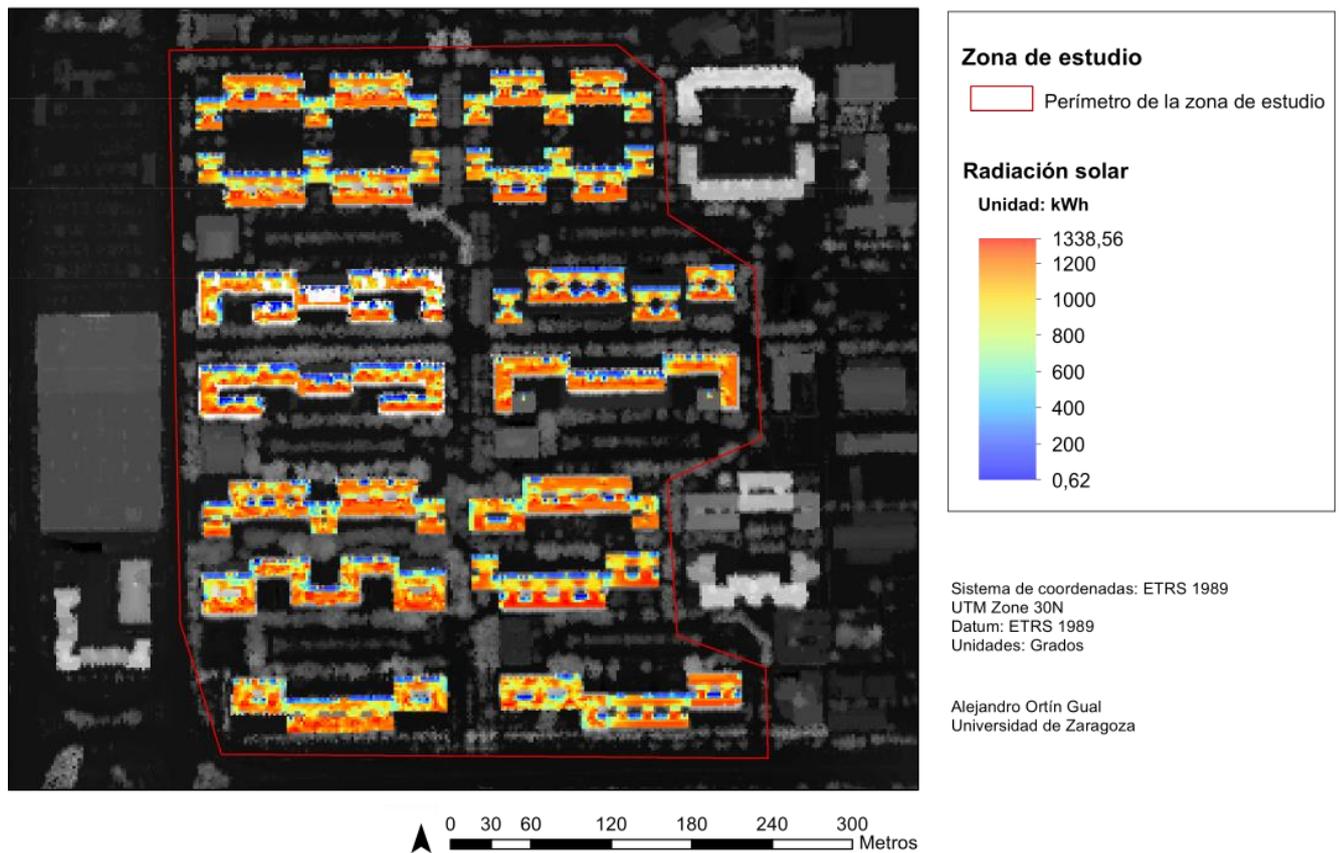


Figura 21. Radiación solar prefiltrado en la muestra de tejados del Actur.

Radiación solar post filtrado en el barrio del Actur

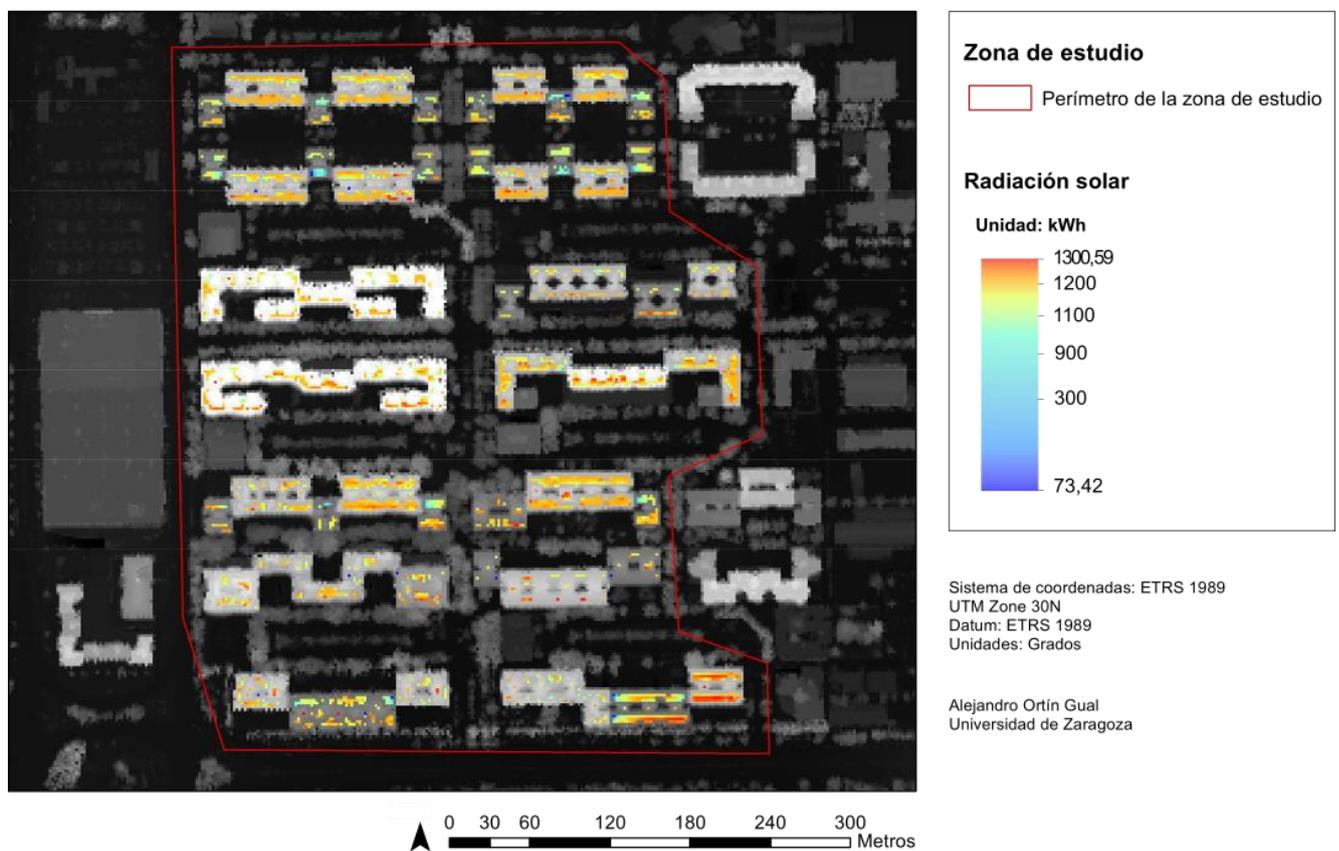


Figura 22. Radiación solar posfiltrado en la muestra de tejados del Actur.

Radiación solar pre filtrado en el barrio de San Pablo

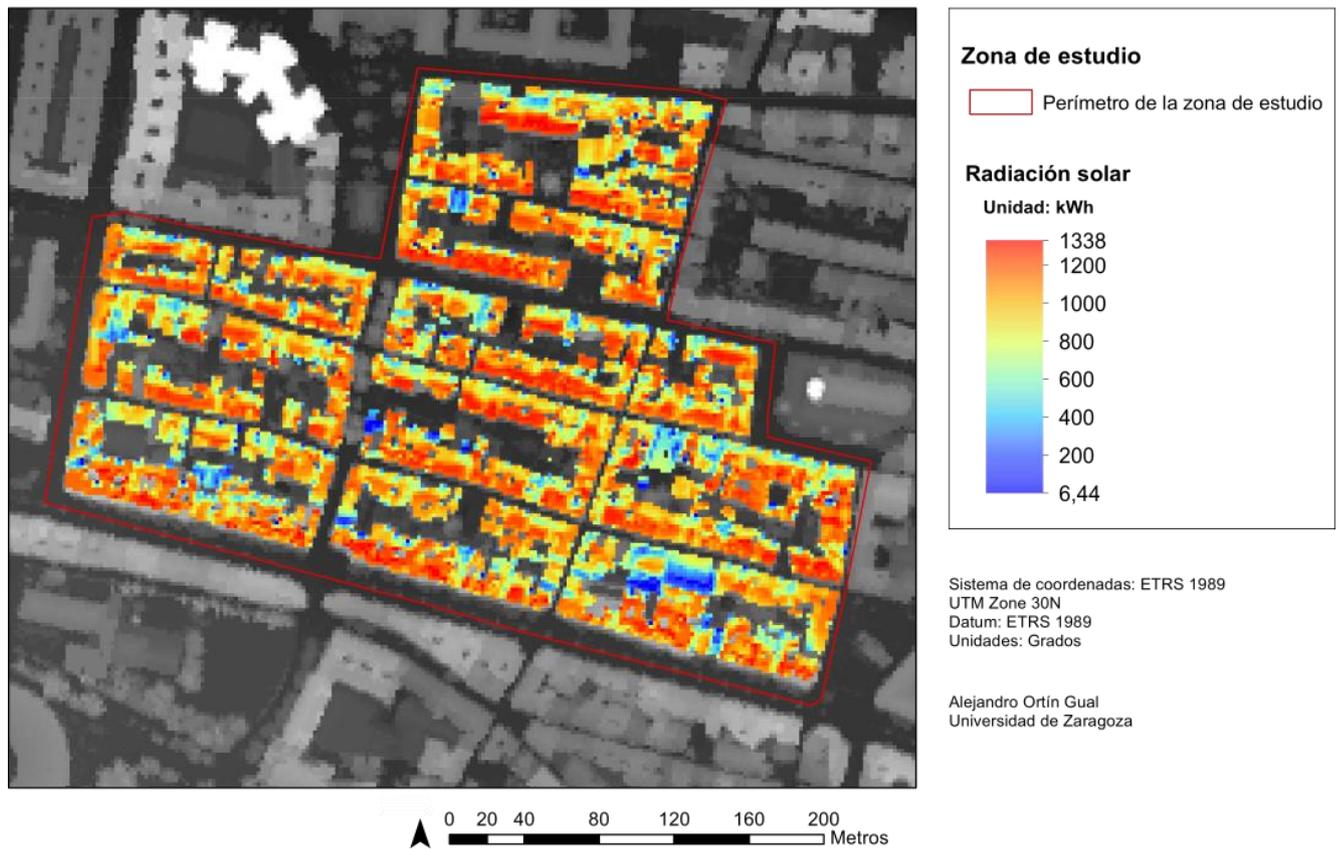


Figura 23. Radiación solar prefiltrado en la muestra de tejados de San Pablo.

Radiación solar post filtrado en el barrio de San Pablo

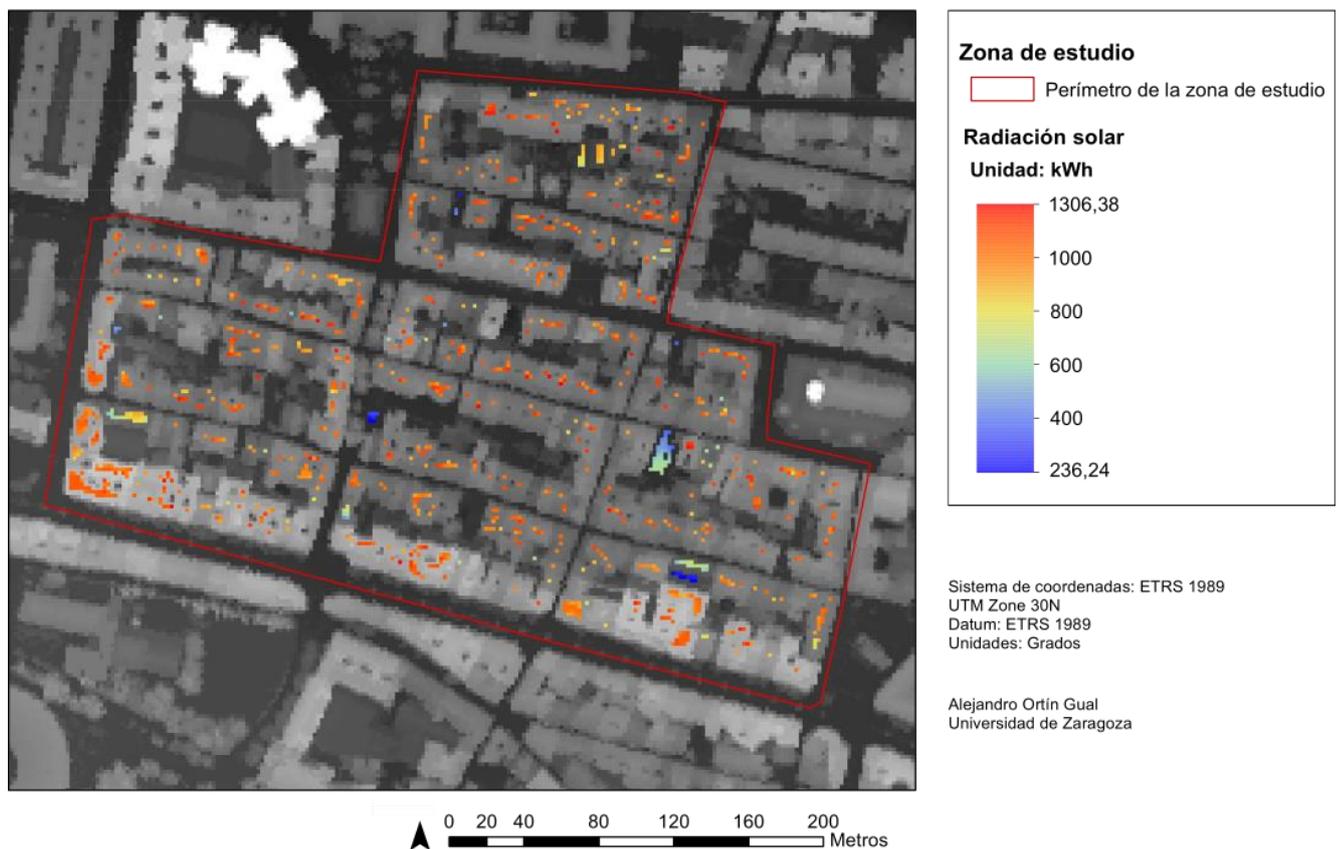


Figura 24. Radiación solar posfiltrado en la muestra de tejados de San Pablo.

Tabla 3. Valores de radiación solar media anual y potencial eléctrico en los tejados de las zonas de estudio de Valdespartera, Actur y San Pablo, antes y después del filtrado.

		Radiación solar media anual (MWh/m²)	Potencial eléctrico (MWh)
Valdespartera	Prefiltrado	48070,68	6201,12
	Posfiltrado	12656,20	1632,65
Actur	Prefiltrado	45130,52	5821,84
	Posfiltrado	13617,52	1756,66
San Pablo	Prefiltrado	47737,63	6158,15
	Posfiltrado	4740,96	611,58

En los resultados prefiltrado se observó que la muestra de tejados de Valdespartera presentaba el valor de radiación solar media anual más alto y la muestra de Actur el más bajo, con una diferencia entre ellos de 2940,16 MWh/m².

Después del filtrado por orientación y pendiente, la muestra de tejados del Actur presentaba el valor de radiación solar media anual más alto y la muestra de San Pablo el más bajo, con una diferencia entre ellos de 8876,56 MWh/m².

En el siguiente subapartado se explicaron las diferencias entre los valores de radiación solar pre y posfiltrado basándose en los histogramas de los píxeles de las muestras de estudio de Valdespartera, Actur y San Pablo.

Los valores de potencial eléctrico eran directamente proporcionales al valor de radiación media anual, por lo que las zonas que registraron mayor radiación solar fueron aquellas que presentaban un potencial eléctrico más alto.

4.2. Cambios en los píxeles debido al filtrado por orientación y pendiente y su impacto en la radiación solar

Tabla 4. Evolución del número de píxeles, el máximo de radiación y el mínimo de radiación.

		Nº Píxeles	Max. Radiación (kWh)	Min. Radiación (kWh)
Valdespartera	Prefiltrado	12249	1350,43	4,40
	Posfiltrado	2676	1313,82	854,93
Actur	Prefiltrado	12295	1338,56	0,62
	Posfiltrado	2988	1300,59	73,42
San Pablo	Prefiltrado	12230	1338	6,44
	Posfiltrado	1079	1306,38	236,25

En la comparación prefiltrado se observó que a pesar de que la muestra del Actur tenía el mayor número de píxeles y el máximo de radiación solar registrado por píxel más alto, el valor de radiación solar media anual y el valor de potencial eléctrico fueron los más bajos de las tres muestras. La causa de esto fue la distribución de los valores de radiación solar de la muestra. Observando los histogramas de las figuras 25, 26 y 27, se puede ver que los tres presentan una distribución sesgada negativa. En el caso de Valdespartera y el Actur las distribuciones tienen un comportamiento similar, sin embargo la muestra de Valdespartera concentra una mayor cantidad de píxeles en los valores de radiación superio-

res a 1000 kWh, esa es la razón de que la radiación solar anual sea superior. En el caso de San Pablo la mayoría de los píxeles se concentran en valores altos de radiación solar, por esa razón el valor de radiación solar media anual supera al de la muestra del Actur. Además los píxeles del Actur presentan la media más baja de los tres con un valor de 917,6 kWh.

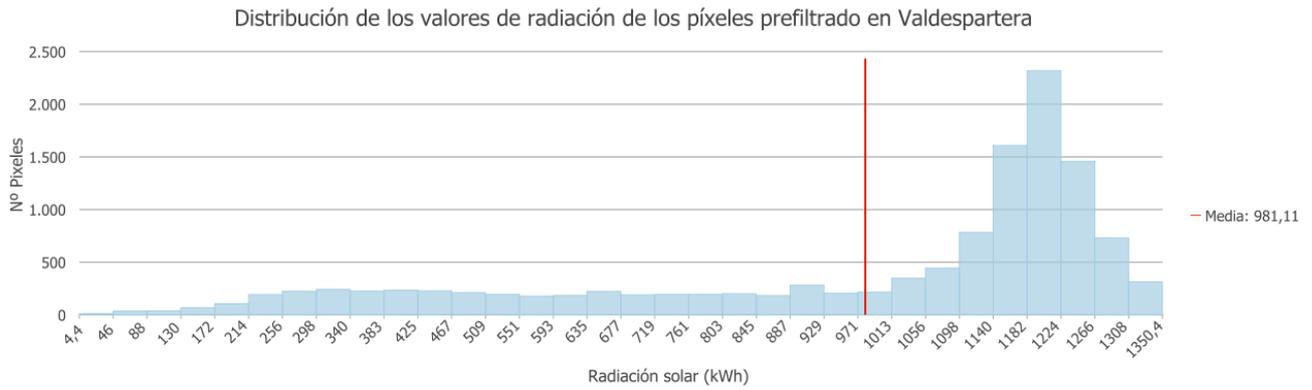


Figura 25. Distribución de los valores de radiación de los píxeles prefiltrado en Valdespartera.

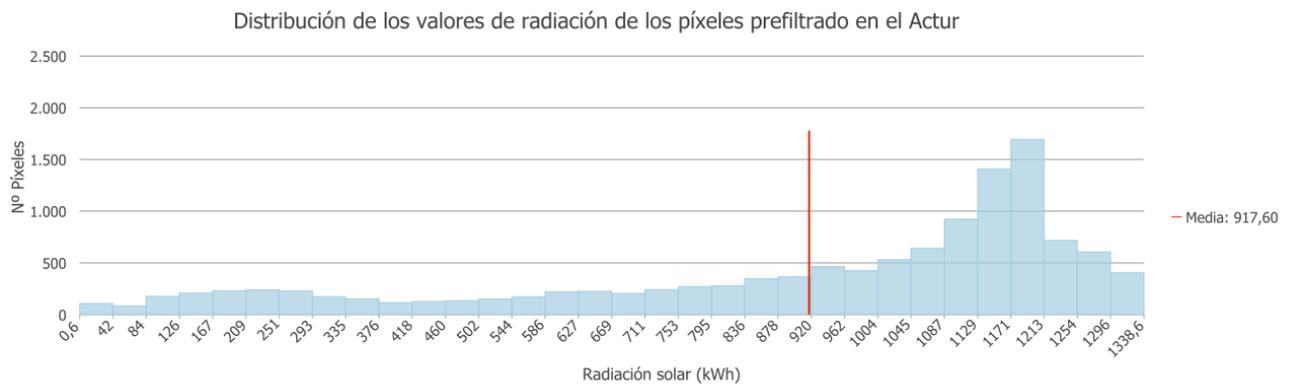


Figura 26. Distribución de los valores de radiación de los píxeles prefiltrado en el Actur.

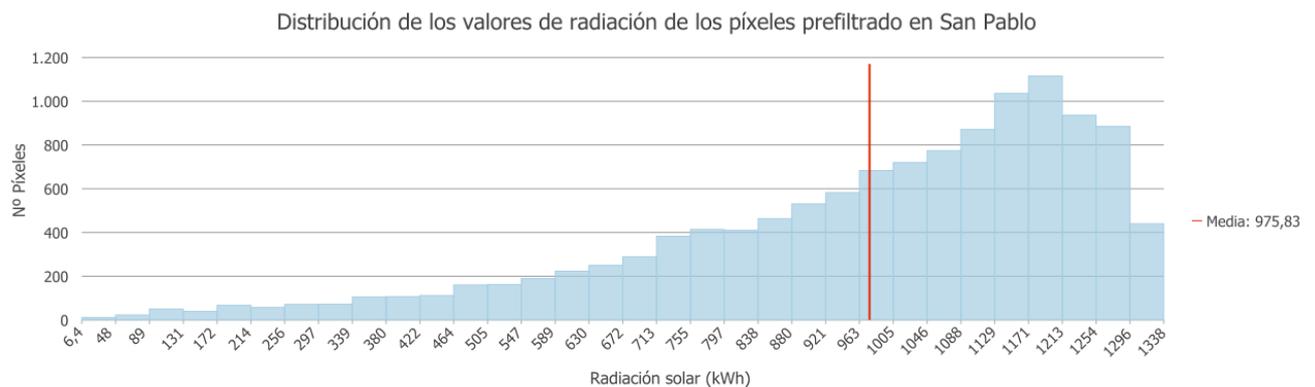


Figura 27. Distribución de los valores de radiación de los píxeles prefiltrado en San Pablo.

En la comparación posfiltrado se observó que la muestra del Actur tuvo los valores de radiación solar media anual y potencial eléctrico más altos y la muestra de San Pablo tuvo los valores más bajos. Esto es debido a que después de aplicar los requisitos de orientación sur, sureste y suroeste y de pendiente, 45 grados o inferiores, la muestra del Actur mantuvo más píxeles que las otras dos porque la morfología de sus tejados era más adecuada. En cuanto a la distribución de los valores de radiación solar postfiltrado, se pueden observar los histogramas en las figuras 28,29 y 30. Los histogramas de Valdespartera y el Actur tienen una distribución casi normal, donde la mayoría de píxeles registran

valores cercanos a la media. En el caso de San Pablo la distribución es sesgada negativa como en el histograma de prefiltrado.

Aunque en las tres muestras se han mantenido principalmente píxeles con valores por encima de 1000 kWh, la cantidad de píxeles eliminados ha supuesto un condicionante clave en los resultados de radiación solar media anual. A partir de los datos de la tabla 5 se observó que mientras la muestra de Valdespartera mantuvo el 21,84% de los píxeles y la del Actur el 24,30%, la muestra de San Pablo sólo mantuvo el 8,82%.

Los tejados de Valdespartera y el Actur presentan unos resultados prometedores, pero por el contrario los resultados de la muestra de San Pablo empeoran en gran medida después del filtrado.

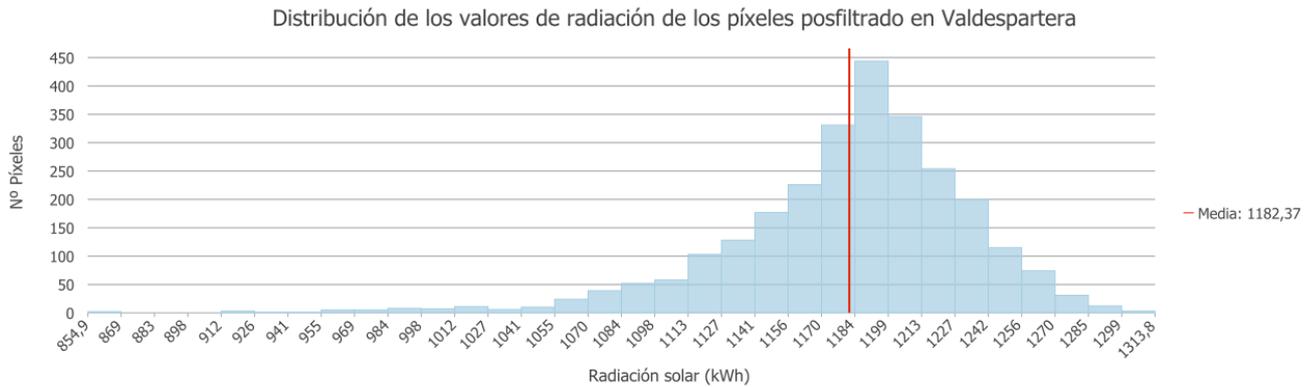


Figura 28. Distribución de los valores de radiación de los píxeles posfiltrado en Valdespartera.

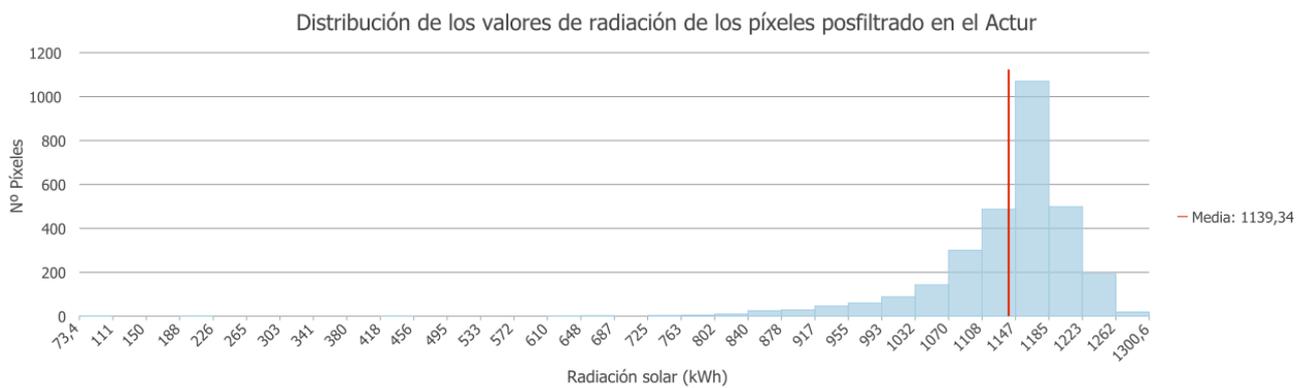


Figura 29. Distribución de los valores de radiación de los píxeles posfiltrado en el Actur.

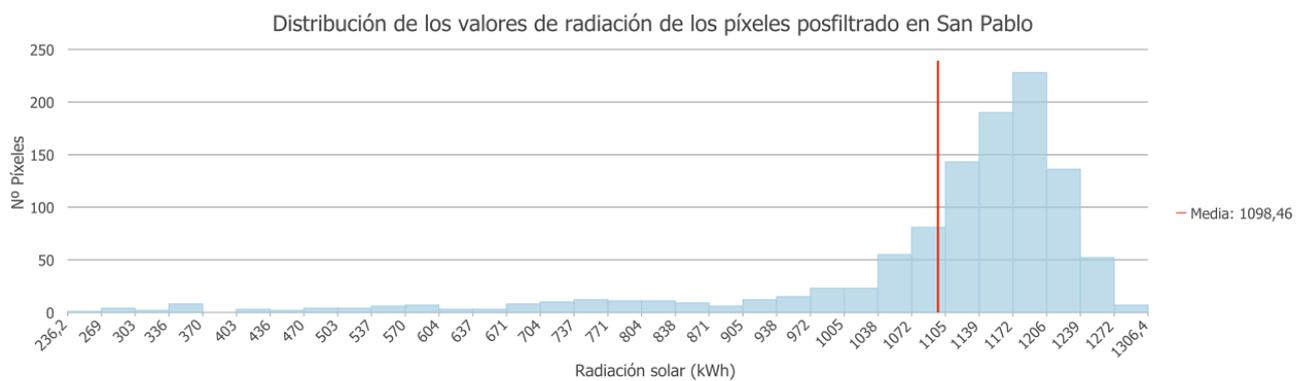


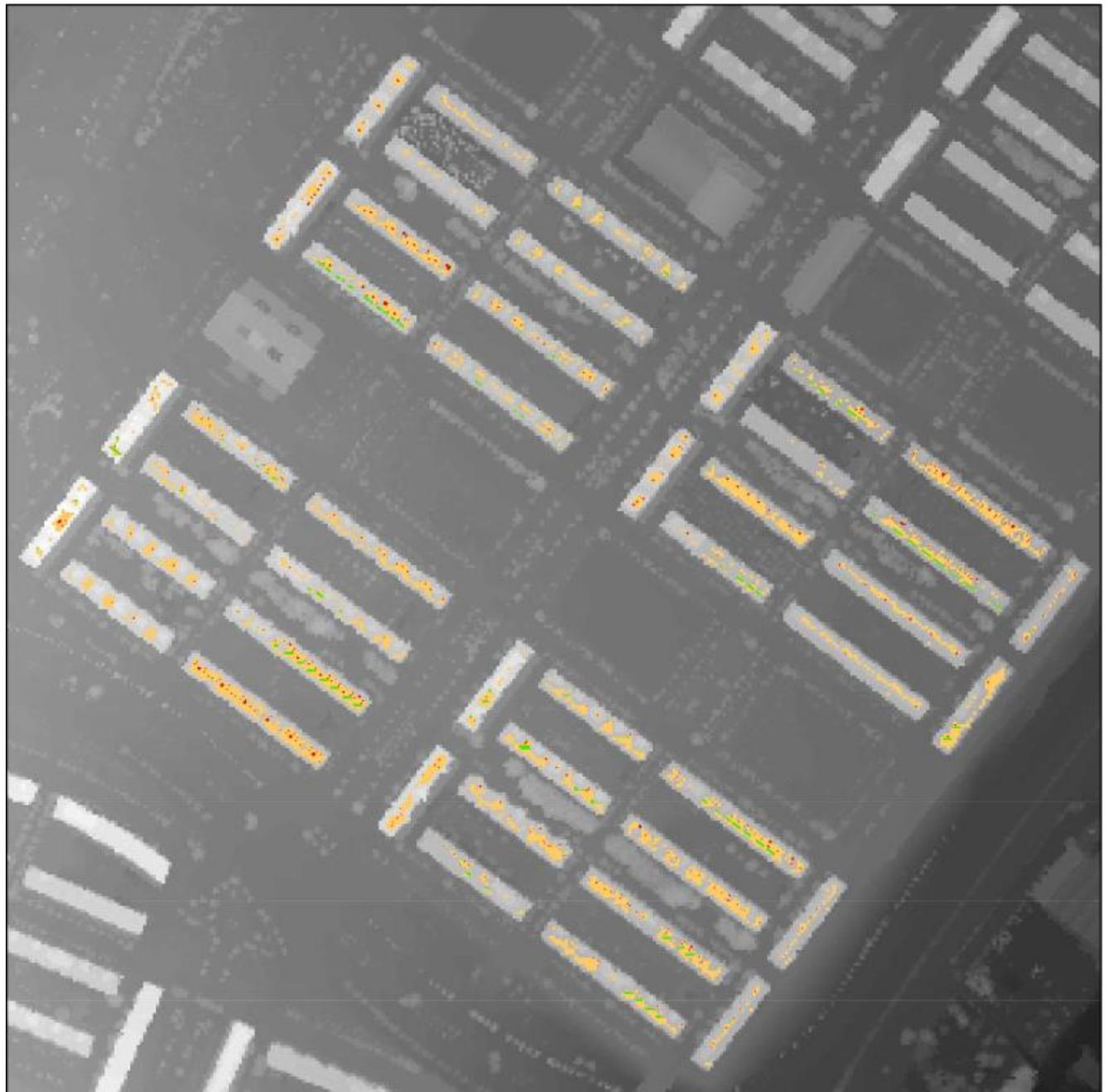
Figura 30. Distribución de los valores de radiación de los píxeles posfiltrado en San Pablo.

4.3. Metros cuadrados disponibles para instalar paneles fotovoltaicos, la radiación solar media anual por metro cuadrado y su potencial eléctrico

En un tercer paso se utilizó la capa de obstáculos registrados en los tejados de la muestra de Valdespartera para identificar y filtrar de forma precisa la radiación solar incidente sobre ellos. Se realizó un remuestreo del raster de radiación solar posfiltrado cambiando el tamaño de pixel de 2x2 a 0,1x0,1 para poder extraer exactamente las zonas de los pixeles 2x2 que estaban ocupadas por obstáculos. Además al conocer que algunos tejados de la muestra de Valdespartera ya tenían paneles fotovoltaicos instalados, se optó por realizar una diferenciación a la hora de calcular la radiación incidente sobre los obstáculos. Esta diferenciación fue importante para comprobar qué cantidad de píxeles óptimos estaban ya ocupados por instalaciones fotovoltaicas y a su vez conocer qué cantidad de radiación recibían.

Al realizar este tercer paso se comprobó la influencia de los obstáculos presentes en los tejados sobre la radiación solar registrada posfiltrado. Los resultados de este paso se muestran en la tabla 6 y las zonas libres de obstáculos se muestran en la figura 26.

Zonas libres de obstáculos en los tejados de Valdespartera



Sistema de coordenadas: ETRS 1989
UTM Zone 30N
Datum: ETRS 1989
Unidades: Grados

Alejandro Ortín Gual
Universidad de Zaragoza

Figura 31. Presencia de paneles fotovoltaicos, obstáculos y zonas libres en los tejados de la muestra de Valdespartera.

Tabla 5. Número de píxeles, área, radiación solar media anual y potencial eléctrico de las zonas libres de obstáculos de los tejados de Valdespartera.

	Cantidad pixel (2x2)	Metros cuadrados	Radiación solar media anual (MWh/m2)	Potencial eléctrico (MWh)
Píxeles totales	2676	10704	12656,20	1632,65
Píxeles obstáculos	224	893,73	1057,16	136,37
Píxeles paneles	124	493,75	584,13	75,35
Píxeles libres	2452	9810,17	11599,04	1496,28
Píxeles libre*	-	-	12183,17	1571,63

*En este caso los paneles solares fotovoltaicos no representan un obstáculo.

La muestra de tejados de Valdespartera tenía 10704 metros cuadrados óptimos de los cuales 893,73 metros cuadrados estaban ocupados por obstáculos dejando 9810,17 libres para la posible instalación de paneles fotovoltaicos. Esto significaba que el 91,64% de la superficie óptima estaba libre de obstáculos. En cuanto a la radiación solar media anual, si se eliminaba la radiación solar recibida por los obstáculos se obtenía una radiación de 11599,04 MWh/m² en las zonas libres. Esto representaba tan solo una disminución del 8,36% de la radiación total.

Sin embargo, no toda la radiación solar incidente sobre obstáculos se perdía, ya que algunos de ellos correspondían a paneles fotovoltaicos ya instalados. Por esa razón, la radiación solar en los paneles se sumó a la radiación registrada en las zonas libres, que resultó ser un total de 12183,17 MWh/m². Esto representaba un 96,26% del total de radiación solar en las zonas óptimas.

5. CONCLUSIONES

La aplicación de un método empírico- analítico ha servido para concluir que la morfología de los tejados de los edificios, la altura de estos y el entramado urbano en el que se encuentran representan una serie de limitaciones significativas a la hora de instalar paneles solares fotovoltaicos en los edificios de la ciudad de Zaragoza. Se ha demostrado que la radiación incidente en tejados con características regulares de bloques de viviendas con alturas de cinco pisos o superiores, como es el caso de Valdespartera y el Actur, se puede aprovechar de manera más eficiente que aquella que incide en tejados de características irregulares de bloques de viviendas con alturas de cuatro pisos o inferiores, como es el caso de San Pablo. Esto es debido a que los tejados de los grandes bloques de viviendas del Actur y de Valdespartera suelen tener una superficie plana o con poca inclinación que permite que la radiación se distribuya de manera homogénea, mientras que los tejados con pendientes de los edificios de San Pablo dificultan esa distribución homogénea y hace que tanto los valores altos de radiación como los bajos se registren de forma dispersa sobre la superficie del tejado. Además las distintas orientaciones de los tejados del barrio de San Pablo también influyen negativamente en la elección de estas zonas para colocar instalaciones fotovoltaicas, ya que un panel con la orientación indebida recibe radiación solar por menos horas y eso significa menor eficiencia.

Los elementos presentes en los tejados también se consideran un inconveniente para la instalación de paneles y reducen el tamaño del área disponible. En este trabajo se ha aplicado un método de identificación visual de obstáculos solo para la muestra de tejados del barrio de Valdespartera. Se ha comprobado que el estilo arquitectónico bioclimático interviene considerablemente en este aspecto, ya que los obstáculos eran de pequeño tamaño y se localizaban principalmente en la zona central a lo largo del tejado dejando espacio libre a ambos lados. Debido a su pequeño tamaño el valor de radiación que

incidía sobre ellos era despreciable y además ocupaban una extensión muy pequeña del área de tejado total.

Es importante conocer cuánta radiación solar se registra sobre los obstáculos y qué área de tejado ocupan para poder descontarla del total. La utilización de otro método de identificación de objetos podría permitir que este proceso se pudiera aplicar a todo tipo de tejados para obtener los valores exactos de radiación solar y área disponible en zonas con orientación y pendientes óptimas. Se consideró la opción de aplicar una clasificación digital basada en objetos a partir de imágenes de alta resolución espacial, pero los elementos como chimeneas, antenas o extractores eran demasiado pequeños y no llegaban ni a ocupar la totalidad de un píxel (Estacio, 2017). Es posible que un método basado en Machine Learning donde se indique al algoritmo las características de los obstáculos a identificar, podría funcionar, pero no se contaban con los conocimientos ni recursos para utilizar este método.

Por otro lado, los edificios que registraban altos valores de radiación, también tenían un alto potencial eléctrico, ya que son valores directamente proporcionales. Este potencial eléctrico hace referencia a la electricidad producida por el panel fotovoltaico y que será utilizada en los hogares. En los bloques de viviendas las instalaciones en su mayoría suelen ser de autoconsumo compartido que consiste en una instalación fotovoltaica que suministra electricidad a varias viviendas. En las viviendas unifamiliares se produce electricidad para autoconsumo individual. En ambos casos las instalaciones están conectadas a la red eléctrica y deben tener un certificado oficial de instalación. Una de las ventajas del autoconsumo es que si se producen excedentes de producción puede ser vertida a la red y descontada proporcionalmente de la factura de la luz a final de mes, es decir, las personas son compensadas por la electricidad que no ha sido utilizada en los hogares (Alonso, n.d.). El problema surgiría si la red no tiene la capacidad suficiente para soportar la cantidad de electricidad vertida, ya que se produciría un apagón generalizado. Por esa razón es importante conocer el potencial eléctrico y el consumo eléctrico de un edificio para que ambos valores sean equivalentes y no se sobrecargue la red eléctrica. Además la instalación de paneles solares de autoconsumo debe estar correctamente dimensionada y que se adapte lo mejor posible al consumo energético del edificio de esta manera se maximizará el ahorro económico.

Otro aspecto relevante es que esta metodología también se puede aplicar sobre edificios de uso industrial o público. El cálculo de la radiación solar y el potencial eléctrico en las zonas óptimas de los tejados les permitirá a los empresarios y a la administración pública saber si la instalación de paneles fotovoltaicos les proporciona un ahorro en el coste de la electricidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Acciona. (n.d.). *¿Qué es la energía solar?* La energía solar. https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/?_adin=02021864894
- Actur- Rey Fernando. (2021, octubre 21). En *Wikipedia*. https://es.wikipedia.org/wiki/Actur-Rey_Fernando
- Alonso, J. A. (n.d.). *Tipos de instalaciones solares fotovoltaicas*. Blog. Sunfields Europe. <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/tipos-nstalaciones-fotovoltaicas/>
- Álvarez, M., Raposo, J. F., Miranda, M., & Bello, A. B. (2018). Metodología de Generación de Modelos Virtuales Urbanos 3D para ciudades inteligentes. *Informes de Construcción*, (70), 549. <https://doi.org/10.3989/id.56528>
- AutoSolar. (2021). *Vida útil de los paneles solares*. Blog. AutoSolar. <https://autosolar.pe/blog/aspectos-tecnicos/vida-util-de-los-paneles-solares>
- Barral, M. (2020). El calentamiento global amenaza el futuro de las energías renovables. *OpenMind BBVA*. <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/calentamiento-global-amenazal-futuro-de-las-energias-renovables/>
- Bashar, S. (2017). *Web App Sheds Light on Solar Energy Potencial*. Arcuser. Esri. <https://www.esri.com/about/newsroom/arcuser/web-app-sheds-light-on-solar-energy-potential/>
- Centro Complutense de Estudios e Información Medioambiental. (2011). *Cambio Global España 2020/50*. <https://www.fuhem.es/2011/01/03/informe-cambio-global-espana-2020-50-energia-economia-y-sociedad/>
- Cowley, P. (2007). The Australian Solar Scene. Actas del I Coloquio para el Fomento de la Energía Fotovoltaica. México, June 5. https://www2.ineel.mx/proyectofotovoltaico/DESCARGAS/1ER_COLOQUIO_2007/theaustrali ansolar.pdf
- Decreto 15 de 2018 [con fuerza de ley]. De medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores. 5 de octubre de 2018. BOE. No. 242.
- Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 2018. Relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables 11 de diciembre de 2018. Referencia: PE/48/2018/REV/1
- Environment America Research and Policy Center & Frontier Group. (2020). *Shining Cities 2020. The Top U.S. Cities for Solar Energy*. https://environmentamerica.org/sites/environment/files/reports/Shining-Cities-2020/EA_Shining_Cities_scrn.pdf
- Estacio Gandia, B. (2017). *Clasificación digital basada en objetos a partir de ortoimágenes de alta resolución e imágenes pleiades en zonas urbanas*. [Tesis de Master, Universidad de Zaragoza]. Repositorio Zagan.
- Eurostat. (2021). *Electricity and heat statistics*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_and_heat_statistics#Consumption_of_electricity_per_capita_in_the_households_sector
- Esri. (n.d.). *Cómo se calcula la radiación solar*. Recursos. Esri. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-solar-radiation-is-calculated.htm>
- Groppi, D., de Santoli, L., Cumo, F., & Astiaso, D. (2018). A GIS-based model to assess buildings energy consumption and usable solar energy potential in urban areas. *Sustainable Cities and Society*, (40), 546-558. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.005>
- Grupo JAB. (2018). Historia de las células solares y su evolución tecnológica. <https://www.grupojab.es/historia-de-las-celulas-solares-y-su-evolucion-tecnologica/>
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (n.d.). *PNOA LiDAR. Segunda cobertura*. Instituto Geográfico Nacional. <http://pnoa.ign.es/estado-del-proyecto-lidar/segunda-cobertura>

- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (n.d.). *Centro de descargas*. Instituto Geográfico Nacional. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Jakubiec, J. A., & Reinhart, C. F. (2012). A method for predicting city-wide electric production from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly DAYSIM simulations. *Solar Energy*, 93 (C), 127-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.022>
- Khanna, D. (n.d.). *Estimar el potencial de energía solar*. Learn ArcGIS. Esri. <https://learn.arcgis.com/es/projects/estimate-solar-power-potential/#representar-cartogr%C3%A1ficamente-la-energ%C3%ADa-solar>
- Lamelas, M. T., & Montealegre, A. L. La nube de puntos: filtrado, interpolación y recursos para el análisis. Documento de archivo. (3 de marzo de 2020).
- Ley 24 del 2013. Del Sector Eléctrico. 26 de diciembre de 2013. BOE. No. 310.
- Li, Y., Ding, D., Liu, C., & Wang, C. (2016). A pixel-based approach to estimation of solar energy potential on building roofs. *Energy and Buildings*, (119), 563-573. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.025>
- Lisbon E-Nova. (2019). Lisbon Solar Platform. <https://www.renewables-networking.eu/documents/CaseStudy-Lisbon-PT.pdf>
- Pérez, J., & Lumbreras, J. (2020). ¿Cuánta energía producen y cuánta consumen las ciudades? *The Conversation*. <https://theconversation.com/cuanta-energia-producen-y-cuanta-consumen-las-ciudades-127827>
- Portero, M. A., & Vela, Luis. (2013). Ecociudad Valdespartera, Zaragoza. *Urban-e*, (02). <http://urban-e.aq.upm.es/articulos/ver/ecociudad-valdespartera-zaragoza/completo>
- Real Decreto 244 de 2019 [Ministerio para la Transición Ecológica]. Por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. 5 de abril de 2019. BOE. No. 83.
- Real Decreto 1955 de 2000 [Ministerio de Economía]. Por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. 27 de diciembre de 2000. BOE. No. 310.
- Sede Electrónica del Catastro. (n.d.). <http://www.sedecatastro.gob.es/>
- Sede Electrónica del Catastro. (2014). *Modelo de datos de cartografía vectorial (formato shapefile)*. https://www.catastro.minhap.es/ayuda/manual_descriptivo_shapefile.pdf
- Seicorlan. (n.d.) *¿Cuáles son los tipos y formas de tejados?*. Blog. Seicorlan. <https://seicorlan.com/tipos-formas-de-tejados/>
- Solaun, K., & Cerdá, E. (2019). Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (116). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109415>
- Solideo. (n.d.). *Orientación e inclinación de las placas solares*. Blog. Solideo. <https://www.solideo.es/orientacion-e-inclinacion-de-las-placas-solares/>
- Soria, A. (2021). Legislación fotovoltaica en España (2021). *Censolar*. <https://www.censolar.org/legislacion-fotovoltaica-2021/>
- Trujillano, D. (n.d.). *Listado de posibles usos y tipologías edificatorias*. Arquitectotrujillano. <http://www.arquitectotrujillano.com/lang1/pg001.html>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. https://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf
- Universidad Politécnica de Valencia [CFP. Universitat Politècnica de València]. (2014). *Como elevar edificios en 3D en Arcgis 10.2 a partir del catastro*. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=90vc8AsdT9k&t=14s&ab_channel=CFP.UniversitatPolit%C3%A8cnicaVal%C3%A8ncia

Zaragoza. (n.d.). *Historia de San Pablo*. Barrio de San Pablo. Zaragoza.
<https://www.zaragoza.com/calles-zaragoza/barrio-san-pablo/#Historia>

Zaragoza Noticias. (2011). *Arranca la inscripción de viviendas y comercios del Actur al primer Barrio Solar de España*. Ayuntamiento de Zaragoza.
<https://www.zaragoza.es/sede/servicio/noticia/301073>