de la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., Rodrigues, M. (Eds.) 2015
Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación: 709-718
Universidad de Zaragoza-AGE. ISBN: 978-84-92522-95-8

Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos

A.M. Martín Ávila[1], J. Domínguez Bravo[1,2]

[1] Facultad de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid. C. Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid.
[2] Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica y Energías Renovables, CIEMAT. Av. Complutense 40, 28040 Madrid.

anamam06@ucm.es, javier.dominguez@ciemat.es

RESUMEN: Paralelamente al crecimiento de la demanda de energía procedente de las fuentes renovables, también lo ha hecho la necesidad de cuantificar el potencial de estos recursos en nuevos ámbitos. El principal propósito de este trabajo es desarrollar un modelo geográfico que evalúe la posibilidad de generar energía eléctrica en entornos urbanos, delimitando aquellas zonas de los tejados de edificios que reúnen las mejores condiciones para instalar sistemas fotovoltaicos. En este análisis se ha seleccionado el casco urbano del municipio de Miraflores de la Sierra situado en la Comunidad de Madrid. El estudio se ha realizado basándose en un modelo urbano tridimensional generado a partir de una nube de puntos LIDAR que, una vez depurada y clasificada, constituye la principal fuente de información. Estos datos permiten una adecuada descripción del entorno urbano, determinando la posición y dimensiones de los edificios y la presencia de obstáculos ocasionados por la topografía, la vegetación y otros elementos urbanos circundantes.
En este proyecto se ha desarrollado un modelo con ArcGIS que no sólo permite realizar cálculos globales para una zona determinada, sino que también proporciona como resultado final los datos a nivel de edificio. Para poder realizar este análisis, ha sido necesario incluir en el modelo una serie de herramientas desarrolladas en el lenguaje de programación Python. La implantación de energía fotovoltaica requiere un pormenorizado estudio de diferentes variables asociadas a entidades espaciales. En este sentido, la tecnología LIDAR permitirá mejorar la exactitud y la eficiencia en el análisis del potencial solar en zonas urbanas a través de la utilización de los Sistemas de Información Geográfica.

Palabras-clave: LIDAR, SIG, irradiación solar, energía solar fotovoltaica, generación distribuida.

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, la necesidad de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero y la escasez de los recursos energéticos, han propiciado un incremento en el desarrollo de nuevas fuentes de energía, renovables y sostenibles. Estas fuentes no sólo contribuyen a reducir la contaminación, si no que además ofrecen la posibilidad de utilizar recursos propios, disminuyendo así la dependencia de la importación de combustibles fósiles. La investigación en el sector de las energías renovables ha propiciado una mayor participación de estas fuentes en el modelo energético. Entre ellas, la energía solar, se manifiesta como una fuente limpia, con una productividad y un potencial óptimo para cubrir buena parte de las necesidades energéticas de la población. Esta fuente de energía, deberá de convertirse en el futuro en uno de los principales recursos. Para ello, una prioridad debe ser la promoción de políticas destinadas a establecer nuevos modelos energéticos basados en una participación mayoritaria de la energía solar.

Actualmente, alrededor de la mitad de la población mundial se concentra en las ciudades y, según las previsiones de la ONU (2014), se estima que llegará hasta el 66% en el año 2050. Un reto importante será desarrollar planes urbanos que garanticen una expansión sostenible e inteligente de las ciudades. En este sentido, la implementación de políticas destinadas al aprovechamiento de la energía solar necesita conocer qué porcentaje de las necesidades urbanas pueden cubrirse de forma autónoma con esta fuente de energía. Por ello, a medida que la demanda de energía procedente de fuentes renovables se ha ido incrementando, también lo ha hecho la necesidad de cuantificar el potencial de sus recursos, contando con herramientas que permitan realizar un rápido y preciso análisis de la capacidad de generación en las ciudades.

Si consideramos que el 40% de la energía que se consume en la Unión Europea (UE) corresponde a las

edificaciones, podemos entender como esta situación ha llevado a la UE a promover la utilización de la energía fotovoltaica como parte del desarrollo de sus programas para mejorar la eficiencia energética en los edificios, ya sea en el diseño de los nuevos como en la rehabilitación de los ya existentes (UE, 2010). Debemos considerar también que los edificios tienen la ventaja de no necesitar un espacio adicional para instalar los sistemas fotovoltaicos, por lo que la electricidad generada se localiza cerca del consumidor, disminuyendo de esta forma las pérdidas de energía por el transponte de la misma. Los tejados suele ser zonas disponibles (en ocasiones sin uso), que pueden adaptarse a la instalación de sistemas solares y, como en el caso de los polígonos industriales, parques comerciales o centros de ocio, aportando una superficie disponible de considerables dimensiones.

Indudablemente, la instalación de sistemas fotovoltaicos en entornos urbanos requiere de un pormenorizado análisis de las diferentes variables asociadas a las entidades espaciales o edificios a utilizar. Este análisis, dependiendo de la complejidad de la zona, necesitará de una mayor o menor precisión en la caracterización de la estructura urbana. En este sentido, la evolución de las tecnologías de sensores remotos como el LIDAR (Light Detection and Ranging), ha fomentado su aplicación en el desarrollo de modelos urbanos tridimensionales. Estos modelos, junto con la capacidad analítica de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se han convertido en una herramienta fundamental para el planeamiento urbano y, por ende, para mejorar su eficiencia y allanar el camino hacia un nuevo modelo energético de la ciudad inteligente.

2. METODOLOGÍA

En la actualidad, los trabajos de evaluación del potencial solar representan una importante contribución al establecimiento de programas de generación con energía solar en los edificios. Hasta el momento, los proyectos desarrollados consideran diferentes unidades de análisis que pueden variar desde la escala regional y nacional (Izquierdo et al., 2008) a los núcleos urbanos y barrios. Bergamasco y Asinari (2011), a partir de la cartografía digital disponible, estiman modelos urbanos utilizando imágenes aéreas para identificar las diferentes tipologías de tejados.

Por otro lado, últimamente se han realizado trabajos basados en datos obtenidos con tecnología LIDAR. El número de variables analizadas en el muestreo de los tejados es muy diversa, dependiendo de lo precisa que sea la morfología de los edificios. Brito et al. (2012) sugieren un procedimiento sencillo considerando únicamente la superficie horizontal de los edificios, y sin considerar su forma. Sin embargo, para una mayor precisión del análisis tridimensional de los edificios, Gooding et al. (2013) añaden al estudio otras variables como la orientación y la inclinación de los tejados, sin descartar el efecto de las sombras (Nguyen y Pearce, 2012).

En línea con las investigaciones desarrolladas en este campo, el grupo de Tecnologías de la Información Geográfica y Energías Renovables del CIEMAT, viene trabajando en el diseño, desarrollo y mejora de un modelo geográfico para la evaluación del potencial solar fotovoltaico de zonas urbanas (gSolarRoof). El estudio se realiza basándose en el levantamiento de un modelo urbano (modelo digital de superficie y elevación, MDS y MDT) generado a partir de datos LIDAR. Una vez procesados los datos, el MDS se integra en un modelo realizado con ArcGIS que permite determinar la viabilidad para la instalación de sistemas de aprovechamiento de la energía solar en los tejados y analiza la superficie disponible en cada cubierta para su aprovechamiento, en este caso, con módulos fotovoltaicos (Martín, 2014).

Previamente a realizar el análisis de viabilidad es necesario depurar y clasificar la nube de puntos LIDAR, extrayendo todos aquellos elementos necesarios para el estudio (edificios, masas de vegetación y superficie del terreno). Una vez editados los datos, se crea un modelo 3D de la zona urbana con el que se ejecuta el modelo geográfico en el que se incluyen los siguientes pasos: (i) Calcular la superficie total disponible en los tejados para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos y seleccionar los emplazamientos idóneos, considerando criterios como la pendiente y orientación de los tejados sin descartar el efecto de las sombras. (ii) Determinar la irradiación solar recibida en la zona seleccionada partiendo de datos horarios sobre la superficie horizontal utilizando un método geométrico para calcular la irradiación sobre paneles situados en tejados planos o inclinados. (iii) Estimar la potencia instalada y la producción anual de energía eléctrica, según los diferentes tipos de módulos que pueden instalarse. Finalmente, (iv) se agrupan todos los resultados obtenidos para cada uno de los edificios de la zona de estudio.

2.1. Descripción de la zona de estudio

El lugar seleccionado para el desarrollo y diagnóstico del modelo es una zona en el casco urbano del

municipio de Miraflores de la Sierra perteneciente a la Comunidad de Madrid. El núcleo urbano está situado a 1.145 m de altura, la mayoría del mismo está construido entre los 1.000 y 1.200 m de altitud, teniendo el terreno una inclinación aproximada del 20 % y orientación sur. El clima presenta elementos característicos de las zonas cercanas a la montaña al tratarse de un valle cerrado por el norte. Esta zona dispone de aproximadamente 2.238 horas de Sol al año.

Miraflores de la Sierra cuenta con 5.890 habitantes (INE, 2014) y se trata de una zona eminentemente residencial, aunque todavía los usos ganaderos siguen estando presentes en la comarca. Al igual que en otros núcleos urbanos, el centro del municipio es un área de gran concentración de edificios con calles estrellas, adquiriendo una estructura con menor densidad de viviendas en las zonas que han sido urbanizadas posteriormente. El tejido urbano del municipio se caracteriza por la presencia de numerosas viviendas unifamiliares individuales, en ocasiones rodeadas de vegetación. Además, resulta escasa la disponibilidad de grandes edificios, que aporten mayores superficies de tejado libre para las instalaciones fotovoltaicas.

2.2. Datos de partida

En el desarrollo del estudio serán necesarias las siguientes capas de información asociadas a la distribución de la zona urbana analizada:

- Nube de puntos LIDAR: Los ficheros de nube de puntos corresponden al vuelo LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del año 2010, proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN)[1] que ha sido puesto recientemente a disposición del público. Los ficheros están en formato '.las', formados por hojas de 2x2 km con una densidad media de 0,5 puntos/m^2 que implica un espaciamiento entre puntos menor de 1,41 m.
- Polígonos con la delimitación de los edificios: La Dirección General de Catastro[2] ofrece un servicio de consulta de la información catastral y la posibilidad de descargar la cartografía vectorial en formato 'shapefile'. Proporciona información de ámbito municipal del catastro rústico y urbano como el parcelario catastral (referencia catastral) y la delimitación de edificios (elementos constructivos y número de plantas).
- Datos de la posición del Sol: El servicio web SoDa (Solar Energy Services for Professionals)[3] proporciona enlace a diferentes recursos relacionados con la radiación solar. Uno de los servicios disponible es Solar Geometry 2 (SG-2), biblioteca para el cálculo de la situación del Sol. Este portal web ofrece datos de la posición solar para una posición determinada, seleccionando la fecha y un intervalo de tiempo.
- Puntuales con la distribución de los edificios singulares y monumentos: Con los datos disponibles en la Infraestructura de Datos Espaciales Comunidad de Madrid (IDEM)[4] y el mapa turístico de Miraflores de la Sierra, se establece la distribución de aquellos edificios que por su antigüedad o características no son apropiados para la instalación de sistemas fotovoltaicos.

La heterogeneidad de las fuentes de información hace necesario homogeneizarla en un formato SIG adecuado. Todas las capas de datos se tratarán para dotarlas de la estructura necesaria en el posterior análisis.

2.3. Procesado de la nube de puntos LiDAR

Los datos LIDAR constituyen la base fundamental para realizar el análisis. Los ficheros disponibles presentan una clasificación automática según los estándares establecidos por la ASPRS (American Society for Photogrammetry & Remote Sensing), que incluye vegetación, edificaciones y puntos del terreno. Sin embargo, en esta clasificación previa se puede observar que en los edificios hay zonas que han sido definidas como vegetación alta, siendo necesario clasificar de nuevo los puntos para definir lo más exactamente posible la delimitación de los edificios.

---

[1] Ministerio de Fomento. Instituto Geográfico Nacional (IGN). Disponible en http://www.ign.es/ign/main/index.do. [30 de abril de 2015].

[2] Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas. Portal de la Dirección General del Catastro. Disponible en http://www.catastro.meh.es/. [30 de abril de 2015].

[3] SoDa, Solar Energy Service for Professionals. Disponible en http://www.soda-pro.com/web-services/astronomy/solar-geometry-2. [30 de abril de 2015].

[4] Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. IDEM-Infraestructura de Datos Espaciales Comunidad de Madrid. Disponible en http://www.madrid.org/cartografia/idem/html/web/index.htm. [30 de abril de 2015].

El tratamiento de los datos LIDAR se realizó con el programa 'VRMesh V7.6 Studio'. El procedimiento que se sigue consiste en clasificar los elementos básicos relevantes para el análisis que constituyen la nube de puntos (Figura 1). Es posible asignar diferentes tipos de clasificaciones que dependerán de la definición de la nube de puntos y las necesidades del análisis realizado. Se detecta primero la vegetación, después los tejados de los edificios y los puntos del terreno, para finalizar con la clasificación de la vegetación en sus diferentes tipos (baja, media y alta) según la altura. En las zonas urbanas también se localizan elementos como los vehículos u otros objetos temporales de diversos tamaños presentes en las calles, que es preciso tratar. Una opción puede ser suprimirlos, interpolándolos como puntos del suelo aplicándoles un suavizado.

También se depura la nube de puntos con la eliminación del ruido de los datos y aquellos puntos que sean redundantes, siempre que se preserve la forma de las aristas y esquinas para mantener todo lo posible la delimitación de las superficies. Cuando la nube de puntos es muy densa se puede reducir en una determinada proporción el número de puntos que la constituyen sin perjudicar la precisión de los resultados.

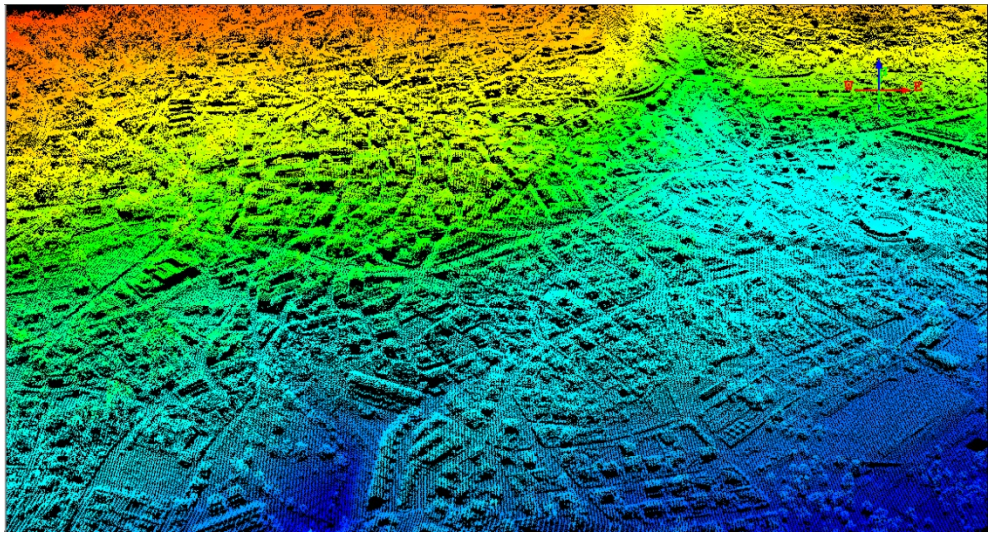

Figura 1. Nube de puntos LIDAR clasificada por su altura s.n.m. Núcleo urbano de Miraflores de la Sierra.

2.4. Modelo geográfico

Después de haber clasificado la nube de puntos LIDAR, se diseña un modelo geográfico desarrollado con ArcGIS, con el que se analizarán las características que deben cumplir todos los edificios para instalar paneles fotovoltaicos. El modelo no sólo realizará cálculos globales para una zona urbana determinada, sino también proporcionará como resultado los datos individuales de todos los edificios del conjunto urbano. Este modelo permitirá:

- Calcular la superficie útil disponible en los tejados para la instalación de sistemas solares y seleccionar los emplazamientos más adecuados.
- Determinar la radiación solar recibida en los tejados en la zona de estudio seleccionada.
- Estimar la potencia instalada y la producción de energía con diferentes tipologías de tecnologías solares.

Para realizar este análisis, además de las herramientas disponibles en ArcGIS, ha sido necesario crear otras herramientas específicas desarrolladas en lenguaje de programación Python con las que resolver las necesidades de cálculo del modelo y adaptar las herramientas existentes a la ejecución del mismo.

En el estudio del potencial fotovoltaico es importante disponer de un modelo urbano tridimensional donde se represente la estructura y forma de los edificios, al igual que la distribución de la vegetación, calles y cualquier otra infraestructura presente en la zona (Nguyen et al., 2012). En este caso de estudio, el análisis realizado se basará principalmente en un modelo digital de superficie (MDS), calculado a partir de la nube de puntos LIDAR clasificada. Considerando la densidad de la nube de puntos el MDS resultante tiene un tamaño de celda de 1 m.

2.4.1. Superficie de tejados disponible

No todos los edificios tienen una distribución adecuada para el aprovechamiento de los sistemas

fotovoltaicos. Dependiendo de su situación, la radiación solar recibida puede variar considerablemente. Los módulos se instalan en los tejados planos sobre estructuras con una inclinación y orientación optimizada, mientras que en los tejados inclinados la posición de los módulos viene determinada por la forma del mismo. Para la determinación de la superficie útil disponible se ha llevado a cabo un análisis multicriterio booleano en el que se han considerado los siguientes factores: (1) Pérdidas de energía ocasionadas por la inclinación y orientación de los tejados; (2) superficie de los tejados afectada por sombras; (3) superficie de los tejados destinada al acceso a los módulos fotovoltaicos, y; (4) presencia de monumentos y edificios singulares.

Pérdidas de energía ocasionadas por la inclinación y orientación de los tejados.

La situación óptima de los módulos será aquella que permita maximizar la energía que es capturada por el sistema a lo largo del año. En este sentido, las pérdidas en la generación de energía debidas a la inclinación y orientación de los módulos fotovoltaicos no deben superar el 20%. Este criterio es el establecido en el 'Documento Básico HE5' del Código Técnico de la Edificación (MFOM, 2009) que calcula el porcentaje de pérdidas empleando diferentes ecuaciones según la inclinación de las cubiertas:

$$Pérdidas\ (\%) = 100 \cdot [1{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \emptyset + 10)^2 + 3{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2] \quad para\ 15° < \beta < 90° \qquad (1)$$

$$Pérdidas\ (\%) = 100 \cdot [1{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \emptyset + 10)^2] \quad para\ \beta \leq 15° \qquad (2)$$

Donde: α = Ángulo de acimut (orientación); β = Ángulo de inclinación (0° en orientación sur; -90° en orientación este; +90° en orientación oeste); $\emptyset$ = Latitud del lugar.

Superficie de los tejados afectada por sombras

En el diseño de instalaciones fotovoltaicas es importante evitar el sombreado, principalmente en las horas de mayor insolación, para aprovechar al máximo la producción de energía. Las superficies de tejados adecuadas para la instalación de sistemas solares serán aquellas que no estén afectadas por sombras en las cuatro horas centrales del día a lo largo de todo el año, suponiendo la hora solar verdadera.

En el análisis de las sombras hay que considerar elementos como la topografía del terreno, los edificios adyacentes, zonas arboladas, o cualquier otro elemento del entorno urbano circundante. La Genusa et al. (2011), para el cálculo de las sombras, utilizan la herramienta 'Hillshade' de ArcGIS que determina la iluminación de una zona partiendo de un modelo ráster de superficie, estimando si una zona está sombreada y las dimensiones de las sombras en un momento dado. En nuestro modelo (Figura 2), utilizando la misma herramienta, se han calculado los mapas de sombras de todos los días del año entre las 10 y 14 horas con un intervalo horario, basándose en los datos de posición de Sol proporcionados por 'SoDa Service'. Posteriormente se han combinado todos los mapas para obtener un mapa total de sombras anual.

Figura 2. Ejemplo de sombras generadas con la herramienta 'Hillshade'.

Superficie de los tejados destinada al acceso a los módulos fotovoltaicos

En la distribución de los módulos fotovoltaicos también hay que delimitar algunas zonas que faciliten el acceso a los módulos para realizar trabajos de mantenimiento y seguridad. Estas zonas suelen corresponder a una serie de caminos de acceso en tejados inclinados y una banda perimetral en tejados planos, considerando además un espacio alrededor de las chimeneas u otros elementos situados en los tejados. En este caso, se ha considerado una zona de influencia de 1 m de ancho únicamente alrededor de los

tejados como zona de acceso a los mismos.

Presencia de monumentos y edificios singulares

En muchas zonas urbanas se pueden localizar monumentos y edificios que, debido a su importancia histórica o la estructura y características de los mismos, no son apropiados para la colocación de módulos fotovoltaicos, por lo que una vez identificados estos edificios, se eliminan del cálculo de la superficie útil de tejados disponible. En el caso de estudio del municipio de Miraflores de la Sierra, la presencia de estos edificios no es numerosa pero hay que tener en cuenta a algunos de ellos.

2.4.2. Radiación

El Sol es una de las principales fuentes de energía. Debido a la complejidad de los entornos urbanos, existen diferentes factores que influyen en la distribución de la radiación limitando la producción de electricidad con esta fuente. La radiación solar que finalmente incide en la superficie del terreno está afectada por factores como las condiciones meteorológicas, la topografía, la presencia de obstáculos que proyectan sombras y las características de las superficies. Dependiendo de la forma en la que llega al terreno, la radiación está constituida principalmente por tres componentes:

- Radiación directa que llega a la superficie sin haber sufrido cambio alguno en su dirección.
- Radiación difusa originada por la dispersión debida a los agentes atmosféricos como las nubes o el polvo.
- Radiación reflejada por el suelo o por los objetos cercanos.

Para la estimación de la radiación solar existe la posibilidad de utilizar bases de datos climáticos como ADRASE[5] y PVGIS[6]. No obstante, una herramienta muy utilizada en la generación del mapa de radiación solar es la extensión 'Solar Analyst' de ArcGIS (Chaves y Bahill, 2010; Brito et al., 2012). Esta herramienta calcula la radiación global (directa + difusa) en una zona determinada para un periodo de tiempo específico (Figura 3). En el análisis se consideran la variación en la posición del Sol y el efecto de cualquier elemento topográfico, edificios y árboles definidos en el MDS de la zona, valorando también su pendiente y orientación.

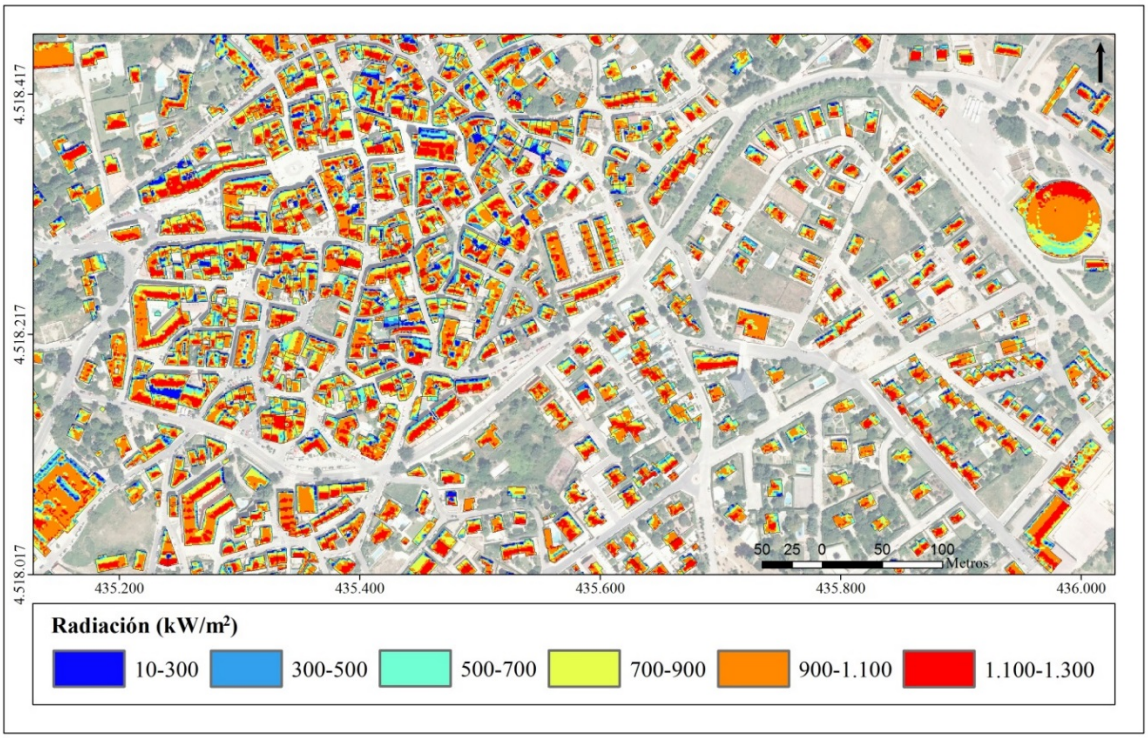

Figura 3. Radiación global anual. Miraflores de la Sierra.

[5] CIEMAT. ADRASE, datos de radiación solar de España. Disponible en http://www.adrase.es. [30 de abril de 2015].

[6] European Commission, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Disponible en http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis. [30 de abril de 2015].

También se han definido métodos de cálculo utilizando diferentes herramientas software. En el procedimiento desarrollado por Verso et al. (2014) se estudia la radiación incidente sobre los paneles fotovoltaicos considerando las sombras, inclinación y orientación de los tejados. Para ello, se utiliza un método geométrico de cálculo que parte de la radiación horizontal horaria descompuesta en sus componentes directa y difusa.

2.4.3. Potencia instalada y energía producida

La energía solar fotovoltaica transforma la luz solar directamente en electricidad mediante células solares que, combinadas y conectadas en una matriz de varias células, constituyen los módulos fotovoltaicos. Los principales modelos de células fotovoltaicas, en la actualidad, son los siguientes (EPIA, 2011):

- Células de cristal de silicio: Están formadas por una serie de láminas cortadas a partir de un único cristal de silicio (monocristalinas) o de un bloque formado de múltiples cristales de silicio (multicristalinas).
- Células de lámina delgada: Se forman depositando capas delgadas de material fotosensible sobre un sustrato flexible de vidrio, plástico o acero inoxidable.
- Otros tipos de células como las de concentración fotovoltaica que están formadas por lentes orientadas hacia el Sol, enfocan la luz sobre las células fotovoltaicas. Además, se están desarrollando células orgánicas (OPV), células híbridas sensibilizadas con colorante (DSSC) que utilizan moléculas orgánicas para absorber la luz solar y las células termo-fotovoltaicas (TPV) utilizadas en los sistemas de producción combinados de calor y electricidad.

Las tecnologías más comunes en el mercado para los edificios son las células de silicio (monocristalinas y multicristalinas) y las células de lámina delgada. Sólo un pequeño porcentaje de la cantidad de energía que llega del Sol en un día promedio se puede convertir en energía eléctrica mediante paneles solares fotovoltaicos. Cada tipo de módulo presenta valores de eficiencia propios (Tabla 1) que depende de diferentes factores como su temperatura, exposición al Sol directo, inclinación, orientación, etc. Los módulos monocristalinos tienen ligeramente mayor eficiencia y un coste superior que los módulos multicristalinos. Los módulos de lámina delgada son menos costosos pero tienen tasas de eficiencia menores, siendo necesaria una mayor superficie para la misma cantidad de potencia instalada.

Tabla 1. Eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICIOS		*EFICIENCIA*
Cristal de silicio	Si-monocristalino	16 %
	Si-multicristalino	15 %
Lámina delgada	CIS (Cobre/Indio/Seleniuro)	11 %
	Te Cd (Teluro/Cadmio)	10,5 %
	Silicio amorfo	6 %

Para la determinación de la potencia instalada y la energía generada se han creado dos herramientas que permiten escoger el tipo de módulo fotovoltaico para el que se quiere realizar el estudio. Dependiendo de la selección, el programa realizará los cálculos aplicando el valor de eficiencia correspondiente en cada caso según el tipo de módulo seleccionado.

La potencia instalada (Figura 4) es la capacidad de energía que puede generarse en condiciones ideales. En este trabajo, se calcula su valor para cada tecnología de módulos fotovoltaicos (en kWp) en una superficie determinada con la fórmula (Wiginton et al., 2010):

$$P = I_g \cdot e \cdot A_{PV} \tag{3}$$

Donde: P = Potencia instalada (kWp); I_g = Irradiación global = 1 kW/m^2 (en condiciones estándar de medida); e = Eficiencia de los módulos fotovoltaicos; A_{PV} = Superficie de tejado disponible.

La energía total anual producida (en kWh) se calcula a partir de la fórmula de Wiginton et al. (2010) modificada (Figura 4). Además de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos (e), otro coeficiente considerado es el rendimiento energético de la instalación o “Performance Ratio” (PR), el cual evalúa la calidad de una instalación incluyendo factores como las pérdidas por la temperatura, la eficiencia del cableado, la suciedad en la instalación, etc. La fórmula para determinar la energía será la siguiente:

$$E = I_A \cdot e \cdot A_{PV} \cdot PR \tag{4}$$

Donde: E = Energía anual (kWh); I_A = Irradiación solar global anual (kWh/m^2); e = Eficiencia de los módulos fotovoltaicos; A_{PV} = Superficie de tejado disponible; PR = Performance Ratio = 0,8[7].

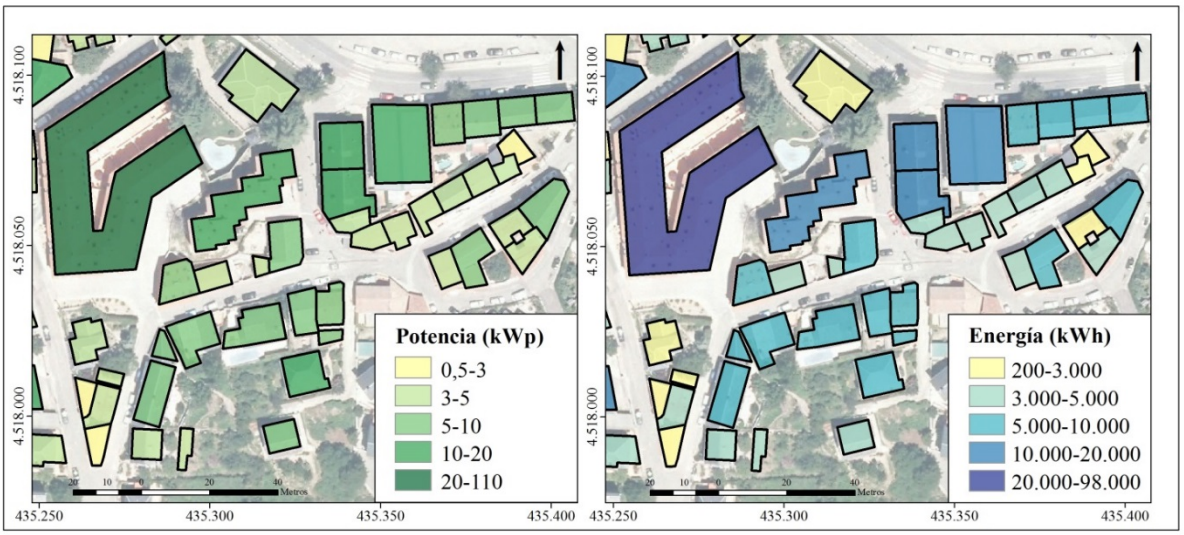

Figura 4. Potencia instalada y energía anual producida.

3. RESULTADOS

Para evaluar el modelo hemos realizado una primera prueba con el núcleo urbano de Miraflores de la Sierra. En la zona de estudio seleccionada se localizan numerosas viviendas unifamiliares que conforman un tejido urbano discontinuo con una densidad construida mayoritariamente media y baja. En una primera aproximación, el número total de edificios estudiado es de 2.849, de los cuales un 8,25 % dispone de tejados adecuados para instalaciones solares. Al realizarse el análisis la superficie de tejados resultante para instalar módulos fotovoltaicos es de 111.995 m^2, representando esta superficie disponible de un 29,27 % con respecto a la superficie en planta construida y un 2,65 % de la superficie total de la zona. Dependiendo de la concentración de edificios, la disponibilidad de tejados donde instalar sistemas solares varía considerablemente.

Como hemos visto, existen una gran variedad de paneles en el mercado diferenciados principalmente por el material del que están constituidos y con valores de eficiencia que oscilan entre el 16 % del tipo Si-monocristalino al 6 % del tipo Silicio amorfo. Una de las funciones que presenta este modelo es la opción de seleccionar varios tipos de módulos fotovoltaicos y poder calcular la potencia instalada y la energía generada para cada uno de ellos. Al poder comparar los resultados de las diferentes tecnologías, se podrá decidir cuál es la opción que más compensa teniendo en cuenta el coste de los módulos y la superficie disponible. Esta diferencia en la eficiencia proporciona unos resultados bastantes dispares según los tipos de módulos (Tabla 2). Se observa que los módulos de Silicio amorfo producirían un 37-39 % de la energía generada por los tipos de cristal de silicio y que con los módulos de lámina delgada (CIS y Te Cd) superaría incluso el 50 %. Al no presentar los mismos valores de eficiencia con algunos módulos se necesitará una mayor superficie para obtener una misma producción de electricidad.

En el desarrollo del modelo se ha observado que la densidad de la nube de puntos afecta a la definición de los tejados, limitando la precisión de los resultados obtenidos. Cuando los tejados no son homogéneos y tienen un cierto grado de complejidad, es decir, en un edificio aparecen diferentes alturas o son tejados que disponen de más de dos vertientes, la definición de los planos que los constituyen será menor al no disponer de suficientes puntos para delimitarlos.

Finalmente, el modelo desarrollado no sólo realiza cálculos globales para una zona de estudio determinada, además proporciona como resultado final los datos individuales de cada uno de los edificios (Figura 5). Seleccionando los edificios se puede obtener una relación de los valores de superficie, potencia instalada y energía generada para cada uno de ellos.

[7] Se aplicará un valor de PR que supone una disposición óptima del sistema sin pérdidas por sombras.

Tabla 2. Potencia instalada y energía producida. Núcleo urbano de Miraflores de la Sierra.

MÓDULO FOTOVOLTAICO	*EFICIENCIA (%)*	*POTENCIA INSTALADA (kWp)*	*ENERGÍA (MWh/año)*
Si-Monocristalino	16	17.922,23	15.450,19
Si-Multicristalino	15	16.802,10	14.484,55
CIS	11	12.321,54	10.622,01
Te Cd	10,5	11.791,67	10.139,19
Silicio amorfo	6	6.720,84	5.793,82

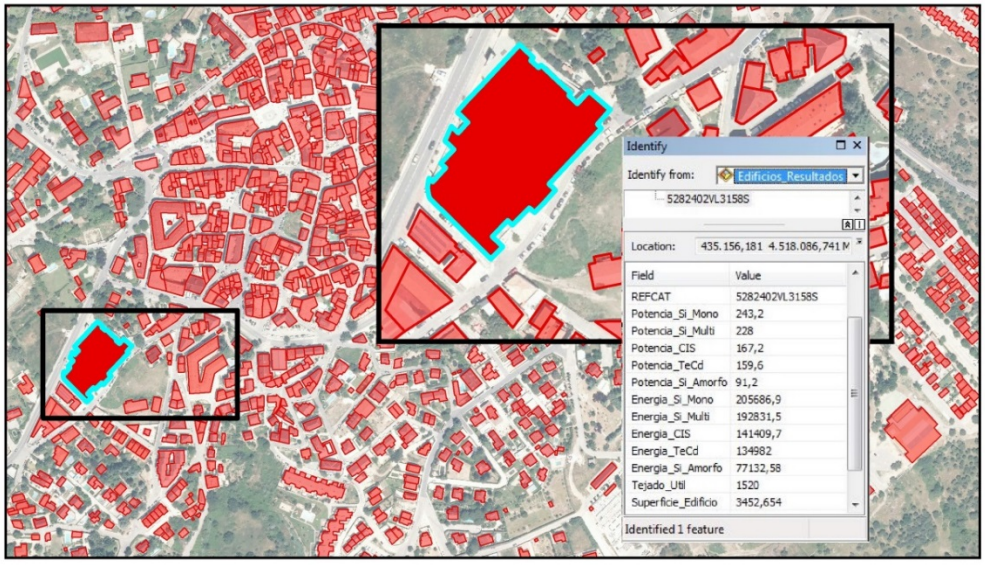

Figura 5. Resultados a escala de edificio.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos desarrollado un modelo con ArcGIS que nos permite analizar cuáles son las zonas de mayor aptitud para la instalación de sistemas fotovoltaicos y realizar una aproximación sobre la energía producida. Una característica de este modelo es la utilización de nubes de puntos LIDAR como base para definir la distribución de la estructura urbana. La implantación de energía fotovoltaica en estas áreas necesita analizar diferentes parámetros que requieren un adecuado modelo tridimensional adaptado a las diferentes tipologías de los edificios. En este sentido, la aplicación de SIG y sensores remotos se ha mostrado como una herramienta muy útil que ofrece excelentes resultados.

En la determinación de la idoneidad de los tejados se han analizado variables que establecen la posición de los mismos, la radiación que reciben y las tecnologías de generación fotovoltaica por las que se puede optar. Una característica de este modelo es la estimación de las sombras a lo largo del año, ocasionadas no sólo por los edificios, sino también por los árboles presentes en la zona. La morfología de las masas arbóreas es determinante en la radiación incidente sobre los tejados y resultaría interesante conocer como varía dependiendo de la época del año, identificar las diferentes especies y analizar el ciclo fenológico de las mismas.

Un aspecto a tener en cuenta es la densidad de los datos LIDAR. Su resolución puede limitar la definición de los tejados y en especial cuando se trata de entornos complejos con numerosos elementos que identificar. La adquisición de nubes de puntos más densas, si fuera necesario con vuelos exprofeso, permitirá la creación de mejores modelos urbanos 3D. La delimitación del contorno de los tejados sería más exacta y se podrían identificar objetos situados en los tejados que normalmente se generalizan como las chimeneas, antenas y sistemas de climatización.

Aunque la caracterización detallada del entorno urbano es un objetivo fundamental en el estudio del potencial fotovoltaico, además de aumentar la definición de la nube de puntos, en el futuro se podrían añadir nuevos parámetros que mejorarían la precisión de los resultados obtenidos. Existen factores climáticos que también pueden influir en la determinación del potencial, como el efecto de los cambios en la temperatura y la influencia de las masas de aire. Otras mejoras podrían incluir estudios de población para calcular la

producción de energía per cápita, demanda de energía y datos económicos con los que estimar el tiempo necesario para recuperar la inversión realizada.

Cuando la tendencia es crear ciudades más sostenibles, el análisis geográfico del potencial fotovoltaico debe de ayudar a programar acciones que integren el diseño de las ciudades. En este sentido, el acceso a este tipo de información, ofrece la oportunidad de fomentar el mercado de las energías renovables, además de colaborar con las administraciones públicas a desarrollar acciones encaminadas a estimular su crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este proyecto ha contado con la colaboración del Excelentísimo Ayuntamiento de Miraflores de la Sierra (Madrid). Así mismo, la permanente colaboración del Doctor Julio Amador Guerra, Catedrático del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Física Aplicada de la ETSIDI de la Universidad Politécnica de Madrid, ha sido y es fundamental en la determinación de todos los aspectos tecnológicos vinculados a la implementación de la tecnología fotovoltaica. Igualmente queremos agradecer la disponibilidad y colaboración de los investigadores de la División de Energías Renovables del CIEMAT.

5. BIBLIOGRAFÍA

Bergamasco, L., Asinari, P. (2011): "Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Further improvements by ortho-image analysis and application to Turin (Italy)". Solar Energy, 85, 2741-2756.

Brito, M.C., Gomes N., Santos T., J.A. Tenedórico J.A. (2012): "Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LIDAR data". Solar Energy, 86, 283-288.

Chaves A., Bahill T. (2010): "Locating Sites for Photovoltaic Solar Panels: Pilot study uses DEM derived from LIDAR". ArcUser: The Magazine for Esri Sortware User, 13, 24-27.

European Photovoltaic Industry Association (EPIA), Greenpeace (2011): "Solar Generation 6. Solar photovoltaic electricity empowering the World".

Gooding, J., Edwards, H., Giesekam, J., Crook, R. (2013): "Solar City Indicator: A methodology to predict city level PV installed capacity by combining physical capacity and socio-economic factors". Solar Energy, 95, 325-335.

Izquierdo, S., Rodrigues, M., Fueyo, N. (2008): "A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations". Solar Energy, 82, 929-939.

La Gennusa, M., Lascari, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., Sorrentino, G. (2011): "A model for predicting the potential diffusion of solar energy systems in complex urban environments". Energy Policy, 39, 5335-5343.

Martín Ávila, A.M. (2014): "Modelo geográfico para la estimación del potencial fotovoltaico en tejados. Caso de estudio: Miraflores de la Sierra". [MsC]. Universidad Complutense, 82 p. Disponible en http://eprints.ucm.es/25543/. [30 de Abril de 2015].

Ministerio de Fomento (2009): "Código Técnico de la edificación. Documento Básico HE. Ahorro de Energía".

Nguyen, H.T., Pearce, J.M., Harrap, H., Barber, G. (2012): "The application of LIDAR to assessment of rooftop solar photovoltaic deployment potential in a municipal district unit". Sensors, 12, 4534-4558.

Unión Europea (2010): "Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios". Diario Oficial de la Unión Europea, L153, 13-35.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2014): "World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights".

Verso, A., Martín A., Amador, J., Domínguez, J. (2015). "GIS-based method to evaluate the photovoltaic potential in the urban environments: The particular case of Miraflores de la Sierra". Solar Energy.

Wiginton, L.K., Nguyen, H.T., Pearce, J.M. (2010): "Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy". Computers, Environment and Urban Systems, 34, 345-357.