

# Análisis de Metodologías de Identificación de Zonas de Exclusión para Estudios de Potencial de Energía Eléctrica Termosolar (CSP)

P. Domínguez  
L. Ramírez  
A. A. Navarro  
J. Polo  
E. Zarza





Análisis de Metodologías  
de Identificación de Zonas  
de Exclusión para Estudios  
de Potencial de Energía  
Eléctrica Termosolar (CSP)

P. Domínguez

L. Ramírez

A. A. Navarro

J. Polo

E. Zarza



Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Catálogo general de publicaciones oficiales  
<http://www.060.es>

**Depósito Legal:** M -26385-2011

**ISSN:** 1135 - 9420

**NIPO:** 721-13-064-2

Editorial CIEMAT

## CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S14

SOLAR ENERGY; SOLAR CONCENTRATORS;  
GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS; SOLAR POWER PLANTS;  
ELECTRIC GENERATORS

**Análisis de Metodologías de Identificación de Zonas de Exclusión para Estudios de Potencial de Energía Eléctrica Termosolar (CSP).**

Domínguez, P.; Ramírez, L.; Navarro, A. A.; Polo, J.; Zarza, E.

61 pp. 31 figs.28 ref. 16 tablas

**Resumen:**

El objetivo del presente estudio es la propuesta de una metodología válida y única para cualquier territorio del potencial de generación eléctrica solar, reduciendo subjetividad y posibilitando la comparación de resultados, a partir del examen de varias metodologías existentes llevadas a cabo en estudios de potencial de generación de electricidad para plantas solares termoelectricas (CSP), en concreto los elaborados por el Instituto para la diversificación y el ahorro de la Energía (IDAE), Greenpeace, National renewable energy laboratory (NREL) y Centro aeroespacial alemán (DLR). Posteriormente, se aplican y se comparan los resultados obtenidos con las centrales ya instaladas, dando idea de la idoneidad de cada metodología para su localización en zonas consideradas aptas.

**Analysis of Methodologies for Identifying Exclusion Zones for Concentrating Solar Power (CSP).**

Domínguez, P.; Ramírez, L.; Navarro, A. A.; Polo, J.; Zarza, E.

61 pp. 31 figs.28 ref. 16 tables

**Abstract:**

The aim of this study is the proposal of a valid and unique methodology to any territory of the potential for solar power generation, reducing subjectivity and enabling comparison of results from the examination of several existing methodologies for CSP, particularly those developed by the Institute for diversification and saving of Energy (IDAE), Greenpeace, National renewable energy laboratory (NREL) and the German Aerospace Center (DLR). Subsequently, we apply and compare the results obtained with those already installed CSP plants, giving an idea of the suitability of each methodology to locate plants in areas considered suitable.



## Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	4
3. CONCEPTOS PREVIOS .....	6
3.1. La energía solar .....	6
3.2. Centrales solares termoelectricas .....	8
3.2.1. Canales parabólicos.....	8
3.2.2. Receptor central.....	9
3.2.3. Receptores lineales tipo Fresnel .....	9
3.2.4. Sistema de disco Stirling .....	10
3.3. Imágenes de satélite y radiación solar .....	10
3.4. Sistemas de Información Geográfica (SIG) .....	11
4. METODOLOGÍA APLICADAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS .....	13
4.1. Metodologías de identificación de las zonas de exclusión .....	13
4.1.1. Metodología IDAE .....	13
4.1.2. Metodología de Greenpeace. ....	16
4.1.3. Metodología NREL .....	18
4.1.4. Metodología DLR.....	18
4.2. Metodología de cálculo de la electricidad producida por m <sup>2</sup> .....	20
4.2.1. Mapa de radiación directa normal .....	20
4.2.2. Modelo simplificado de cálculo de la electricidad .....	22
4.3. Herramientas necesarias para el análisis. ....	23
4.3.1. CORINE Land Cover. ....	23
4.3.2. Modelos Digitales del Terreno (MDT).....	24
4.3.3. ArcGIS.....	24
5. APLICACIÓN A ESPAÑA DE LAS METODOLOGÍAS .....	25
5.1. Aplicación de la metodología IDAE .....	25
5.2. Aplicación de la metodología Greenpeace. ....	27
5.3. Aplicación de la metodología NREL. ....	29
5.4. Aplicación de la metodología DLR. ....	32
5.5. Resultado de las metodologías analizadas.....	36

6.	VALIDACIÓN DE LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE EXCLUSIÓN.....	38
6.1.	Localización de las centrales.....	38
6.2.	Análisis SIG de las centrales.....	39
7.	NUEVA METODOLOGÍA DE ZONAS DE EXCLUSIÓN.....	43
7.1.	Descripción de la nueva metodología.....	43
7.2.	Resultados de la nueva metodología.....	44
7.3.	Validación de la identificación de zonas de exclusión para la nueva metodología.....	46
8.	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD TERMOSOLAR.....	49
8.1.	Cálculo de la energía producida por m <sup>2</sup> .....	49
8.2.	Resultados y mapas.....	50
9.	CONCLUSIONES.....	58
10.	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES.....	60

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un continuado crecimiento de las energías renovables debido al aumento de la preocupación por el cambio climático, y a la necesidad de reducir la dependencia energética del exterior. La obligación de estar preparados para la progresiva escasez de petróleo y el aumento de su precio es otro de los factores que promueven este cambio.

La dependencia energética es el principal problema de nuestro sistema energético a medio y largo plazo, las importaciones de combustibles fósiles desequilibran nuestra balanza comercial y lastran la economía española. La generación de electricidad mediante fuentes de energía renovable permite sustituir la producción mediante combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural, contribuyendo a que España reduzca sus importaciones de estos combustibles de forma relevante. [APPA, 2011].

Otro factor importante para el impulso de las energías renovables es la posibilidad de desarrollar y hacer crecer empleo ligado a estos sectores. Los “empleos verdes” se han convertido en un emblema de una economía y sociedad más sostenible, capaz de conservar el medio ambiente para las próximas generaciones. [UNEP, 2008].

En cuanto al cambio climático, la generación de electricidad mediante energías renovables contribuye a evitar la emisión de millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Además, en términos económicos se consigue el ahorro de importantes sumas de dinero por los derechos de emisiones de CO<sub>2</sub>. [APPA, 2011]. España posee una gran abundancia de recurso solar y eólico que debería ser aprovechado, sin embargo, en estos años de crisis económica la apuesta de España por las energías renovables se ha debilitado, lo que ha puesto en peligro la viabilidad de muchas empresas y ha llevado a la pérdida de la posición de liderazgo internacional que el país había alcanzado en dicho sector.

Con el desarrollo de estas tecnologías está en juego la utilización de centrales de generación eléctrica respetuosa con el medio ambiente que sean capaces de sustituir a otras centrales mucho más contaminantes. Pero además de esto, nuestras empresas se colocarán en una posición de ventaja en el mercado internacional que se está abriendo, lo que es una enorme oportunidad para la creación de riqueza y empleo de calidad.

Dentro de la energía solar termoeléctrica (*CSP Plants* en inglés) existen diversas tecnologías, unas ya consolidadas, y otras, en las que todavía queda un largo camino de investigación y desarrollo para alcanzar los niveles de eficiencia que ya se han conseguido con las tecnologías más maduras. La energía solar termoeléctrica transforma la radiación solar en energía térmica para después convertirla en electricidad. Más adelante se explicará más detalladamente esta tecnología y sus distintas formas.

## 2. OBJETIVOS

Las innovaciones que se están produciendo en los mapas de radiación solar y de los modelos de cálculo de producción de electricidad a partir de dichos mapas, están haciendo posible un crecimiento del mercado de la energía solar, ya que con mejor información, se toman mejores decisiones y ello minimiza el riesgo de la inversión, localizando con gran precisión los lugares en los que la producción sería mayor. Todo ello, combinado con el uso de los SIG para establecer las zonas aptas, contribuye al crecimiento del mercado de la energía solar.

Desde el CIEMAT se viene investigando en la mejora de la estimación de la radiación solar y de la producción de energía solar que dicha radiación produciría. En este trabajo utilizaremos los mapas de producción de energía eléctrica solar derivados de los mapas de radiación, para calcular el potencial de energía eléctrica de origen solar que se podría producir en España. Para obtener resultados más realistas del potencial que el cálculo bruto sobre todo el territorio hacemos uso de los SIG para seleccionar las áreas que consideramos no aptas para la instalación de centrales solares termoeléctricas.

Para la realización de este trabajo se ha tomado como punto de partida el documento titulado “Diseño de la hoja de ruta Andalucía-Marruecos para el impulso de la energía solar termoeléctrica” el cual fue desarrollado en el contexto del proyecto SOLEFEX. El proyecto SOLEFEX tiene por objetivo impulsar las tecnologías de concentración solar en Marruecos para aprovechar el enorme potencial solar disponible y favorecer la creación de empleo en el ámbito de la energía solar, entre otros objetivos. Puede encontrarse más información en la dirección <http://www.solefex.org/>. En el documento mencionado anteriormente se hace una evaluación de la radiación solar realizándose mapas de radiación y del consiguiente potencial de generación de energía eléctrica producida por centrales termosolares en Marruecos. Se hace una distinción entre potencial total y potencial disponible, haciendo uso de un SIG para descartar zonas no aptas usando el Global Land Cover 2000.

En una primera fase, para que un gobierno o una empresa estén seguros del potencial solar de una región y decidan invertir en centrales termosolares, se necesita un estudio como el llevado a cabo por el proyecto SOLEFEX para Marruecos. Así pues, es importante disponer de un análisis que proporcione una visión del potencial de energía que podría generarse para abordar la planificación energética de un país. Sin embargo, la principal carencia de este informe, es que el estudio SIG llevado a cabo es insuficiente y repercute en los resultados del potencial de generación eléctrica final.

Para que se puedan obtener resultados fiables y válidos se hace necesario llevar a cabo un análisis más exhaustivo con Sistemas de Información Geográfica. Con ello, al realizarse estudios del potencial de generación eléctrica solar en cualquier territorio se podría utilizar una metodología común de clasificación de zonas aptas con SIG, que reduciría la subjetividad de dichos estudios. Además, sería posible comparar el potencial que poseen diferentes territorios para la implantación de esta tecnología.

Se pretende realizar un análisis con SIG que en una primera fase de estudio, clasifique correctamente cualquier territorio para obtener una medida válida del potencial de generación eléctrica solar. Utilizaremos España como el territorio donde se llevará a cabo el análisis ya que es el que mejor conocemos. Tras el estudio, elegiremos una metodología para llevar a cabo un análisis SIG, que podrá realizarse en cualquier territorio, consiguiéndose información de los potenciales comparables entre sí.

Hay diferentes organizaciones que han realizado estudios de potencial de generación de electricidad de centrales termosolares. Cada una de estas organizaciones mide el potencial de un territorio aplicando un análisis SIG diferente lo que lleva a resultados difícilmente comparables. Por ello nos hemos propuesto realizar un análisis comparativo de estas diferentes metodologías de clasificación con SIG, que han sido usadas para los análisis del potencial.

En el presente proyecto analizaremos los estudios realizados por:

- El Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE).
- Greenpeace.
- El “National Renewable Energy Laboratory” (NREL).
- El Centro Aeroespacial Alemán (DLR).

Aplicaremos en España las distintas metodologías, y compararemos los resultados obtenidos con las centrales ya instaladas. Con ello, nos haremos una idea de la fiabilidad de cada metodología para situar las centrales ya instaladas en zonas consideradas aptas. A mayor número de centrales situadas en zonas no excluidas y mayor área excluida, mayor es la capacidad de dicha metodología de diferenciar las zonas realmente aptas de las no aptas y así, el mapa final del potencial de energía solar será más exacto.

Este proyecto servirá por tanto, para realizar con más precisión y unificar los criterios de los análisis SIG para el estudio del potencial de generación eléctrica solar. Así, se conseguirán análisis del potencial más acertados que ayudarán a impulsar las tecnologías de concentración solar.

Destacan por tanto los siguientes objetivos concretos del trabajo:

- Aplicar a un mismo territorio distintas metodologías de identificación de zonas de exclusión y deducir si los resultados de potencial al que inducen son comparables entre sí.
- Analizar la idoneidad de dichas metodologías y seleccionar la más adecuada
- Proponer una nueva a partir del análisis de los resultados obtenidos.
- Disponer de una metodología única que pueda aplicarse a cualquier territorio, reduciendo la subjetividad y posibilitando la comparación de los resultados.

### 3. CONCEPTOS PREVIOS

En este apartado se presentan los antecedentes o conocimientos previos más relevantes, relacionados con los trabajos realizados.

#### 3.1. La energía solar

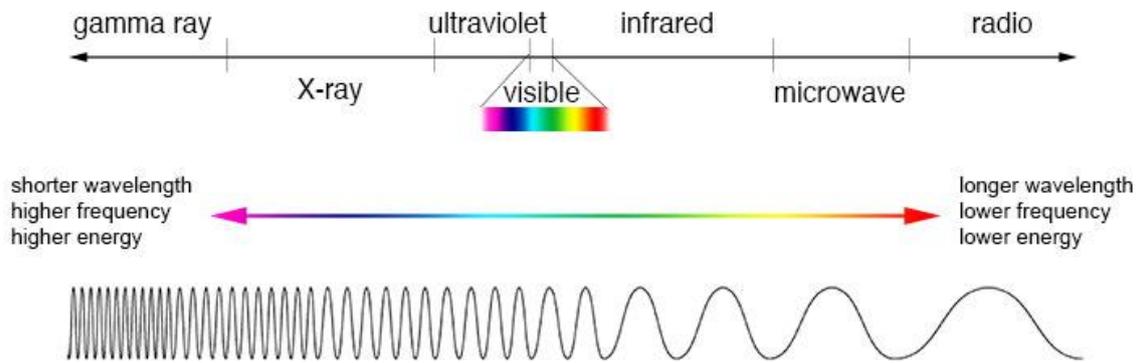
Podemos definir las energías renovables como aquella que, administrada de forma adecuada, puede explotarse ilimitadamente, es decir, su cantidad disponible en la Tierra no disminuye a medida que se aprovecha [Fernández, 2009]. Ejemplos de energías renovables son la energía eólica, solar, hidráulica, la geotérmica, etc.

Por otro lado, las energías no renovables son aquellas que se obtienen a partir de acumulaciones “estáticas” de energía, que permanecen fijas hasta que se liberan por los seres humanos [González, 2009]. Las reservas disponibles dependen de factores técnicos y económicos, del descubrimiento de nuevos yacimientos y al ritmo de extracción y consumo. Las principales fuentes de energía no renovables son el carbón, el petróleo, el gas natural y la energía nuclear. [Fernández, 2009].

Una vez que se consigue obtener energía, en muchos casos, dicha energía se transforma en otra forma de energía: la energía eléctrica. La energía eléctrica tiene la ventaja de que es de fácil transporte a través del cableado. La mayoría de las energías se transforman en electricidad a través de diversos procedimientos que producen energía mecánica y finalmente electricidad. [Roldán, 2008].

El sol es la mayor fuente de energía de la que disponemos, emite energía debido a la fusión termonuclear (formación de átomos de helio por la fusión de hidrógeno a altas temperaturas). Estas reacciones, que tienen lugar en su centro, se transmiten por convección a su superficie, donde se libera la radiación solar y llega hasta nuestro planeta [Madrid, 2009].

La radiación es la transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas, se produce desde la fuente hacia fuera en todas direcciones y no requiere medio material para su propagación. [Ortega, 2003].



**Figura 1. Espectro electromagnético. Fuente: Nasa [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov).**

Las ondas electromagnéticas pueden tener diferentes longitudes de onda. El conjunto de todas las longitudes de onda es lo que se denomina espectro electromagnético.

El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio [Astrofísica y física, 2012].

La fracción del espectro electromagnético que nuestros ojos pueden percibir se denomina “luz”.

La radiación solar que llega a la superficie de la tierra está compuesta mayoritariamente por luz visible, pero además tiene aportaciones en la franja del ultravioleta y del infrarrojo cercano.

La radiación electromagnética procedente del Sol interacciona con las moléculas de los gases componentes de la atmósfera, dando lugar a la absorción y la dispersión [González, 2009]. Debido a esto, en la superficie de la Tierra encontramos los siguientes tipos de radiación:

- Radiación directa: Formada por los rayos procedentes del Sol que inciden directamente y sufren dispersión alguna antes de llegar a la tierra. Esta radiación procede del disco solar y representa el 90% de la radiación en un día claro.
- Radiación difusa: Formada por los rayos procedentes del sol que son dispersados y reflejados al pasar por la atmósfera.
- Radiación del albedo o reflejada: Es la procedente de la reflexión de la radiación solar en edificios, montañas, lagos o el mismo suelo.
- Radiación global: Es la suma de las componentes directa, reflejada y difusa. Al ser el total de la radiación que llega a la superficie es la más fácil de medir y de la que más datos se disponen. A partir de ella se calcula el índice de transparencia de la atmósfera [Ortega, 2003].

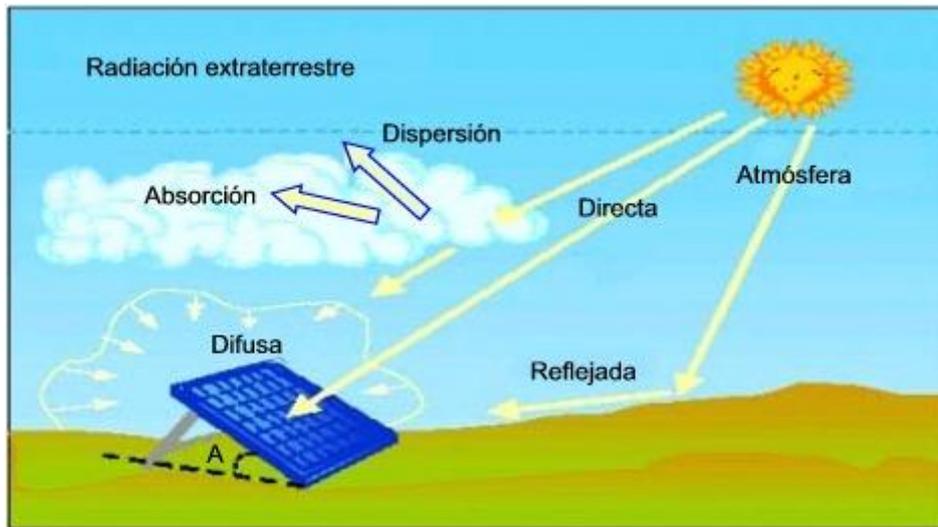


Figura 2. Tipos de radiación. Fuente: [www.ecopotencia.com](http://www.ecopotencia.com).

Dependiendo de la tecnología solar que se estudie, ésta será capaz de transformar en energía la radiación global recibida, o solamente la radiación directa.

### 3.2. Centrales solares termoeléctricas

La energía solar se aprovecha de diferentes formas, por ejemplo, para obtener calor para la calefacción o el agua caliente, pero cuando hablamos de centrales termosolares, nos referimos a las centrales solares termoeléctricas con las que se transforma la energía de la radiación solar en electricidad [Protermosolar, n.d].

Esta tecnología se basa en concentrar mediante espejos la radiación solar directa en un punto o línea, por cuyo interior circula un fluido, ese fluido transfiere su calor a otro fluido como puede ser el agua, que se evapora y pasa a una turbina que produce la energía eléctrica [Madrid, 2009] [Protermosolar, n.d].

Actualmente existen cuatro tipos de tecnologías termosolares. Cada una de ellas se encuentra en distintas fases de desarrollo e implantación.

#### 3.2.1. Canales parabólicos

Los sistemas de concentración solar son sólo prácticas en regiones del mundo relativamente libres de nubes donde la mayor parte de la radiación solar es directa. Esto es debido a que los espejos que utilizan no pueden concentrar la radiación difusa [Moselle, 2010].

La tecnología más extendida y madura es la de las centrales termosolares de canales parabólicos. [Protermosolar, n.d]. Consiste en unos espejos semicirculares que reflejan la luz solar en un canal central de forma cilíndrico-parabólico, donde se encuentra el fluido. Para conseguir la máxima eficiencia los espejos solares siguen al sol en su movimiento a lo largo del día [Madrid, 2009].

El fluido que circula por el interior del canal, que suele ser un aceite sintético, se calienta a casi 400° C. Después este aceite se hace pasar por un intercambiador de calor en contracorriente con agua, que se calienta transformándose en calor de alta presión. Este vapor a presión se utiliza para mover turbinas y producir electricidad [Madrid, 2009].

Los cálculos de producción eléctrica que vamos a utilizar están desarrollados para este tipo de plantas, que son las más comunes en nuestro país.



**Figura 3. Planta solar de canales parabólicos. Fuente: Protermosolar.**



**Figura 4. Planta solar de receptor central. Fuente: Protermosolar.**

### **3.2.2. Receptor central**

La tecnología de receptor central o torre con campo de helióstatos es ligeramente diferente a la anterior. Mientras que la tecnología de canales parabólicos utiliza un colector a lo largo de todos los espejos, esta tecnología concentra el calor en un único punto central. Ello se lleva a cabo en un intercambiador de calor ubicado encima de una torre [Fernández, 2009]

La torre está situada en el centro de un campo de espejos llamados helióstatos, que están programados para mantener la fuente de luz en el receptor de la torre. En lo alto de la torre se sitúa el receptor, que contiene tubos a través de los cuales circula el fluido absorbente, que una vez caliente es llevado a un intercambiador de calor para generar vapor para la turbina [Madrid, 2009].

### **3.2.3. Receptores lineales tipo Fresnel**

La tecnología de receptores lineales tipo Fresnel sigue un enfoque similar a la cilindro-parabólica, ya que consiste en reflectores que centran la radiación en tubos receptores por los que fluye un líquido. La diferencia es que la Fresnel emplea varios espejos largos y ligeramente curvados, situados debajo con un tubo receptor que se eleva por encima de los espejos y que está fijo.

Las principales ventajas de los sistemas termosolares Fresnel en comparación con los cilindro-parabólicos, son que los colectores pueden emplear espejos de vidrio planos más baratos y que la estructura de las plantas es más ligera y más barata de construir [CSP today,

2012]. Esta tecnología junto con la de discos parabólicos con motores Stirling está empezando a entrar en la fase comercial [Protermosolar, n.d].



**Figura 5. Planta solar de receptores lineales tipo Fresnel. Fuente: Protermosolar.**



**Figura 6. Receptor de disco parabólico con motor Stirling. Fuente: Protermosolar.**

#### **3.2.4. Sistema de disco Stirling**

Los discos parabólicos han evolucionado hacia la construcción de unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco. El motor Stirling surgió en el siglo XIX intentando conseguir un motor que hiciera competencia a la máquina de vapor, con mejor rendimiento y seguridad. El motor funciona con un gas caliente convirtiendo calor en energía mecánica. Por ejemplo en la Plataforma Solar de Almería, se utilizan discos parabólicos que concentran los rayos del sol sobre un motor Stirling, suministrándole el calor necesario para que se ponga en funcionamiento. La energía mecánica obtenida con este motor se transforma en electricidad mediante un generador [Fernández, 2009].

### **3.3. Imágenes de satélite y radiación solar**

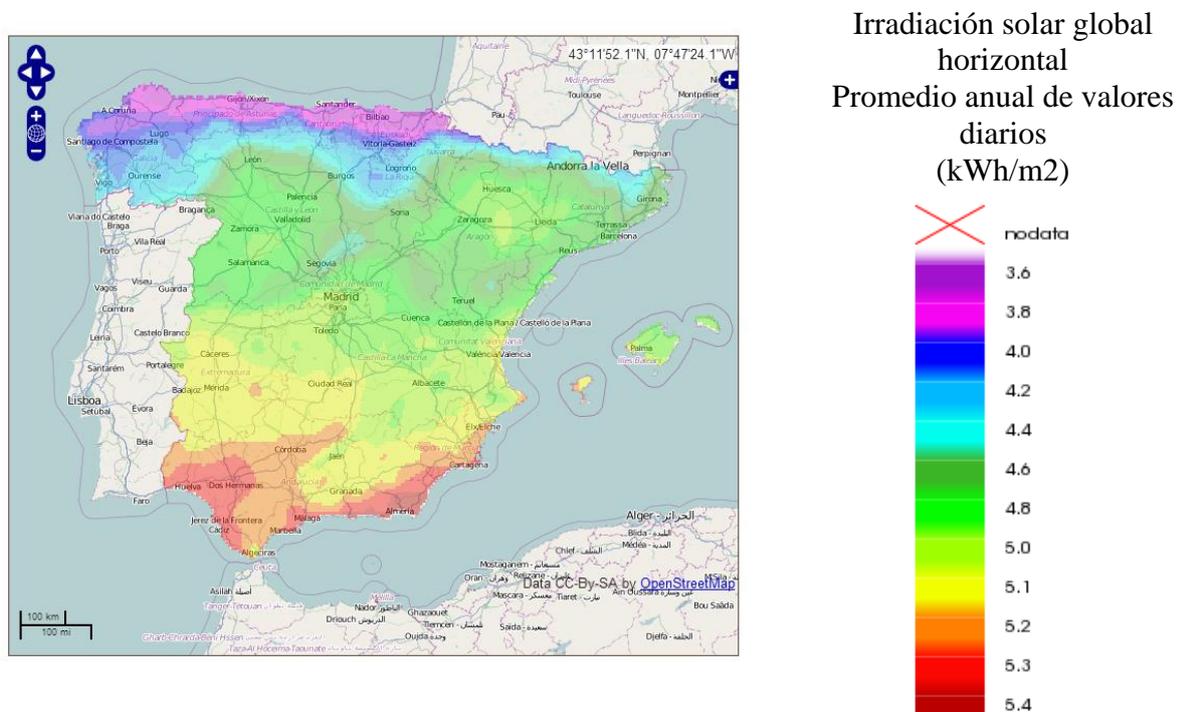
La radiación solar es un fenómeno global que alcanza todos los rincones del planeta. Para medir esta radiación existen estaciones de medida repartidas por todo el mundo. Sin embargo, a través de estas estaciones, no es posible obtener suficientes datos como para elaborar mapas de radiación de todo el territorio que proporcionen una medición óptima que pueda ser utilizada en la toma de decisiones.

Es por ello, que desde que se pudo comenzar a estudiar la radiación solar en base a medidas hechas por satélites geoestacionarios, se observó que ésta era la forma más eficiente para la medición de las distintas componentes del recurso solar [Zelenka, 1999], [Vignola, 2007], [Hoyer-Klick, 2009].

Sin embargo, aunque la forma óptima de medida de la radiación solar en amplios territorios sea a través del uso de satélites, las estaciones de medida siguen teniendo utilidad. Esto se debe a que las medidas que toman en los lugares concretos donde se encuentran presentan una mayor precisión que las mediciones satelitales. De esta forma, se combinan ambas técnicas de

medida y las estaciones actúan como puntos de referencia para la validación de los resultados obtenidos con las mediciones hechas con los satélites geoestacionarios.

Uno de los principales factores que condicionan la radiación solar es el estado de la atmósfera debido a la presencia o no de nubes. Las mediciones hechas con satélites permiten conocer cuál es el estado de la atmósfera para cada punto en cada momento, ya que a mayor presencia de nubes menor cantidad de radiación alcanza la superficie terrestre. La radiación global es la suma de las componentes directa y difusa. Es la más fácil de medir y de la que se disponen más datos. A partir de ésta es como se calcula la radiación directa. En nuestro estudio utilizaremos mapas de radiación directa para el cálculo del potencial que han sido obtenidos a partir de mapas de radiación global horizontal siguiendo la metodología descrita por [Polo, 2012].



**Figura 7. Mapa de radiación solar global de España a partir de imágenes de satélite. [Adrased, 2013].**

### 3.4. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una nueva tecnología que forma parte del ámbito más extenso de los Sistemas de Información. El contexto general en el que surgen es el de la “sociedad de la información”, en la que resulta esencial la disponibilidad rápida de información, para resolver problemas y contestar a las preguntas de modo inmediato. [Gutiérrez, 2000]. Los SIG son un tipo especial de sistemas de información que no solo

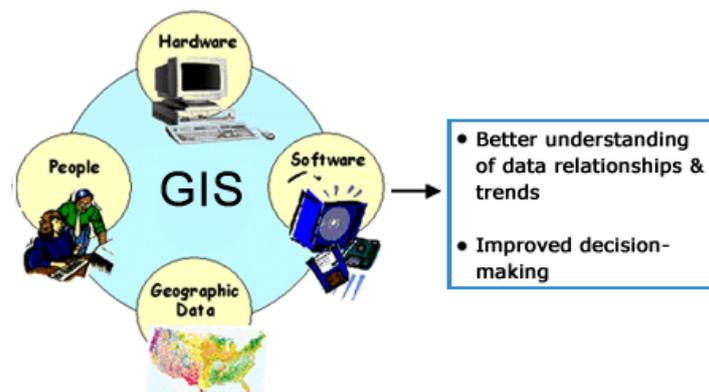
almacena información sobre cualquier acontecimiento o actividad sino que también registra dónde dicha actividad ha ocurrido. [Longley, 2002].

En ese contexto, los sistemas de información geográfica (SIG), se han posicionado como una tecnología imprescindible para capturar, almacenar, manipular y presentar datos referenciados espacialmente. Un SIG no es meramente un programa para hacer cartografía por ordenador, ni un *software* tipo CAD. Aunque hace mapas y tiene ciertas funciones para dibujar, lo que hace de un SIG una herramienta potente e innovadora es su capacidad para almacenar grandes cantidades de información geo-referenciada y su potencia de análisis de dicha información que le permiten abordar problemas relacionados con la gestión del territorio. [Moreno, 2007]

Existen muchas definiciones de lo que son los Sistemas de Información Geográfica, una posible definición es: “Conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permiten la gestión de datos organizados en una base de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas”, [Moldes, 1995].

La utilidad de los SIG es enorme, y cada vez surgen más ámbitos de aplicación de esta tecnología. Por enunciar alguna de las aplicaciones más importantes, cabe mencionar el estudio de los usos del suelo, la distribución de la población para fines comerciales, o la distribución espacial de fenómenos de contaminación. Otras posibles aplicaciones pueden ser el estudio de cambios ocurridos en el territorio entre dos fechas, las rutas óptimas a seguir en cualquier desplazamiento, y muchas otras aplicaciones.

Por ello los SIG son una herramienta muy potente al servicio de la sociedad, que proporciona herramientas que permiten mejorar la gestión territorial facilitando la toma de decisiones.



**Figura 8. . Sistemas de Información Geográfica. Fuente: U.S. Environmental Protection Agency (EPA).**

## 4. METODOLOGÍA APLICADAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

### 4.1. Metodologías de identificación de las zonas de exclusión

Como se ha explicado anteriormente, hay importantes organizaciones que han realizado estudios del potencial de generación de electricidad de centrales termosolares aplicando los SIG. Vamos por ello, a revisar las diferentes soluciones adoptadas por éstas para el estudio del potencial de generación solar de un territorio.

#### 4.1.1. Metodología IDAE

El Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE), organismo público cuyo cometido es contribuir a los objetivos de mejora de la eficiencia energética y energías renovables, ha desarrollado su propia metodología para evaluar el potencial de energía solar termoelectrica en España. En los siguientes puntos se especifican las zonas excluidas. Fuente [IDAE, 2011].

- Espacios Naturales Protegidos: Lugares de Importancia Comunitaria (LICS), Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAS), Parques Nacionales, Parques Naturales y otras áreas de protección medioambiental según la base de datos BCN200 del Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Hidrografía: Masas de aguas naturales o artificiales de más de 1.600 m<sup>2</sup>: embalses, lagunas, lagos...
- Autovías, autopistas y líneas ferroviarias: capa de viario principal, considerando sólo autovías, autopistas y líneas ferroviarias. No se han tenido en cuenta carreteras de la red secundaria y terciaria. En esta capa se ha tenido en cuenta también la servidumbre de carreteras y de ferrocarriles que se considera restrictiva para las CET según normativa sectorial, 50 metros para carreteras (línea límite de edificación) y 70 metros para ferrocarriles (zona de protección).
- Núcleos de población: todos los núcleos de población.
- Línea de costa y fronteras: distancia de seguridad de 500 metros establecida desde la línea de costa o desde la frontera de la España peninsular con un país vecino, Portugal o Francia. En el caso de la línea de costa, se trata la llamada línea de dominio público marítimo-terrestre estatal, según Ley 22/88, de Costas, que depende del punto del litoral y de normativa autonómica, por lo que se ha aplicado un criterio general conservador de 500 metros. En el caso de línea fronteriza, se ha aplicado el mismo criterio conservador, a efectos del estudio, de respetar 500 metros desde la frontera, pero como se ha señalado este terreno puede ser compatible con la implantación de una CET.
- Usos del suelo: capa con todos los usos del suelo en España, distinguiendo hasta 44 usos diferentes. Como puede verse en la Tabla siguiente se ha decidido excluir 27 de los 44 usos definidos.

Para la determinación de los usos del suelo se ha utilizado el Corine Land Cover del 2006. A partir del CLC, Se ha creado un mapa ráster de España para cada cobertura temática con celdas de 100 m x 100 m y se ha reclasificado con valores 0 y 1. Los píxeles con valor 0 quedan excluidos y los píxeles con valor 1 representan zonas aptas. En la tabla se muestran los valores de cada uso.

**Tabla 1. Metodología IDAE. Criterios de exclusión adoptados. Fuente: [IDAE, 2011].**

Código	Definición del uso	Criterio	Valor asignado a las celdas (0=excluido, 1=no excluido)
111	Tejido urbano continuo	Excluido	0
112	Tejido urbano discontinuo	Excluido	0
121	Zonas industriales y comerciales	Excluido	0
122	Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados	Excluido	0
123	Zonas portuarias	Excluido	0
124	Aeropuerto	Excluido	0
131	Zonas extracción minera		1
132	Escombreras y vertederos	Excluido	0
133	Zonas en construcción	Excluido	0
141	Zonas verdes urbanas	Excluido	0
142	Instalaciones deportivas y recreativas	Excluido	0
211	Tierras de labor en secano		1
212	Terrenos regados permanentemente		1
213	Arrozales		1
221	Viñedos		1
222	Frutales y plantaciones de bayas		1
223	Olivares		1
231	Prados y praderas (prados arbolados)		1
241	Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes		1
242	Mosaico de cultivos		1
243	Terrenos principalmente agrícolas con importantes espacios de vegetación natural		1
244	Sistemas agro-forestales		1
311	Bosques de frondosas	Excluido	0
312	Bosques de coníferas	Excluido	0
313	Bosques mixtos	Excluido	0
321	Pastizales naturales		1
322	Landas y matorrales mesófilos		1
323	Vegetación esclerófila		1
324	Matorral boscoso de transición	Excluido	0
331	Playas, dunas y arenales	Excluido	0
332	Roquedo	Excluido	0
333	Espacios con vegetación escasa		1
334	Zonas quemadas		1
335	Glaciares y nieves permanentes	Excluido	0
411	Humedales y zonas pantanosas	Excluido	0
412	Turberas y prados turbosos	Excluido	0
421	Marismas	Excluido	0
422	Salinas	Excluido	0
423	Zonas llanas intermareales	Excluido	0
511	Cursos de agua	Excluido	0
512	Láminas de agua	Excluido	0
521	Lagunas costeras	Excluido	0
522	Estuarios	Excluido	0
523	Mares y océanos	Excluido	0

#### 4.1.2. Metodología de Greenpeace.

Greenpeace ha llevado a cabo estudios para conocer el potencial de las energías renovables en España, incluyendo la energía solar termoeléctrica. Por ello ha desarrollado también su propia metodología para hallar las áreas propicias para la instalación de energía solar termoeléctrica. En los siguientes puntos se especifican las zonas excluidas. Estas zonas han sido seleccionadas a partir de [Greenpeace, 2005].

- Zonas asociadas a Espacios Naturales Protegidos, declarados y en proceso formal de declaración por el Estado y las Comunidades Autónomas.
- Red Natura 2000: Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) + Lugares de Interés para la Conservación (LIC).
- Pendientes:
  - Terrenos con pendiente inferior al 2% (rodeados por 4 km<sup>2</sup> con pendiente menor que el 3%): validas todas las orientaciones de la pendiente.
  - Terrenos con pendiente entre el 2% y el 7% (rodeados por 4 km<sup>2</sup> con pendiente menor que el 8%): solo validas las pendientes con orientación de SE a SW.
  - Terrenos con pendiente superior al 7%: no aptos (considerando que por lo general estos terrenos representaran zonas accidentadas donde sea difícil instalar una central de 50 MW, si bien con orientaciones favorables podrían permitir la instalación de centrales de menor potencia).
- Restricciones sobre el uso del terreno:

Según la Tabla 2, se considera apto el porcentaje indicado entre paréntesis de los usos de suelo según nomenclatura Corine Land Cover 2000.

**Tabla 2. Metodología Greenpeace. Usos de suelo según nomenclatura Corine Land Cover 2000. Fuente: [Greenpeace, 2005].**

Código Corine Land Cover 2000	Nombre	Valor asignado a las celdas (0=No apto, 1=Apto)
2.3	Praderas (30%)	1
2.4.3	Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural (35%)	1
3.2.1	Pastizales naturales (50%)	1
3.2.2.1	Landas y matorrales templado oceánicos (85%)	1
3.2.3.1	Grandes formaciones de matorral denso o medianamente denso (30%)	1
3.2.3.2	Matorrales subarbusivos o arbustivos muy poco densos (100%)	1
3.2.4	Matorral boscoso de transición (30%)	1
3.3.3.1	Xeroestepa subdesértica (100%)	1
3.3.3.3	Espacios orófilos altitudinales con vegetación escasa (100%)	1
3.3.4	Zonas quemadas (100%)	1
1.1.1	Tierras de labor en secano con precipitación de 400 mm/año (50%)	1
2.1.1	Tierras de labor en secano con precipitación. (400, 600) mm/a (25%)	1
1.1	Zonas urbanas.	0
1.2	Zonas industriales, comerciales y de transporte	0
1.3	Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción	0
1.4	Zonas verdes artificiales, no agrícolas	0
2.1.2	Terrenos regados permanentemente	0
2.1.3	Arrozales	0
2.2	Cultivos permanentes	0
2.4.1	Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes	0
2.4.2	Mosaico de cultivos	0
2.4.4	Sistemas agroforestales	0
3.1	Bosques	0
3.2.2.2	Fayal-berzal macaronésico	0
3.2.3.3	Matorrales xerófilos macaronésicos	0
3.3.1	Playas, dunas y arenales	0
3.3.2	Roquedo	0
3.3.3.2	Cárcavas y/o zonas en proceso de erosión	0
3.3.5	Glaciares y nieves permanentes	0
4.1	Zonas húmedas continentales	0
4.2	Zonas húmedas litorales.	0
5.1	Aguas continentales	0
5.2	Aguas marinas	0

### 4.1.3. Metodología NREL

NREL es el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los EE.UU. Con el objetivo de aumentar la potencia solar instalada, se llevaron a cabo una serie de estudios para el proyecto llamado "Southwest Concentrating Solar Power 1000 MW Initiative". En dicho plan se propusieron alcanzar 1.000 MW de potencia solar instalada en el año 2010, y para ello se hizo un estudio con mapas de radiación solar y SIG para hallar el potencial de energía solar en las zonas aptas. Los criterios de NREL no son iguales en todos sus estudios, ya que dependen de ciertas limitaciones técnicas o varían por falta de actualización de la información. Los criterios seguidos van a ser los tomados en los mapas realizados por NREL para la "Southwest Concentrating Solar Power 1000 MW Initiative". [NREL, 2007].

- Recurso solar por lo menos de 5 kWh/m<sup>2</sup>/día radiación directa normal.
- Cercanía a líneas de transmisión. Aunque no está señalado la distancia exacta, en otros estudios de NREL se ha tomado como medida 50 millas, por lo que será esa la distancia umbral.
- Áreas sensibles desde el punto de vista ambiental
- Grandes zonas urbanas
- Masas de agua
- En cuanto a la pendiente, han utilizado dos valores límite, áreas con una pendiente mayor del 1 % o mayores del 3 %.

### 4.1.4. Metodología DLR

El DLR es el Centro Aeroespacial de Alemania, el cual ha desarrollado también estudios para hallar el potencial solar de diferentes regiones a través de los mapas de radiación solar y SIG. Las zonas de exclusión para la instalación de plantas de energía termosolar son las siguientes:

**Tabla 3. Criterios de exclusión para plantas de energía termosolar de concentración.**  
[Fuente: DLR, 2005]

Criterios de exclusión para plantas de energía termosolar de concentración	Obligatorio	Opcional
Pendiente del terreno		
> 2.1%	X	
Cobertura de suelo (Landcover)		
Océano	X	
Aguas continentales	X	
Bosque		X
Marismas	X	
Agricultura		X
Cultivos de arroz		X
Hidrología		
Aguas continentales permanentes	X	
Aguas continentales no permanentes		X
Aéreas regularmente inundadas		X
Geomorfología		
Zonas de dunas	X	
Zonas de seguridad para las áreas dunares de 10 km		X
Salinas		X
Glaciares	X	
Zonas de seguridad de los glaciares		X
Usos del suelo		
Poblaciones		X
Aeropuertos		X
Campos de petróleo o gas		X
Minas, canteras		X
Plantas desalinizadoras		X
Áreas protegidas		X

En este caso, como en los anteriores, se identifican las zonas que se consideran aptas para la instalación de centrales termosolares. Utilizando un SIG, se excluyen todas las zonas que no son aptas para acoger este tipo de instalaciones, siguiendo lo marcado en la tabla 3. Se crea por tanto, un filtro o máscara en la que todos los valores considerados aptos tendrán un valor de 1, mientras que las zonas no aptas tendrán un valor 0. Una vez tenemos este filtro, y a partir de una capa de Radiación Directa Normal (DNI) se generan capas del potencial eléctrico de dicha zona.

En el procedimiento utilizado por el DLR, el potencial económico se considerará limitado por un DNI de 2000 kWh / m<sup>2</sup> / año. Este umbral se considera el adecuado para lograr a medio plazo costes de energía solar competitiva. Sin embargo, en nuestro análisis no vamos a tener

en cuenta el factor económico. Finalmente, para el cálculo de las pendientes del terreno el DLR se ha utilizado un MDT con una resolución espacial de 1 km x 1 km y se han excluido las zonas de pendientes mayores del 2%. En nuestro caso, disponemos de un MDT mucho más reciente y con una resolución de 200 metros x 200 metros por lo que utilizaremos este modelo para obtener unos resultados más ajustados. [DLR, 2005].

## **4.2. Metodología de cálculo de la electricidad producida por m<sup>2</sup>**

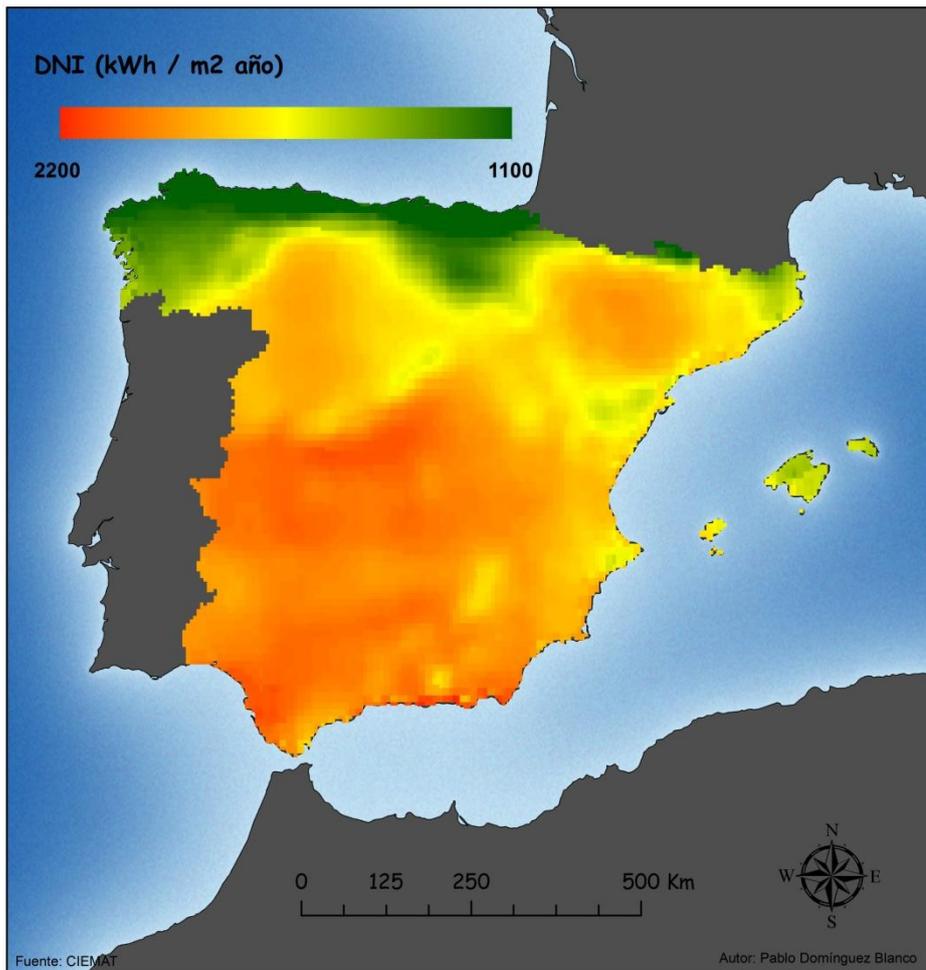
Cuando hablamos de potencial de generación, nos referimos a la cantidad de energía eléctrica que podría llegar a generarse a partir de la energía solar disponible en el territorio estudiado y en un periodo de tiempo determinado, utilizando centrales termoeléctricas.

Para realizar el cálculo de la electricidad producida por m<sup>2</sup> se ha utilizado la metodología descrita en el informe del IDAE “Evaluación del potencial de energía solar termoeléctrica”, [IDAE, 2011].

Esta metodología consigue estimar la energía eléctrica que se generaría en un año por una central termosolar de canales parabólicos, en una determinada localización a partir del valor anual de la radiación directa incidente y la información de la localización geográfica.

### **4.2.1. Mapa de radiación directa normal**

En este trabajo se ha aplicado el mapa de radiación directa resultante de la aplicación del tratamiento de imágenes de satélite descrito en [Polo, 2012].



**Figura 9. Mapa Radiación Directa Normal.**

**Tabla 4. Irradiación directa normal anual en la España peninsular.**

Recurso solar	Valores mapa utilizado en este estudio	Valores mapa utilizado en el estudio del IDAE	Unidades
Superficie total.	498.744	492.300	km <sup>2</sup>
DNI total sobre el territorio.	966.587	909.930	TWh/año
DNI mínima anual.	1.089	1.167	kWh /m2/año
DNI máxima anual.	2.250	2.181	kWh /m2/año
DNI media anual.	1.953	1.842	kWh /m2/año
Desviación típica.	191	179	kWh /m2/año

En la Tabla 4 se analizan los valores característicos generales de las capas de radiación directa utilizados en este estudio, y se comparan con los de la capa utilizada en el estudio del IDAE, que es usado en este estudio como referencia en el análisis de los resultados. Se comprueba que las dos capas son muy semejantes, y que por lo tanto los resultados finales obtenidos deberán ser igualmente semejantes y por lo tanto validar la aplicación hecha de la metodología.

#### 4.2.2. Modelo simplificado de cálculo de la electricidad

En este apartado se va a explicar el cálculo de la producción de electricidad mediante modelos simplificados de producción bruta para una central termosolar de canales parabólicos. Los modelos simplificados consisten en expresiones matemáticas que permiten calcular la producción eléctrica para todos los puntos del territorio de una forma rápida, en función del recurso solar anual y de la latitud. Ello se hace mediante expresiones ajustadas a una serie de simulaciones precisas en puntos determinados representativos de todas las latitudes y magnitudes de radiación directa normal anual que se dan en el territorio estudiado. [IDAE, 2011].

El modelo simplificado se divide en los siguientes pasos.

##### *Cálculo de la exergía*

La exergía es la porción de la energía que puede ser transformada en trabajo mecánico, la parte restante, sin utilidad práctica, recibe el nombre de anergía o entropía. El cálculo de la exergía se realiza a partir de su localización (latitud) y la medición Radiación Directa Normal (DNI) en dicho lugar.

A partir de estudios previos se comprobó que el potencial exérgico de una planta termosolar de canales parabólicos depende principalmente del DNI anual y de la latitud del emplazamiento, según la expresión siguiente.

$$E_x = a + b \text{ DNI} + c \text{ Lat}$$

##### *Cálculo de la eficiencia*

El siguiente paso es la estimación de la eficiencia, que es la producción eléctrica bruta de las plantas en función de su producción exérgica y de su capacidad de almacenamiento térmico. En nuestro caso vamos a considerar que no va a haber almacenamiento térmico.

En la referencia mencionada del IDAE, se obtuvo la siguiente expresión para relacionar la eficiencia con la exergía.

$$E_f = a + d E_x + e E_x^2$$

##### *El Factor de ocupación*

Es necesario para el análisis del potencial, determinar la relación que hay entre la superficie total de la planta y la superficie real ocupada, esto es, el factor de ocupación. Se propone utilizar 24,5%. Este valor surge del estudio de algunas de las plantas existentes.

## *Energía eléctrica por m<sup>2</sup>*

Finalmente, una vez que hemos obtenido todas las expresiones necesarias podemos determinar la energía eléctrica por m<sup>2</sup> de terreno aplicando las expresiones anteriores:

$$\frac{E_e}{m^2} = F_o E_f E_x$$

### **4.3. Herramientas necesarias para el análisis.**

Para llevar a cabo este estudio se ha procedido a descargar todo el material necesario para el desarrollo del mismo. La mayor parte de la información ha sido recopilada del centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Las capas obtenidas de dicho lugar son: zonas protegidas, hidrografía, núcleos de población, modelos digitales del terreno y “Corine Land Cover”. Una vez en posesión de todas las capas de información necesarias, las hemos tratado con ArcGIS para analizar el resultado obtenido al aplicar cada metodología. A continuación se explica que es Corine Land Cover, las características de nuestro modelo digital del terreno y cómo se ha hecho el análisis con ArcGIS.

#### **4.3.1. CORINE Land Cover.**

El programa CORINE (Coordination of Information on the Environment) es un proyecto que se encarga de llevar a cabo una correcta gestión de la información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales de la Comunidad Europea. Este proyecto se llevó a cabo ya que al disponer de información fácilmente accesible y actualizada, la gestión del medio ambiente se vuelve más eficiente. [EEA, 1995].

Dentro de este programa, se creó el proyecto CORINE Land Cover (CLC) del cual es responsable la Agencia Europea del Medio Ambiente. Este proyecto tiene por objetivo suministrar información geográfica de los usos del suelo en todos los países de la Comunidad Europea a escala 1.100.000. [EEA, 1995]. Esta información es muy importante para la gestión del territorio y los recursos naturales. Ya que antes de realizarse este proyecto, dicha información era muy difícil de obtener, se hizo necesario el desarrollo de un proyecto a nivel europeo.

Actualmente se han realizado tres ediciones de CORINE Land Cover. La primera data del año 1990, y en el año 2000 se realizó la primera actualización, obteniéndose así una relación de los cambios ocurridos en este periodo. El tercer y último CLC hasta la fecha, fue el del 2006, con él se pudo observar los cambios de uso producidos entre el 2000 y el 2006.

Se utilizó como sistema geodésico de referencia el ETRS89 y el sistema cartográfico de representación UTM. Además, para realizar la clasificación del suelo se hizo uso de la fotointerpretación sobre imágenes Landsat en el año 1990, Landsat 7 en el año 2000 e imágenes SPOT en el año 2006.

### 4.3.2. Modelos Digitales del Terreno (MDT).

Se ha utilizado el modelo digital del terreno del Instituto Geográfico Nacional, con paso de malla de 200 m. Cada archivo ASCII corresponde a una provincia que posteriormente han sido unidas para obtener una composición de elevaciones de toda la España peninsular y las Islas Baleares. El sistema geodésico de referencia es ETRS89 y proyección UTM. El MDT se obtuvo por interpolación de modelos digitales del terreno de 5 metros de paso de malla [IGN, n.d.].

### 4.3.3. ArcGIS

Para realizar la el tratamiento de la información hemos utilizado ArcGIS en su versión 10.1. ArcGIS es una plataforma de la compañía ESRI para el tratamiento de la información geográfica. Es actualmente el software SIG de referencia.

Hay dos modelos principales de datos con los que se puede trabajar en un SIG: Vectoriales y Ráster. En el modelo vectorial se considera que la realidad está dividida en una serie de objetos discretos (puntos, líneas y polígonos) a los que se puede asignar diversas propiedades. El modelo ráster por el contrario considera la realidad como un continuo. La representación se realiza dividiendo ese continuo en celdas o píxeles, asignándoles a cada una un valor [Peña, 2008].

Para nuestro estudio, se ha trabajado con capas “Raster”, el proceso seguido ha sido el de un análisis de tipo booleano, en el que las capas eran tratadas para obtener valores de “píxeles” 1 en las zonas consideradas aptas, y 0 en las zonas no aptas. Una vez hecho este tratamiento se multiplicaban las capas para obtener una capa final con la suma de las zonas aptas y excluidas. El tamaño de píxel de nuestro estudio es de 100 metros y el sistema de referencia es el ETRS89.

Paralelamente, utilizando el mapa de radiación directa normal desarrollado por el CIEMAT, se aplicó un modelo simplificado en el cual, era posible conocer la producción de energía eléctrica a partir de dicho mapa de radiación directa normal y de la latitud de los píxeles que componían la imagen.

Al combinarse el mapa de zonas aptas y el de producción eléctrica, es posible obtener mapas del potencial solar disponible en España utilizando las metodologías analizadas de Greenpeace, IDAE, NREL y DLR.

## 5. APLICACIÓN A ESPAÑA DE LAS METODOLOGÍAS

En el presente apartado se muestran los resultados de la aplicación a España de las metodologías de identificación de zonas de exclusión descritas anteriormente. Las metodologías son muy diferentes entre sí, por lo que los resultados serán también diversos.

Es necesario señalar que tanto NREL como DLR ponen en práctica condiciones más o menos restrictivas dependiendo de las zonas de estudio, por lo que a la hora de diseñar los mapas de potencial hemos considerado dos alternativas para cada una de estas metodologías.

- En la metodología de NREL se han utilizado dos límites de pendiente, del 1% y del 3%.
- En la metodología del DLR se observa una tabla de criterios de exclusión en la que ciertos criterios son considerados opcionales. Así, en el caso de nuestro estudio de la metodología del DLR, se ha realizado dos veces, para la DLR (1) se ha considerado apto todos los usos del suelo que ellos consideran opcionales, mientras que para el DLR (0) se han excluido todas las zonas opcionales.

En los siguientes apartados, explicaremos con detalle el tratamiento de la información geográfica que se ha realizado con ArcGIS para cada una de las metodologías estudiada, y presentaremos mapas donde se muestran los resultados obtenidos.

### 5.1. Aplicación de la metodología IDAE

Para llevar a cabo el análisis del potencial de energía termosolar que se produciría en España aplicando la metodología del IDAE, descargamos el Corine Land Cover 2006 de la España peninsular y Baleares y he transformado dicha capa de vectorial a raster para poder llevar a cabo nuestro análisis booleano. Dicha transformación se ha hecho definiendo un tamaño de celda de 100 metros para tener una buena resolución espacial. Cuanto menor sea el área terrestre representada por cada píxel, mayores similitud guardará la capa raster con la capa vectorial original, y menor distorsión ocurrirá en su transformación. En la capa del CLC, los usos del suelo vienen representados por un código, para hacer un uso más sencillo de dicha capa, he descargado una tabla con la leyenda asociada a cada código y he unido la capa de usos del suelo con la leyenda de dicha capa.

Como hemos visto, la metodología propuesta por el IDAE, utiliza los usos del suelo para excluir las zonas ya construidas, los cursos de agua y marismas y las zonas de vegetación frondosa como los bosques, ya sea por el alto coste que requeriría instalar una central termosolar en dicho espacio o por el posible impacto ambiental que generaría tal construcción. Las zonas aptas en cambio son los campos de cultivo, pastizales, zonas de matorral y zonas con escasa vegetación.

Una vez hemos identificado todas las zonas, hacemos una reclasificación otorgándole valores de 0 a las zonas excluidas y de 1 a las zonas aptas y con esto obtenemos una capa ráster reclasificada de los usos del suelo.

En cuanto a los espacios naturales protegidos, descargamos las capas de los Lugares de Importancia Comunitaria (LIC) y de Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAS) del Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente. Los LIC son ecosistemas protegidos por una directiva de la Unión Europea con el fin de garantizar la biodiversidad mediante la conservación de hábitats naturales. Las ZEPAS son también áreas protegidas por la Unión Europea para la conservación de la avifauna amenazada de extinción. Dichas capas están en el sistema de referencia ETRS89, por lo que no requieren transformación en este sentido. Una vez cuento con las capas de LIC y ZEPA las convierto a ráster para utilizarlas más adelante.

En cuanto a la hidrografía, aunque ciertas masas de agua ya fueron reclasificadas en con el CLC, se han obtenido capas de lagunas, embalses y humedales del IGN. Estas capas son mucho más detalladas, por lo que es necesario trabajar con ellas para identificar fielmente las masas de agua. Como está explicado en la descripción de la metodología, se descartan las masas de agua de más de 1600 m<sup>2</sup>. Dichas capas se encuentran en formato vectorial, y antes de transformarlas en raster, se calcula el área de las masas de agua y se exportan en una nueva capa los registros con un área superior a 1600 m<sup>2</sup>. Una vez realizado esto, se convierte a formato raster.

Posteriormente se han obtenido capas vectoriales también del IGN de las líneas de comunicación más importantes: autovías, autopistas y vías de ferrocarril y de los núcleos de población, que han sido seleccionadas como zonas descartadas en nuestro estudio.

Finalmente se ha utilizado una capa del contorno de España en el que se ha calculado un buffer de 500 metros, en los que no se ha considerado la posibilidad de instalar este tipo de centrales.



**Figura 10. Máscara IDAE.**

## **5.2. Aplicación de la metodología Greenpeace.**

Para la metodología propuesta por Greenpeace es necesario utilizar una capa con información relativa a las pendientes. Para ello hacemos uso de un Modelo Digital del Terreno obtenido del Instituto Geográfico Nacional. Del sitio web del IGN, podemos descargar un MDT de toda España, clasificado por provincias. Hay disponibles diferentes resoluciones de MDT, en nuestro caso hemos considerado que para la escala a la que estamos trabajando, un MDT con un tamaño de píxel de 200 metros era suficiente.

Una vez obtenidas las hojas del MDT de España, hemos observado que éstas se encuentran en formato ASCII por lo que para trabajar con ellas en ArcGIS es necesario transformarlas a ráster. Además, se hace una limpieza de algunos puntos erróneos que aparecen con altitud negativa y una vez llevada a cabo esta depuración de la información se unen las distintas capas de provincias en un único MDT de toda la zona estudiada. A partir de este MDT, y utilizando ArcGIS, obtenemos una capa de pendientes con la que podremos seleccionar las zonas con pendientes aptas.

Una vez que estamos en disposición de trabajar con la capa de pendientes, ideamos una manera de satisfacer los requerimientos de la metodología propuesta por Greenpeace en

cuanto a las zonas con pendientes aptas para instalar centrales termosolares. La primera condición que exige es el de encontrar “terrenos con pendiente inferior al 2% (rodeados por 4 km<sup>2</sup> con pendiente menor al 3%): válidas todas las orientaciones de pendiente”.

En primer lugar, hemos creado el ráster de pendientes y a partir de éste, hemos creado uno nuevo, seleccionando las zonas de menos del 2% de pendiente. En el siguiente paso, trabajamos con la herramienta “Focal Statistics”, esta herramienta calcula una estadística (en este caso el máximo) de forma que se asigne a la celda central el valor más alto de todos los que le rodean en un radio determinado. La celda central tomará así el valor de pendiente más alto de todos los que le rodean en un radio de 4 km<sup>2</sup>.

Con esto obtenemos el tamaño de área necesario y al poner el valor máximo de pendiente nos aseguramos de seleccionar dichas áreas con valores de pendiente menores del 3%, ya que si en esa área hay una sola celda con más del 3% de pendiente, tomará dicho valor y quedará descartada esa zona. Seleccionamos entonces de esta nueva capa, las áreas con valores de pendiente máximo menor al 3%.

Por último, multiplicamos la primera capa de pendientes menores de 2% por la capa de áreas con pendiente menores del 3% y obtenemos así una capa de salida que cumple con la primera de las condiciones de la metodología de Greenpeace.

La siguiente condición que se exige es la de “terrenos con pendiente entre 2% y 7% (rodeados por 4 km<sup>2</sup> con pendiente menor del 8 %): sólo válidas las pendientes con orientación de SE a SW”.

En primer lugar, clasificamos la capa de pendientes seleccionando el rango de pendientes entre 2% y 7%. Y llevo a cabo de nuevo la identificación de áreas con pendiente menor de 8% con la herramienta “Focal Statistics”. A continuación se multiplica la capa con las pendientes entre 2 y 7% y la capa con las áreas con pendientes menores del 8%.

Una vez hecho esto, pasamos a obtener una capa de orientación de las pendientes. Utilizando la herramienta “Aspect” sobre la capa de pendientes obtenemos una capa de salida con las orientaciones de las pendientes. Seleccionamos las pendientes con orientación sur y obtenemos una capa de orientaciones aptas, que multiplicamos por la capa de pendientes entre 2 y 7% y que están rodeadas de un área con pendientes menores de 8%.

Así bien, tenemos dos capas que cumplen las condiciones respecto a las pendientes que esta metodología exige. Sumamos los dos resultados para obtener una capa final que alberga todas las zonas cuya pendiente permite, según Greenpeace, albergar una planta termosolar.

Otra de las condiciones a tener en cuenta en este análisis es el relativo a los usos del suelo. Se utiliza como hicimos anteriormente en el análisis del IDAE el CLC2006 y se reclasifican los usos del suelo de acuerdo a la tabla de usos de suelo apto propuesta por Greenpeace. Una vez hecho esto, se excluyen de zonas protegidas, como las Zonas de Especial Protección para las Aves, los Parques Naturales y los Lugares de Interés Comunitario.

Una vez hemos tenido en cuenta todos estos factores, podemos obtener una capa final de las zonas que siguiendo la metodología de Greenpeace cumplen las condiciones necesarias para albergar un central eléctrica termosolar.



**Figura 11. Máscara Greenpeace.**

### **5.3. Aplicación de la metodología NREL.**

En la metodología propuesta por NREL vemos algunas diferencias con respecto a las metodologías del IDAE y de Greenpeace. La primera es que establece un mínimo de radiación directa normal para que una zona sea apta para la instalación de centrales solares termoeléctricas. En ninguna de las metodologías anteriores se había considerado un mínimo de radiación para considerar una zona apta. Otra diferencia es que tiene en cuenta las cercanías con las vías de transmisión eléctrica, algo que, para España, como veremos a continuación, no es un factor importante. Y por último, aunque especifica algunos usos del suelo no permitidos, no utiliza una clasificación de usos de suelo como el Corine Land Cover. En el estudio llevado a cabo por NREL, se descartan las zonas urbanas, las áreas ambientalmente sensibles y las masas de agua. El resto del territorio es, a priori, considerado apto.

En cuanto a la pendiente NREL ha considerado dos límites de pendiente, uno más restrictivo, del 1% y otro del 3%. Por ello, obtendremos dos mapas de salida diferentes, uno teniendo en cuenta un límite de pendiente del 1% y otro con un límite del 3%. El proceso por el que se

obtienen las pendientes es idéntico al llevado a cabo anteriormente para la metodología de Greenpeace.

Otra de las condiciones que propone NREL es que las centrales se encuentren a menos de 50 millas de las líneas de transmisión. Para ello, hemos conseguido un mapa del sistema eléctrico peninsular de la Red Eléctrica de España. Dicho mapa es una imagen en formato “.jpg” que debemos georreferenciar antes de poder trabajar con ella en ArcGIS. Para ello, utilizamos la herramienta “Georeferencing”, y a partir de una capa georreferenciada con los límites de España, añadimos puntos de control comunes para hacer “encajar” ambas capas y situar el mapa de red eléctrica en la posición correcta.

Una vez que tenemos el mapa de las líneas de transmisión georreferenciado, editamos todas las líneas de transmisión eléctrica. Con la herramienta de edición de ArcGIS, lo que se hace es dibujar las líneas, puntos u objetos que se necesitan añadir a cualquier capa. Una vez hecho esto, ya estamos en disposición de calcular distancias desde las líneas de transmisión recién dibujadas. Utilizamos para ello la herramienta “Buffer”, la cual calcula la distancia deseada desde cualquier punto o línea, en este caso 50 millas. El resultado de este análisis es que todo el territorio se encuentra dentro de este margen, por lo que todos los puntos cumplen dicha condición.

En cuanto a la hidrografía, los núcleos de población y las áreas sensibles se han utilizado las capas del IGN que ya fueron utilizadas para el análisis del IDAE. Son capas de núcleos de población, embalses, lagos, lagunas, humedales y zonas ZEPA, LIC y límites de Parques Nacionales. Todas ellas en formato vectorial, son transformadas a ráster y reclasificadas como zonas no aptas.

Todavía falta una condición por estudiar. Se trata de la condición de que el recurso solar sea de al menos  $6 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$  de radiación directa normal. Haciendo uso de la capa proporcionada por el CIEMAT de radiación directa normal, reclasificamos con la condición de que todos los píxeles que reciban al menos de  $6 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$  de radiación sean considerados no aptos y los que reciban más sí sean considerados aptos. Así, ya tenemos todas las capas necesarias para hacer cumplir las condiciones propuestas por NREL.

Una vez tengo todas estas condiciones satisfechas, multiplico las capas de salida de todas ellas y obtengo dos capas finales, debido a que se proponían dos límites de pendientes del 1% y del 3%.



**Figura 12. Máscara NREL 1.**



**Figura 13. Máscara NREL 3.**

#### **5.4. Aplicación de la metodología DLR.**

La metodología del DLR se presenta en una tabla en la que una serie de factores son de obligada exclusión y otros son opcionales. Por ello, hemos decidido que como resultado final obtendremos dos capas de salida finales, como se hizo en la metodología de NREL. Una de las capas de salida considerará las restricciones opcionales como zonas aptas y la otra salida considerará éstas como zonas excluidas.

El primer factor en el que nos centramos es la pendiente. Como hemos explicado ya, descargamos los MDT de la página web del IGN, y trabajamos con ellos en ArcGIS para obtener a partir de ellos las pendientes. Reclasificamos la capa de pendientes y obtenemos una capa con las zonas aptas y las zonas excluidas. Esta condición es obligatoria, por lo que será tomada en cuenta en ambas capas de salida finales.

Una vez hecho esto, vamos a realizar un análisis de los usos del suelo. Según la información que tenemos de cómo se ha aplicado la metodología del DLR, no sabemos si para realizar este análisis utilizan una capa de usos del suelo como el Corine Land Cover u otro tipo de información. Por ello, hemos decidido que utilizaremos el Corine Land Cover 2006 para clasificar los usos del suelo. En las siguientes tablas se pueden observar las clases excluidas y admitidas.

**Tabla 5. Metodología DLR. Exclusiones de uso del suelo aplicadas. Fuente: Elaboración propia en base a las restricciones propuestas por el DLR en [DLR, 2005].**

Exclusión usos del suelo CLC	Excluido lo obligatorio y lo opcional. (DLR 0)	Excluido sólo lo obligatorio. (DLR 1)
<b>1. Superficies naturales</b>		
<b>1.1. Zonas urbanas</b>		
1.1.1. Tejido urbano continuo	0	1
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	0	1
<b>1.2. Zonas industriales, comerciales o de transporte</b>		
1.2.1 Zonas industriales o comerciales	1	1
1.2.2 Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados	0	0
1.2.3 Zonas portuarias	0	0
1.2.4 Aeropuertos	0	1
<b>1.3. Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción</b>		
1.3.1. Zonas de extracción minera	0	1
1.3.2. Escombreras y vertederos	1	1
1.3.3. Zonas en construcción	0	1
<b>1.4. Zonas verdes artificiales no agrícolas</b>		
1.4.1. Zonas verdes urbanas	0	1
1.4.2. Instalaciones deportivas y recreativas	0	1

**Tabla 6. Metodología DLR. Exclusiones de uso del suelo aplicadas. Fuente: Elaboración propia en base a las restricciones propuestas por el DLR en [DLR, 2005].**

Exclusión usos del suelo CLC	Excluido lo obligatorio y lo opcional. (DLR 0)	Excluido sólo lo obligatorio. (DLR 1)
<b>2. Zonas agrícolas</b>		
<b>2.1. Tierras de labor</b>		
2.1.1. Tierras de labor en secano	0	1
2.1.2. Terrenos regados permanentemente	0	1
2.1.3. Arrozales	0	1
<b>2.2. Cultivos permanentes</b>		
2.2.1. Viñedos	0	1
2.2.2. Frutales	0	1
2.2.3. Olivares	0	1
<b>2.3. Prados y praderas</b>		
2.3.1. Prados y praderas	1	1
<b>2.4. Zonas agrícolas heterogéneas</b>		
2.4.1. Cultivos anuales asociados a cultivos permanentes	0	1
2.4.2. Mosaico de cultivos	0	1
2.4.3. Terrenos principalmente agrícolas pero con importantes espacios de población natural y seminatural	1	1
2.4.4. Sistemas agroforestales	0	1

**Tabla 7. Metodología DLR. Exclusiones de uso del suelo aplicadas. Fuente: Elaboración propia en base a las restricciones propuestas por el DLR en [DLR, 2005].**

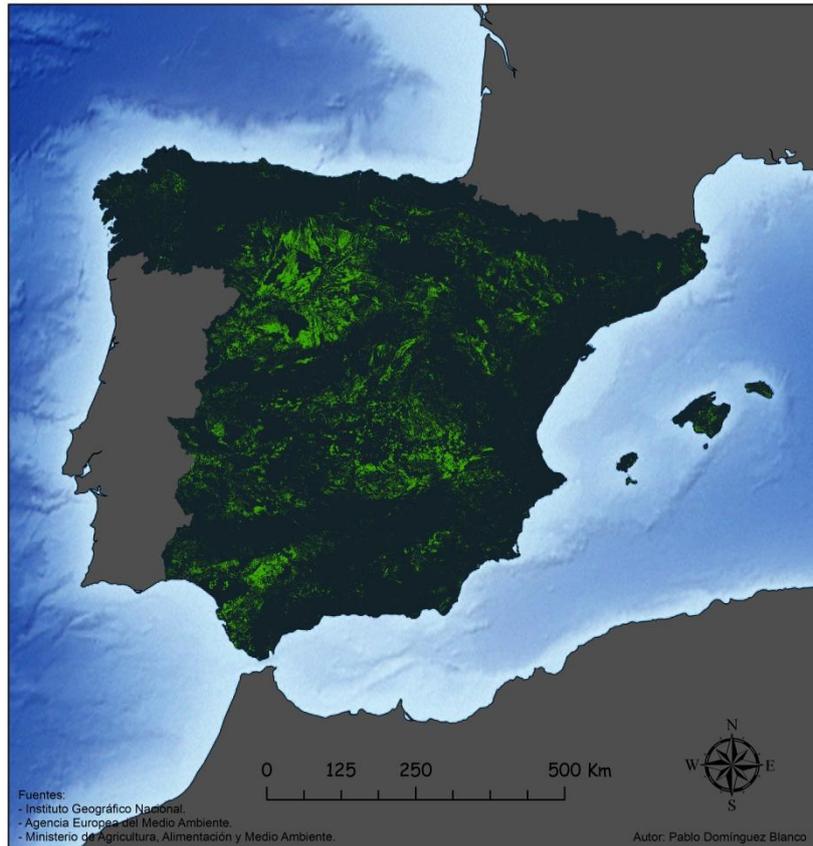
Exclusión usos del suelo CLC	Excluido lo obligatorio y lo opcional. (DLR 0)	Excluido sólo lo obligatorio. (DLR 1)
<b>3. Zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos.</b>		
<b>3.1. Bosques</b>		
3.1.1. Bosques de frondosas	0	1
3.1.2. Bosques de coníferas	0	1
3.1.3. Bosque mixto	0	1
<b>3.2. Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea</b>		
3.2.1. Pastizales naturales	1	1
3.2.2. Landas y matorrales mesófilos	1	1
3.2.3. Matorrales esclerófilos	1	1
3.2.4. Matorrales boscoso de transición	1	1
<b>3.3. Espacios abiertos con poca o sin vegetación</b>		
3.3.1. Playas, dunas y arenales	0	0
3.3.2. Roquedo	1	1
3.3.3. Espacios con vegetación escasa	1	1
3.3.4. Zonas quemadas	1	1
3.3.5. Glaciares y nieves permanentes	0	0

**Tabla 8. Metodología DLR. Exclusiones de uso del suelo aplicadas. Fuente: Elaboración propia en base a las restricciones propuestas por el DLR en [DLR, 2005].**

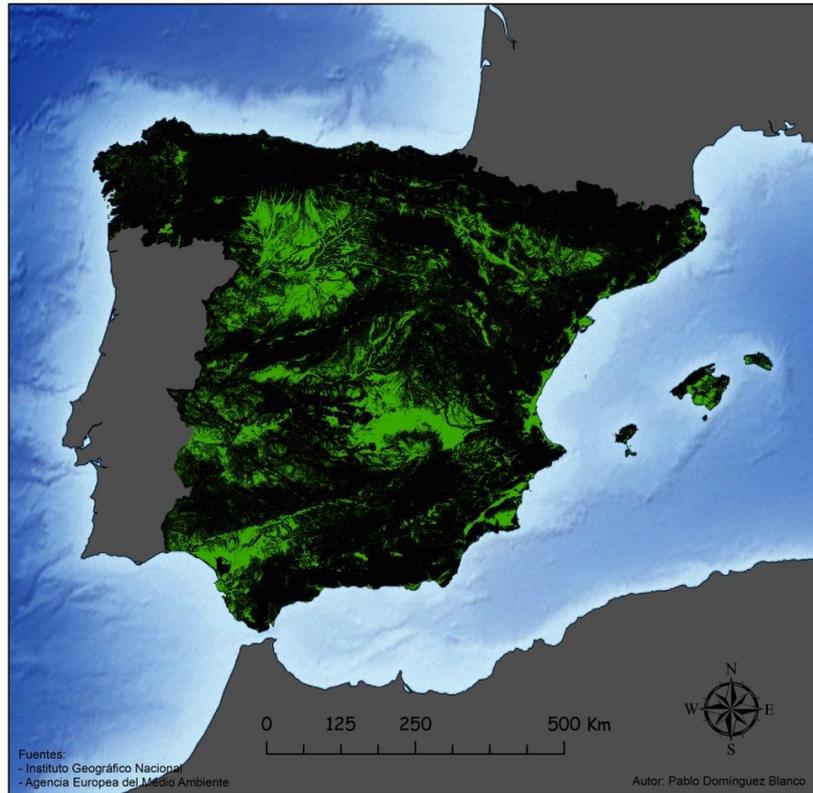
Exclusión usos del suelo CLC	Excluido lo obligatorio y lo opcional. (DLR 0)	Excluido sólo lo obligatorio. (DLR 1)
<b>4. Zonas húmedas</b>		
<b>4.1. Zonas húmedas continentales</b>		
4.1.1. Humedales y zonas pantanosas	0	0
4.1.2. Turberas y prados turbosos	0	0
<b>4.1. Zonas húmedas litorales</b>		
4.2.1. Marisma	0	1
4.2.2. Salina	0	1
4.2.3. Zonas llanas intermareales	0	1
<b>5. Superficies de agua</b>		
<b>5.1. Aguas continentales</b>		
5.1.1 Cursos de agua	0	0
5.1.2 Láminas de agua	0	0
<b>5.2. Aguas marinas</b>		
5.2.1. Lagunas costeras	0	0
5.2.2. Estuarios	0	0
5.2.3. Mares y océanos	0	0

Finalmente, el DLR plantea que excluir las áreas protegidas es una condición opcional. Por ello, como hemos hecho con los usos del suelo, las consideraremos excluidas junto con los usos opcionales, y por otro lado, serán admitidas en la capa final con los usos opcionales no

excluidos. Como en los anteriores casos, las capas de zonas protegidas son las zonas ZEPA, LIC y los Parques Nacionales. Una vez tenemos todas las condiciones clasificadas en capas, multiplicamos éstas y obtenemos dos salidas finales para esta metodología.



**Figura 14. Máscara DLR 0.**



**Figura 15. DLR 1.**

### 5.5. Resultado de las metodologías analizadas.

Como era de esperar, al aplicar estas metodologías en España (sin incluir las Islas Canarias), obtenemos unos valores de área diferentes de las zonas aptas consideradas por las distintas metodologías. Obviamente, cuanto menor sea el área disponible para la instalación de centrales termosolares, menor será su potencial de generación de electricidad. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 9. Resultados del área. Fuente: Elaboración propia a partir de las condiciones impuestas por cada metodología.**

	IDAE	Greenpeace	NREL (1%)	NREL (3%)	DLR (1)	DLR (0)
Área (km <sup>2</sup> )	266.244	24.162	37.564.31	116.265	97.743	37.464
Área (%)	53,38	4,84	7,53	23,3	19,6	7,51

Como era de esperar la metodología que considera apta mayor cantidad de área es la del IDAE, ya que, aunque es una de las más restrictivas en cuanto a usos del suelo, no se han considerado las pendientes, lo que lleva a considerar aptas multitud de zonas que las demás

metodologías han excluido. Por el contrario, las metodologías más excluyentes son la de Greenpeace, la de NREL (1%) y DLR (0). Esto es debido a que proponen unas restricciones de pendiente y usos del suelo muy fuertes lo que lleva a excluir gran parte del territorio. Por último, las opciones de NREL (3%) y DLR (1) consideran un margen de pendiente mayor (3% y 2% respectivamente) y no limitan tan fuertemente los usos del suelo válidos, por lo que su área resultante queda en un punto medio entre la más y la menos restrictiva.

Estos datos de área son importantes, pero por sí solos no aportan información suficiente para considerar unas metodologías más acertadas que otras. Por ello, vamos a considerar las centrales solares termoeléctricas ya instaladas en España como referencia para ver el número de centrales que cada metodología considera en zonas no excluidas. El número total de centrales es de 46, localizadas en su mayoría en Andalucía, Extremadura y Castilla la Mancha, por razones obvias de la cantidad de radiación solar.

## 6. VALIDACIÓN DE LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE EXCLUSIÓN

### 6.1. Localización de las centrales.

Las centrales solares termoeléctricas son, como ya sabemos, instalaciones industriales que transforman la energía de la radiación solar en electricidad. Esta tecnología, concentra los rayos del sol en un punto para calentar un fluido y mover una turbina que genera electricidad. Actualmente existen cuatro tipos de tecnologías termosolares, pero en este estudio estamos centrados particularmente en la tecnología de canales parabólicos.

En la siguiente figura observamos una representación de la localización de las centrales solares termoeléctricas que hay en España. La imagen ha sido obtenida del portal de internet de Protermosolar, ([www.protermosolar.com](http://www.protermosolar.com)). Protermosolar es la Asociación Española de la Industria Termoeléctrica, que tiene como objetivo promover el desarrollo de la industria termosolar española. Desde Protermosolar, nos proporcionaron la posición exacta de las centrales que hay en España para proceder a la validación de los resultados obtenidos con los análisis de las metodologías estudiadas.

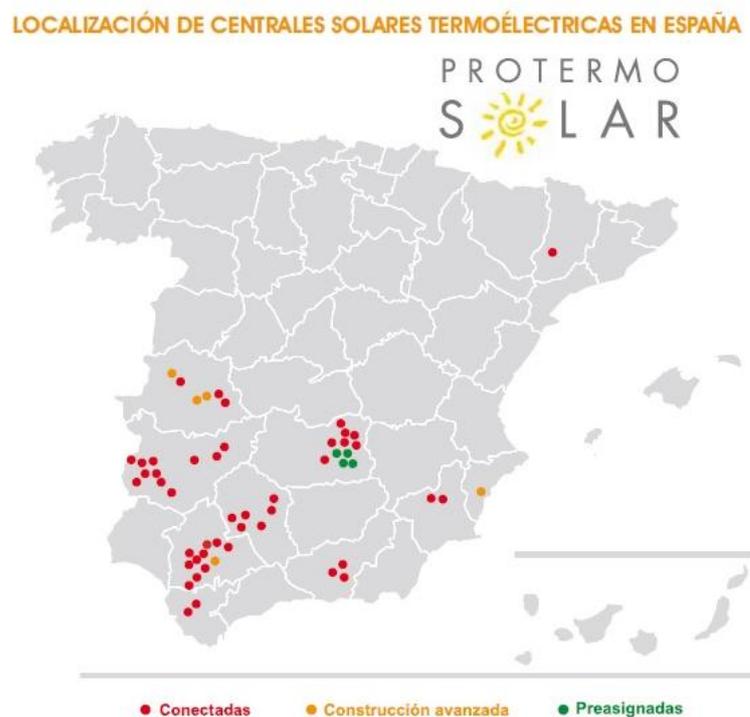


Figura 16. Localización de las centrales. Fuente: [protermosolar.com](http://www.protermosolar.com).

## 6.2. Análisis SIG de las centrales.

Una vez que conocida la posición en la que se encuentran las centrales, creamos una capa de puntos con las 46 centrales de concentración que hay en España. Con dicha capa de puntos y con las máscaras obtenidas anteriormente de las metodologías estudiadas, utilizamos la herramienta “Identity” de ArcGIS. Con la herramienta “Identity”, obtenemos la intersección entre la capa de puntos y la capa ráster de ceros y unos. Cada punto, que representa una central, toma el valor 0 o 1 dependiendo de la posición en la que se sitúa en la capa ráster. De esta forma podemos analizar rápidamente el número de centrales que se localizan en zonas aptas en cada metodología.

En este cuadro se muestran las 46 centrales que existen en España, enumeradas por provincia y municipio. El número entre paréntesis en el municipio de las centrales quiere decir que hay varias centrales en ese mismo municipio. El 0 significa que dicha central se encuentra en una zona excluida por la metodología y el 1 que está en una zona considerada apta.

De las 46 centrales, deben considerarse tan solo 43 para el resultado, ya que las otras 3 están situadas en zonas protegidas, donde los proyectos han de ser estudiado de forma individual y teniendo en cuenta sus características particulares.

**Tabla 10. Resultados de las centrales. Fuente: elaboración propia a partir de la localización de las centrales proporcionada por protermosolar.**

Centrales			IDAE	Greenpeace	NREL (1%)	NREL (3%)	DLR (1)	DLR (0)
	Provincia	Municipio						
1	Alicante	Villena	0	0	0	0	0	0
2	Badajoz	Olivenza	1	0	1	1	1	0
3	Badajoz	Talarrubias	1	1	0	1	1	1
4	Badajoz	Torre de Miguel Sesmero (3)	1	1	1	1	1	1
5	Badajoz	La Garrovilla	1	1	1	1	1	1
6	Badajoz	Badajoz	1	1	1	1	1	1
7	Badajoz	Alvarado	1	1	1	1	1	1
8	Badajoz	Olivenza	1	0	1	1	1	0
9	Badajoz	Orellana	1	0	0	0	0	0
10	Badajoz	Navalvillar de Pela (2)	0	0	0	0	1	0
11	Cáceres	Majadas de Tiétar	1	0	0	1	0	0
12	Cáceres	Valdeobispo	1	0	1	1	1	0
13	Cáceres	Logrosán (4)	1	1	0	1	1	1
14	Cádiz	San José del Valle (2)	1	0	1	1	1	0
15	Ciudad Real	Alcázar de San Juan(4)	1	0	1	1	1	0

16	Ciudad Real	Puerto Lápice (2)	1	0	0	1	1	0
17	Ciudad Real	Puerto Llano	1	0	0	1	0	0
18	Córdoba	Palma del Río	1	1	1	1	1	1
19	Córdoba	Palma del Río 2 (2)	1	0	1	1	1	0
20	Córdoba	Posadas	1	0	0	0	0	0
21	Córdoba	El Carpio(2)	1	0	0	1	1	0
22	Granada	Aldiere (3)	1	0	1	1	1	0
23	Lleida	Les Borgues Blanques	1	0	0	1	1	0
25	Sevilla	Morón de la Frontera	1	0	1	1	1	0
27	Sevilla	Écija (2)	1	0	0	0	0	0
28	Sevilla	Lebrija	1	0	1	1	1	0
29	Sevilla	Morón de la Frontera	1	0	0	1	1	1
30	Sevilla	Sanlúcar la Mayor (3)	1	1	1	1	1	1
<b>Total</b>		<b>46</b>	<b>43</b>	<b>15</b>	<b>26</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>16</b>

Al observar los resultados de este análisis, vemos como las tres metodologías que mejores resultados han obtenido en cuanto a centrales en zonas aptas son el IDAE, NREL (3%), y DLR (1). El IDAE destaca como la metodología en la que se ha alcanzado un mayor número de acierto (43 de 46), por lo que podríamos concluir que su análisis de los usos del suelo es correcto. Pese a ello, la cantidad de zonas consideradas aptas con pendientes escarpadas que hacen imposible la instalación de estas centrales, permite considerar que el potencial final es mucho mayor del real.

Por su parte, NREL (3%) y DLR (1) consideran 39 centrales dentro de la zona apta. El número de aciertos se acerca notablemente al del IDAE pero la inclusión de la pendiente como condición permite descartar una gran cantidad de área de alta pendiente que el IDAE sí considera apta y puede desvirtuar los resultados de potencial para dicha zona.

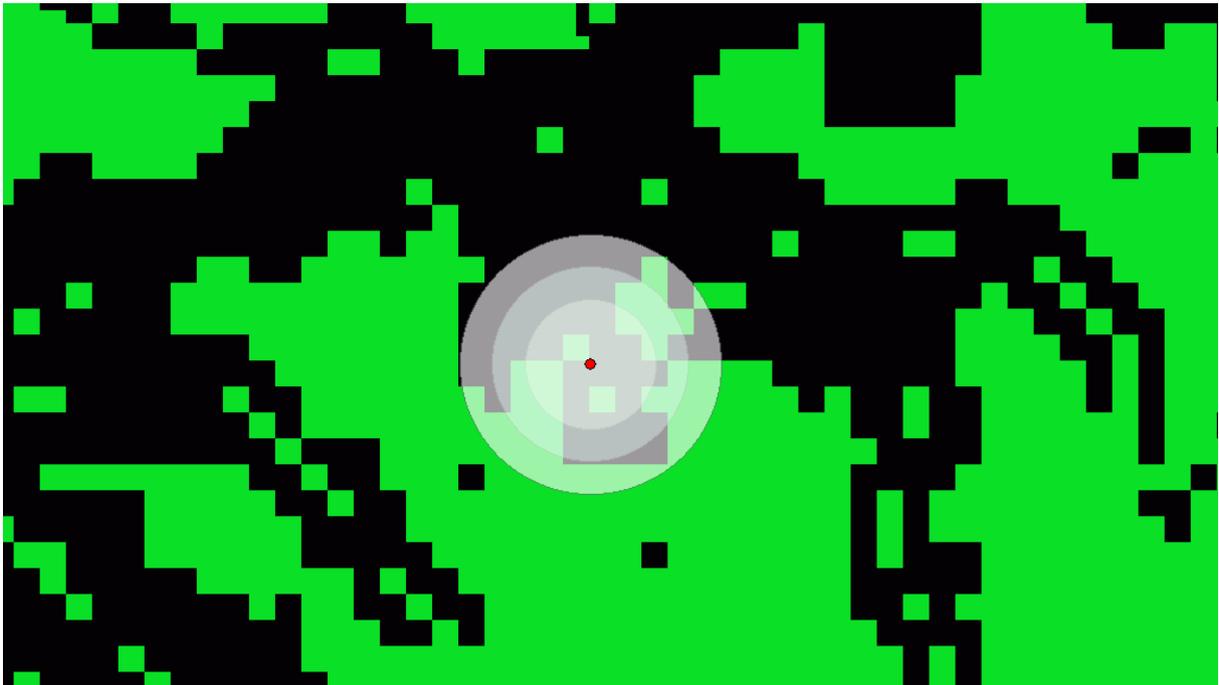
Es necesario señalar que se pueden cometer errores y algunas centrales pueden quedar fuera de zonas aptas por escasos metros, debido a la inevitable simplificación que se produce al trabajar con zonas tan amplias y en formato ráster. Por ello hemos considerado la posibilidad de llevar a cabo “buffers” alrededor de las centrales para así ver cuántas de ellas entrarían ahora en zonas aptas.

Las centrales no son puntos sobre el territorio como habíamos considerado anteriormente, sino que ocupan una determinada área que es necesario considerar para una mejor interpretación de los resultados. De la página web de Protermosolar, además de la localización de las centrales, hemos podido conocer las hectáreas que ocupa cada una.

A partir de esta información, hemos calculado la media del área que ocupa cada una de las centrales y el resultado ha sido de 175 Hectáreas. El área de una circunferencia se obtiene aplicando la fórmula:

$$A = \pi * r^2$$

Hemos calculado tres buffers de 500, 750 y 1.000 metros. Cuyo área es de 78, 177 y 314 hectáreas respectivamente. El buffer de 750 metros, corresponde casi a la misma cantidad de área que ocupa de media una central solar termoeléctrica. Además de éste, hemos querido considerar otros dos buffers para hacer una comparación posterior. De esta forma, la validación con las centrales es más real que tomando éstas como puntos.



**Figura 17. Buffer realizado sobre una central que se encuentra en zona excluida.**  
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 11. Resultado aplicando los radios alrededor de las centrales. Fuente: elaboración propia.**

	TOTAL	IDAE	Greenpeace	NREL (1%)	NREL (3%)	DLR (1)	DLR (0)	
Área (km2)	498.744	266.244	24.162	37.564.31	116.265	97.743	37.464	
Área (%)	100	53,38	4,84	7,53	23,3	19,6	7,51	
Centrales	46	Radio 500 metros	43	22	35	43	46	26
		Radio 750 metros	43	25	37	43	46	27
		Radio 1.000 metros	44	32	40	43	46	33

Si observamos los resultados ahora, comprobamos que el DLR (1) consigue que todas las centrales caigan en zonas aptas, y que tanto IDAE como NREL (3%) dejan tres centrales fuera. Esto se debe a que DLR (1) no considera las áreas protegidas como zonas excluidas y estas tres centrales se encuentran en una Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA).

En cualquier caso, observando los resultados del área y la localización de las centrales, parece que tanto NREL (3%) como DLR (1), son metodologías que seleccionan bien las zonas aptas. Sin embargo, la cantidad de área que consideran apta se sitúa en torno al 20% del territorio. La metodología de NREL (1%) considera un área apta del 7,5%, un dato más realista, y aunque no consigue incluir tantas centrales, si tenemos en cuenta los buffer, el resultado no está muy alejado de las que más centrales colocan en zonas aptas.

## 7. NUEVA METODOLOGÍA DE ZONAS DE EXCLUSIÓN

### 7.1. Descripción de la nueva metodología.

Una vez hecho el estudio de las metodologías, se ha pensado en desarrollar una nueva que incluya las condiciones más acertadas para seleccionar las zonas potencialmente aptas para este tipo de instalaciones.

El IDAE, en su informe de “Evaluación del potencial de energía solar termoeléctrica”, desarrolla un procedimiento de análisis SIG muy bien estructurado, detallado y coherente que los demás. Sin embargo, el hecho de no contar con una limitación de pendientes lleva a considerar aptas un gran número de zonas que deberían ser descartadas. Por ello, el resultado final de las zonas potencialmente aptas queda desvirtuado. En este estudio, queremos conocer cuáles serían los resultados en cuanto a la localización de las centrales, y el potencial de generación que se conseguiría al añadir a la metodología desarrollada por el IDAE un límite de pendientes.

Para resolver esta incógnita, se ha añadido al estudio de usos del suelo del IDAE tres limitaciones de pendiente del 1%, 2% y 3% siguiendo las recomendaciones de NREL y DLR. Consideramos que tanto DLR como NREL hacen un análisis de usos del suelo menos detallado y que el DLR considera aptas, por ejemplo, las áreas protegidas y otras zonas poco recomendables. Por todo ello, la nueva metodología propuesta utilizara el estudio de usos del suelo del IDAE y tres restricciones de pendiente diferentes para valorar cuál puede ser la más idónea.

**Tabla 12. Requerimientos tenidos en cuenta para la selección de zonas de exclusión por las distintas metodologías. Fuente: elaboración propia.**

	IDAE	GREENPEACE	NREL	DLR	NUEVA
Espacios protegidos	X	X	X		x
Hidrografía	X		X	X	x
Vías de comunicación	X				x
Núcleos de población	X		X		x
Costas y fronteras	X				x
Usos de suelo	X	X		X	x
Geomorfología				X	
Pendientes		(2%)	(1%- 3%)	(2%)	(1% 2% 3%)
Recurso solar			X	X	
Líneas de transmisión			X		

Como hemos mencionado, esta nueva metodología toma como punto de partida el análisis llevado a cabo por el IDAE y le añade las limitaciones de pendiente. En ArcGIS, una vez desarrollado el proceso de generar la máscara para el IDAE, el proceso es fácil. Debemos multiplicar la máscara del IDAE con la reclasificación de las pendientes para así obtener tres capas finales. En esta capa, conjugamos el análisis de la hidrografía, usos del suelo, vías de comunicación, zonas protegidas, etc. que se hizo para el IDAE, con un límite de pendientes que elimine las zonas escarpadas que pueden desvirtuar el análisis del potencial.

En la Tabla 12 se muestran los requerimientos tenidos en cuenta para la selección de zonas de exclusión por las distintas metodologías.

## 7.2. Resultados de la nueva metodología.

Al llevar a la práctica el análisis explicado en el punto anterior, con respecto al análisis del IDAE, las zonas verdes se han reducido notablemente. Será necesario comprobar entonces, cuantas de las centrales que anteriormente se localizaban en zonas aptas, quedan situadas en zonas excluidas. En las figuras siguientes pueden observarse los resultados finales del análisis.



**Figura 18. Máscara de la Propuesta de la nueva metodología con restricción de 1% de pendientes.**



**Figura 19. Máscara de la Propuesta de la nueva metodología con restricción de 2% de pendientes.**



**Figura 20. Propuesta de nueva metodología con restricción de 3% de pendientes.**

Al introducir estos cambios en el análisis del IDAE, el resultado del área total considerado apto, se equipara a las metodologías de NREL y DLR que, a priori, dieron resultados más razonables. La nueva metodología, con una limitación del 3% de pendiente, considera apta un área del 21,6% del territorio de España, menos de la mitad de lo que consideraba el IDAE. Si tomamos una limitación de pendiente del 2%, el área apta total se reduce al 14,7%. Y finalmente, si consideramos una limitación del 1% de pendiente, el área se reduce al 7,1%, un resultado parejo a las metodologías de Greenpeace y DLR(0).

**Tabla 13. Resultados del área. Fuente: elaboración propia.**

	TOTAL	IDAE	Greenpeace	NREL (1%)	NREL (3%)	DLR (1)	DLR (0)	Nueva (1%)	Nueva (2%)	Nueva (3%)
Área (km <sup>2</sup> )	498.744	266.244	24.162	37.564.31	116.265	97.743	37.464	35.335	73.431	107.580
Área (%)	100	53,38	4,84	7,53	23,3	19,6	7,51	7,1	14,7	21,6

Como hicimos anteriormente, vamos a realizar una validación del número de centrales que la nueva metodología considerará en zonas aptas, para comprobar si la clasificación que hace de las zonas aptas es acertada.

### **7.3. Validación de la identificación de zonas de exclusión para la nueva metodología.**

Hacemos un análisis de las centrales que se localizan en zonas aptas para la nueva metodología.

Como comentamos, las centrales no son puntos, ocupan un área media de 175 Ha, por lo que lo más idóneo es hacer un análisis utilizando buffers que representen el área que ocupan esas centrales. Así pues, si completamos el análisis como hicimos anteriormente, realizando tres buffers de 500, 750 y 1.000 metros a las centrales, el número de centrales en zonas aptas se equipara

**Tabla 14. Resultados de las centrales. Fuente: elaboración propia a partir de la localización de las centrales proporcionada por protermosolar.**

Centrales			IDAE	Greenpeace	NREL (1%)	NREL (3%)	DLR (1)	DLR (0)	Nueva(3%)	Nueva(2%)	Nueva(1%)
	Provincia	Municipio									
1	Alicante	Villena	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Badajoz	Olivenza	1	0	1	1	1	0	1	1	1
3	Badajoz	Talarrubias	1	1	0	1	1	1	1	1	0
4	Badajoz	Torre de Miguel Sesmero (3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	Badajoz	La Garrovilla	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	Badajoz	Badajoz	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Badajoz	Alvarado	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	Badajoz	Olivenza	1	0	1	1	0	1	1	1	1
9	Badajoz	Orellana	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Badajoz	Navalvillar de Pela (2)	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	Cáceres	Majadas de Tiétar	1	0	0	1	0	0	1	0	0
12	Cáceres	Valdeobispo	1	0	1	1	1	0	1	1	1
13	Cáceres	Logrosán (4)	1	1	0	1	1	1	1	1	0
14	Cádiz	San José del Valle (2)	1	0	1	1	1	0	1	1	1
15	Ciudad Real	Alcázar de San Juan(4)	1	0	1	1	1	0	1	1	1
16	Ciudad Real	Puerto Lápice (2)	1	0	0	1	1	0	1	1	0
17	Ciudad Real	Puerto Llano	1	0	0	1	0	0	1	0	0
18	Córdoba	Palma del Río	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	Córdoba	Palma del Río 2 (2)	1	0	1	1	1	0	1	1	1
20	Córdoba	Posadas	1	0	0	0	0	0	0	0	0
21	Córdoba	El Carpio(2)	1	0	0	1	1	0	1	1	0
22	Granada	Aldiere (3)	1	0	1	1	1	0	1	1	1
23	Lleida	Les Borgues Blanques	1	0	0	1	1	0	1	1	0
25	Sevilla	Morón de la Frontera	1	0	1	1	1	0	1	1	1
27	Sevilla	Écija (2)	1	0	0	0	0	0	0	0	0
28	Sevilla	Lebrija	1	0	1	1	1	0	1	1	1
29	Sevilla	Morón de la Frontera	1	0	0	1	1	1	1	1	0
30	Sevilla	Sanlúcar la Mayor (3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Total			43	15	26	39	39	16	39	37	26

**Tabla 15. Resultados de área y centrales aplicando los radios. Fuente: elaboración propia**

	TOTAL	IDAE	Greenpeace	NREL (1%)	NREL (3%)	DLR (1)	DLR (0)	Nueva (3%)	Nueva (2%)	Nueva (1%)	
Área (km2)	498.744	266.244	24.162	37.564.31	116.265	97.743	37.464	107.580	73.431	35.335	
Área (%)	100	53,38	4,84	7,53	23,3	19,6	7,51	21,57	14,7	7,1	
Centrales	46	Radio 500 metros	43	22	35	43	46	26	43	43	39
		Radio 750 metros	43	25	37	43	46	27	43	43	39
		Radio 1000 metros	44	32	40	43	46	33	43	43	42

Considerar que el 20% o más del territorio como apto es un resultado un tanto optimista. Por ello, buscamos una metodología que minimice el área apta y considere el mayor número de centrales en esa zona.

La nueva metodología consigue, reduciendo el área, localizar el mismo número de centrales en zonas aptas con un límite de pendiente del 2% y el 3%. Además para un límite de pendiente del 1%, los resultados son también muy positivos. Discutiremos estos resultados con más detalle apartados siguientes.

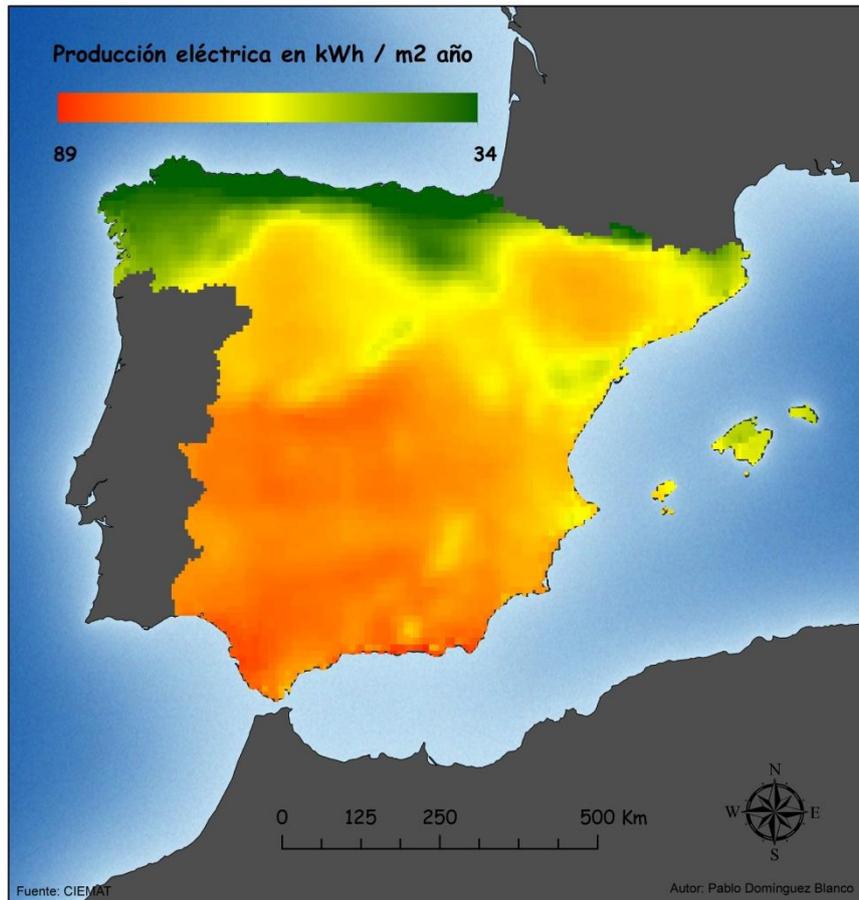
## **8. POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD TERMOSOLAR.**

Cuando hablamos de potencial de generación, nos referimos a la cantidad de energía eléctrica que podría llegar a generarse a partir de la energía solar disponible en el territorio estudiado y en un periodo de tiempo determinado, utilizando centrales termoeléctricas. Ya que año tras año la cantidad de recurso solar experimenta cambios mínimos, podemos considerar que se mantiene constante. Por ello, se calculará el potencial como la energía eléctrica generada en un año.

### **8.1. Cálculo de la energía producida por m<sup>2</sup>.**

El estudio de potencial parte del mapa de radiación directa descrito en el apartado 3.2.1. Una vez disponemos del mapa de DNI tenemos que aplicar los modelos simplificados descritos en 3.2.2. Sin embargo, antes de realizar este paso, es necesario tener una capa ráster que contenga la latitud de todos los píxeles de la capa del DNI. Para ello, utilizando la herramienta “Raster to Point” de ArcGIS, obtengo los centroides de los píxeles de la capa de DNI. A la capa de centroides, se le añade un nuevo campo en el que calculamos el valor de la latitud de cada centroide. Para terminar, convertimos la capa de centroides a ráster dándole a los píxeles el valor de la latitud.

Una vez aplicados los modelos simplificados, obtenemos el mapa de la Figura 21, en el que se muestra la energía eléctrica por metro cuadrado anual para todo el territorio.



**Figura 21. Potencial solar total.**

Para calcular el potencial que podría generarse en España, según los criterios de cada metodología estudiada, sólo es necesario multiplicar esta capa por la capa con las zonas aptas de cada metodología.

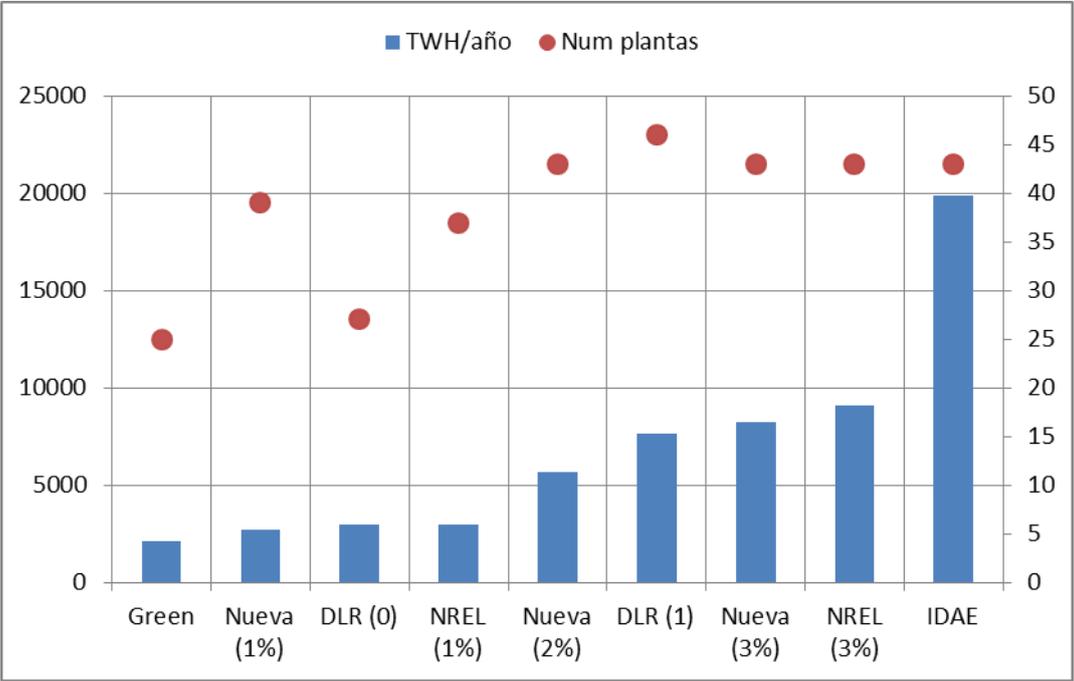
En los siguientes mapas se muestran los valores de energía eléctrica que podrían generarse en las zonas consideradas aptas. A partir de estos mapas, hemos calculado el potencial total para las distintas metodologías utilizando la herramienta “Zonal Statistics as a Table”. Con dicha herramienta hemos calculado la suma de la electricidad de todos los píxeles para calcular el potencial total. Los resultados están expuestos en la tabla 15 del siguiente apartado.

## **8.2. Resultados y mapas.**

En este apartado se muestran los principales resultados de la estimación del potencial de generación de energía eléctrica con centrales termosolares de tecnología cilindro-parabólica en España, aplicando las distintas metodologías estudiadas.

En la Tabla 16 se muestran los resultados del potencial calculado en España para cada una de las Comunidades Autónomas. Se observa la gran variabilidad de los resultados dependiendo de la metodología.

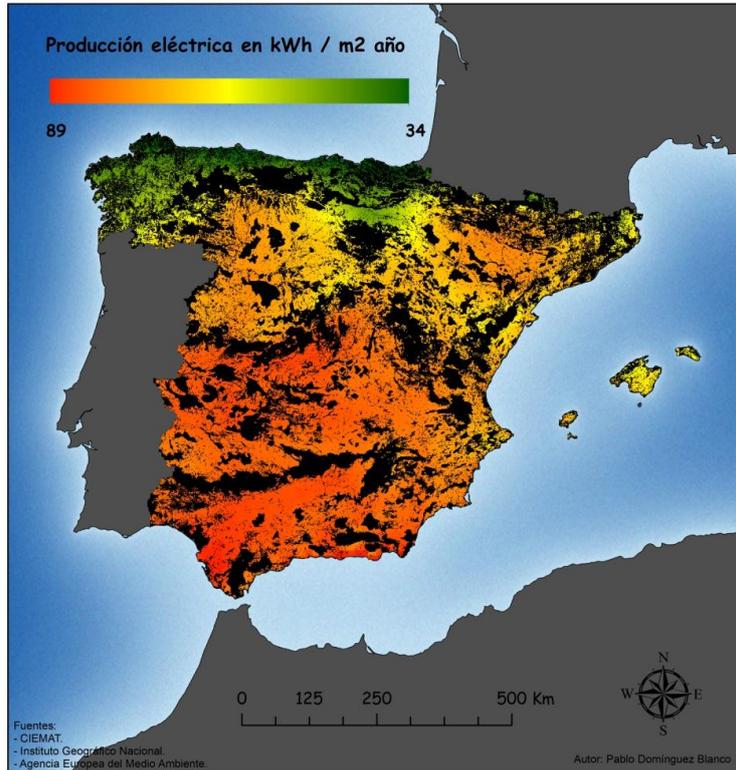
En Figura 22, puede observarse el potencial solar junto con las Plantas que incluyen cada una de las metodologías. Se observa claramente que las metodologías que estiman mayores potenciales incluyen las ubicaciones de las centrales reales, pero entre todas ellas es la nueva del 2% la que optimiza la relación.



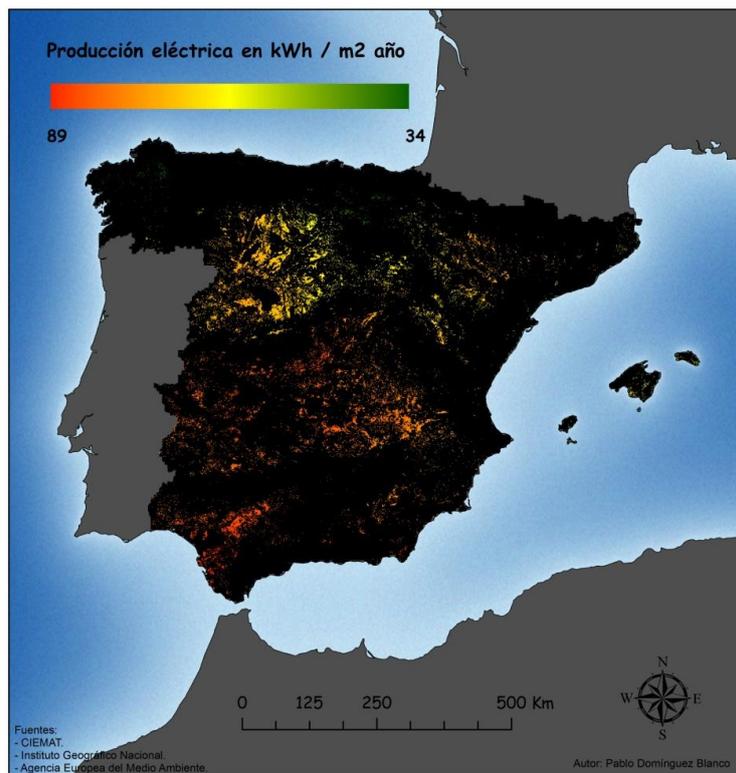
**Figura 22. Potencial solar disponible vs. Plantas que incluyen. Fuente: Elaboración propia.**

**Tabla 16. Energía eléctrica acumulada (TWh / año) en España. Fuente: elaboración propia.**

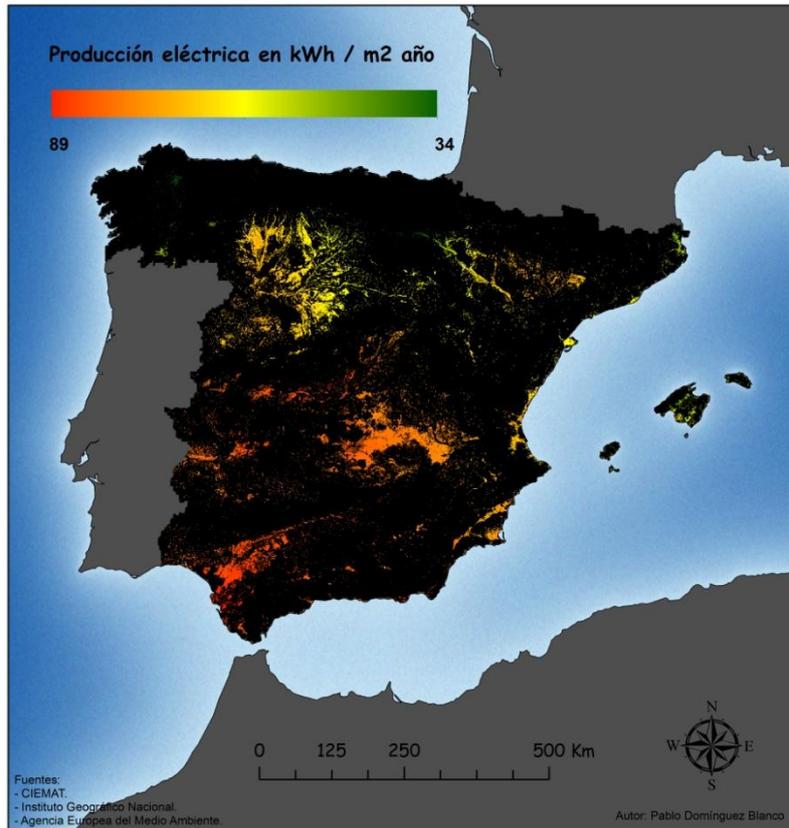
Comunidad autónoma	Área (km <sup>2</sup> )	Total sin filtros.	IDAE	Green peace	NREL (1%)	NREL (3%)	DLR (0)	DLR (1)	Nueva (3%)	Nueva (2%)	Nueva (1%)
Andalucía	86.973	7125	4128	291	467	1484	425	1175	1334	888	423
Aragón	47.590	3471	1885	166	156	730	224	521	686	421	147
Asturias	10.476	535	216	1	1	5	3	7	8	4	1
Cantabria	5.215	273	105	1	0	2	2	8	8	4	1
Castilla-La Mancha	79.412	6300	3939	552	859	2281	740	1897	2110	1545	821
Castilla y León	93.946	6730	3694	771	893	2290	1116	2080	1970	1427	754
Cataluña	31.774	2215	910	17	94	305	37	237	264	170	81
Extremadura	41.493	3384	1981	170	224	983	235	816	931	584	219
Galicia	28.950	1640	685	16	22	90	30	96	104	57	23
Islas Baleares	4.610	309	171	14	33	109	22	93	95	70	30
La Rioja	5.044	304	143	5	9	34	9	31	40	26	10
Madrid	8.017	644	254	38	28	122	47	133	98	62	22
Murcia	11.194	875	558	17	70	235	18	164	219	139	58
Navarra	10.291	635	327	15	31	83	25	92	104	70	35
País Vasco	7.138	347	117	5	0	1	11	17	18	11	5
Valencia	22.985	1701	794	8	104	304	11	267	266	181	88
<b>Totales</b>	<b>495.108</b>	<b>36486</b>	<b>19900</b>	<b>2087</b>	<b>2982</b>	<b>9057</b>	<b>2957</b>	<b>7636</b>	<b>8255</b>	<b>5659</b>	<b>2718</b>



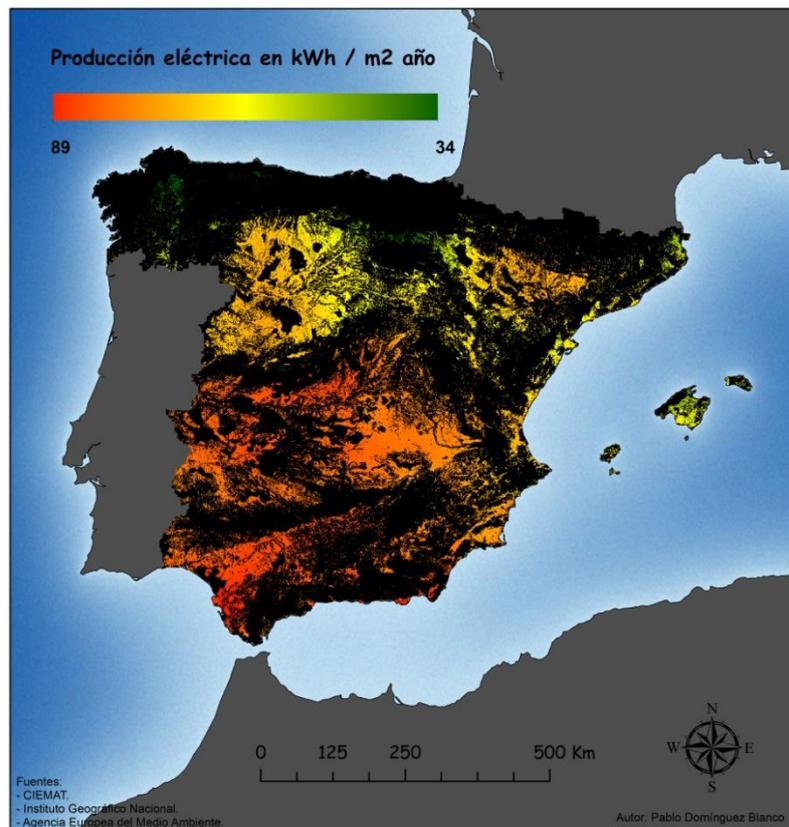
**Figura 23. Potencial solar disponible IDAE.**



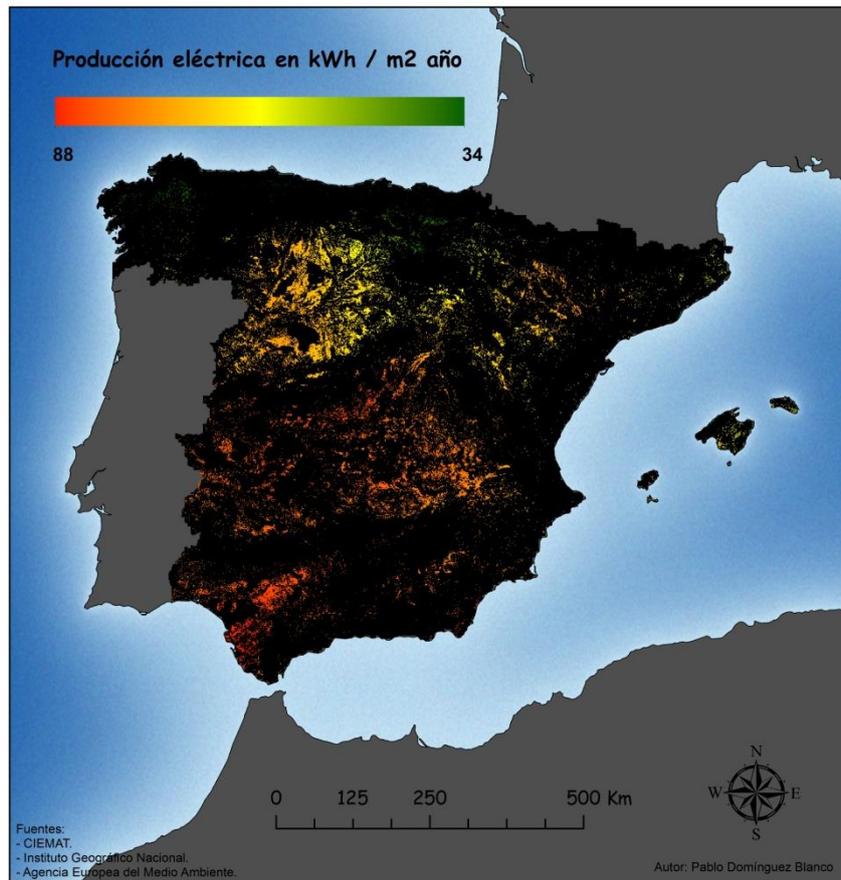
**Figura 24. Potencial solar disponible Greenpeace.**



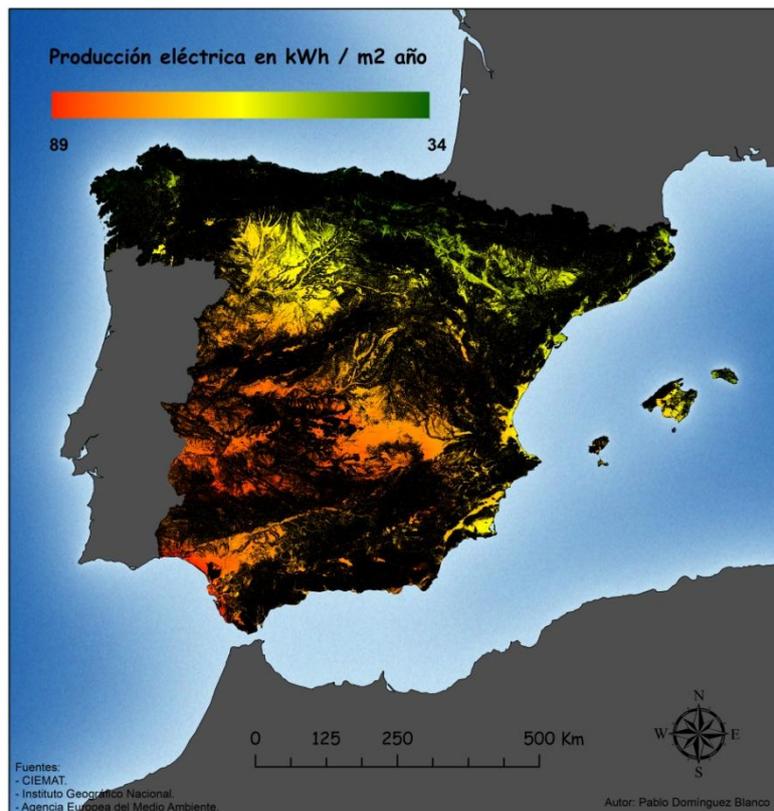
**Figura 25. Potencial solar disponible NREL (1%).**



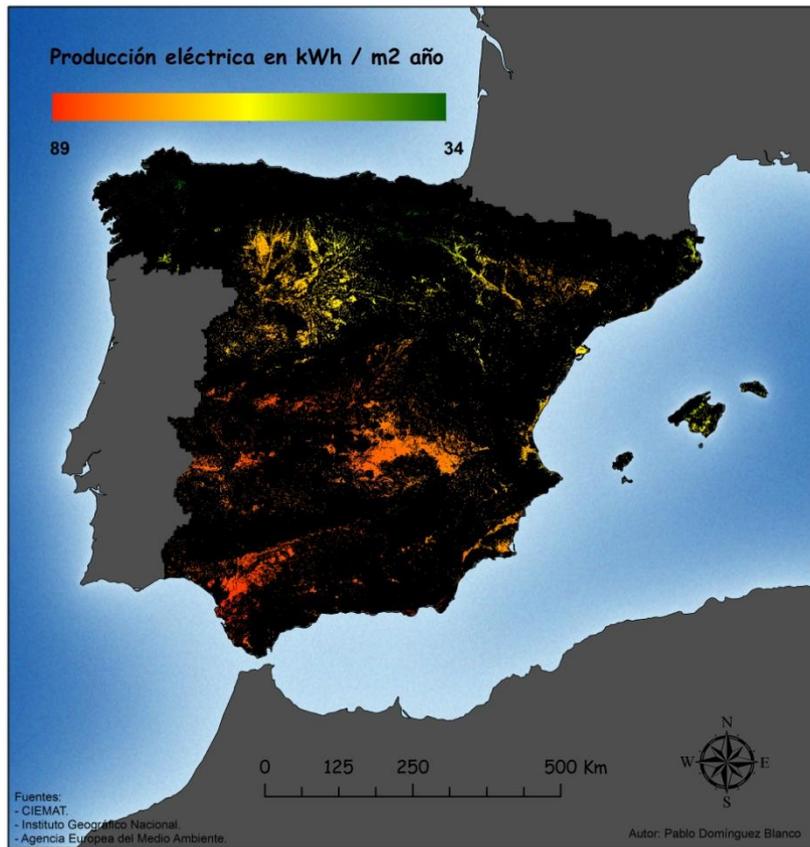
**Figura 26. Potencial solar disponible NREL (3%).**



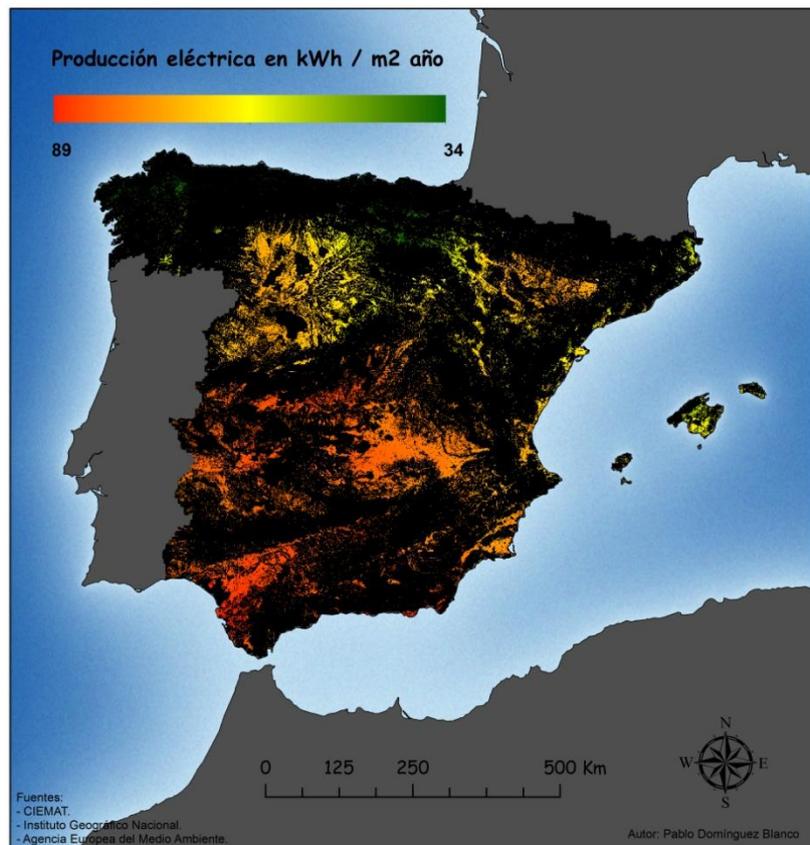
**Figura 27. Potencial solar disponible DLR 0.**



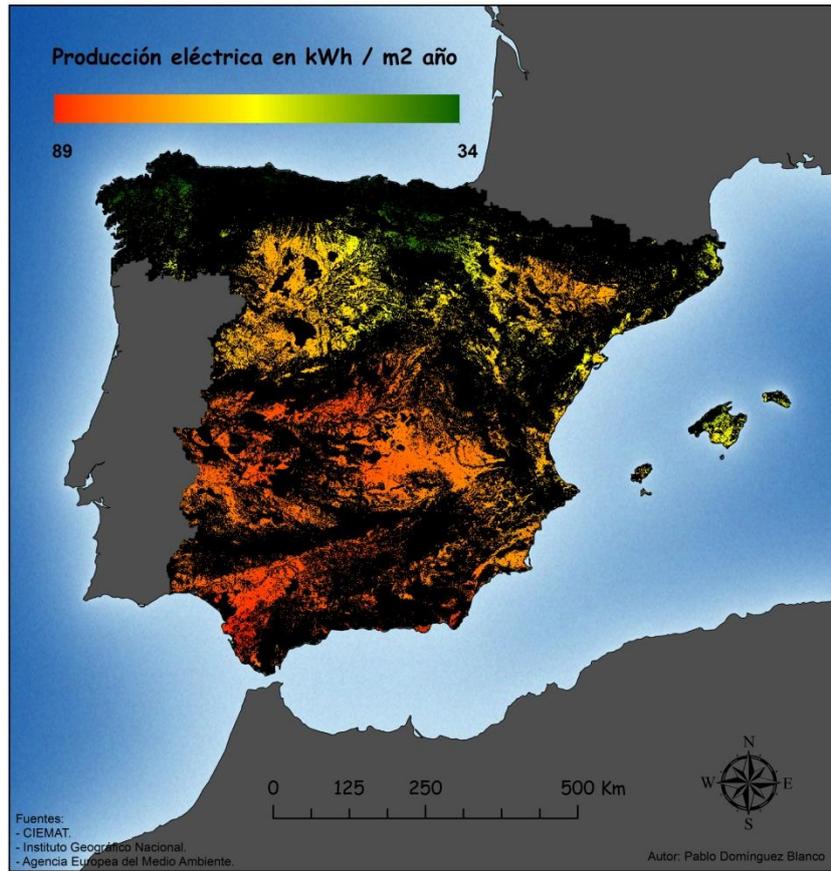
**Figura 28. Potencial solar disponible DLR 1.**



**Figura 29. Potencial solar disponible Nueva (1%).**



**Figura 30. Potencial solar disponible Nueva (2%).**



**Figura 31. Potencial solar disponible Nueva (3%).**

## 9. CONCLUSIONES.

La metodología que considera apta mayor cantidad de área es la del IDAE, ya que, aunque es una de las más restrictivas en cuanto a usos del suelo, no se han considerado las pendientes, lo que lleva a considerar aptas multitud de zonas que las demás metodologías han excluido.

Inicialmente las metodologías más excluyentes son la de Greenpeace, la de NREL (1%) y DLR (0). Esto es debido a que proponen unas restricciones de pendiente y usos del suelo muy fuertes lo que lleva a excluir gran parte del territorio.

Por último, la opciones de NREL (3%) y DLR (1) consideran un margen de pendiente mayor (3% y 2% respectivamente) y no limitan tan fuertemente los usos del suelo válidos, por lo que su área resultante queda en un punto medio entre la más y la menos restrictiva.

Las tres metodologías que mejores resultados han obtenido en cuanto a centrales en zonas aptas son el IDAE, NREL (3%), y DLR (1).

El IDAE destaca como la metodología en la que se ha alcanzado un mayor número de acierto (43 de 46), por lo que podríamos concluir que su análisis de los usos del suelo es correcto. Pese a ello, la cantidad de zonas consideradas aptas con pendientes escarpadas que hacen imposible la instalación de estas centrales, permite considerar que el potencial final es mucho mayor del real.

Por su parte, NREL (3%) y DLR (1) consideran 39 centrales dentro de la zona apta. El número de aciertos se acerca notablemente al del IDAE pero la inclusión de la pendiente como condición permite descartar una gran cantidad de área de alta pendiente que el IDAE sí considera apta y puede desvirtuar los resultados de potencial para dicha zona.

En la validación de las zonas de exclusión, las centrales no han de considerarse puntos, y por lo tanto han de ser consideradas como un área en torno a los mismos. Se considera que en el tamaño del buffer más adecuado en este tipo de centrales es de 750m (177 Ha), pero se estudia además el comportamiento en los casos de 500 y 1000. Se observa que los resultados de la validación dependen fuertemente del tamaño del buffer considerado en torno a la central.

De las 46 centrales, deben considerarse tan solo 43 para el resultado, ya que las otras 3 están situadas en zonas protegidas, donde los proyectos han de ser estudiado de forma individual y teniendo en cuenta sus características particulares.

Observando los resultados del área y la localización de las centrales, parece que tanto NREL (3%) como DLR (1), son metodologías que seleccionan bien las zonas aptas. Sin embargo, la cantidad de área que consideran apta se sitúa en torno al 20% del territorio. La metodología de NREL (1%) considera un área apta del 7,5%, un dato más realista, aunque no consigue incluir tantas centrales.

La nueva metodología propuesta utilizara el estudio de usos del suelo del IDAE y tres restricciones de pendiente diferentes para valorar cuál puede ser la más idónea. Al introducir estos cambios en el análisis del IDAE, el resultado del área total considerado apto, se equipara a las metodologías de NREL y DLR que, a priori, dieron resultados más razonables.

La nueva metodología, con una limitación del 3% de pendiente, considera apta un área del 21,6% del territorio de España, menos de la mitad de lo que consideraba el IDAE.

Si tomamos una limitación de pendiente del 2%, el área apta total se reduce al 14,7%. Y finalmente, si consideramos una limitación del 1% de pendiente, el área se reduce al 7,1%, un resultado parejo a las metodologías de Greenpeace y DLR(0).

La nueva metodología con la pendiente del 2%, optimiza la relación potencial – centrales incluidas.

De entre las metodologías más restrictivas, destaca la nueva metodología con las pendientes al 1%, ya que incluyen el mayor número de centrales.

## 10. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES

Adrase. 2013. Acceso a datos de radiación solar de España. Accesible en <http://www.adrase.es>.

Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA). 2011. Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España. [pdf]. <http://www.appa.es/02appa/02b-documentosappa.php>.

Astrofísica y física. 2012. Disponible en <http://www.astrofiscayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html>. Accedido el 14 de Noviembre de 2013.

CSP today. 2012. Disponible en <http://es.csptoday.com/tecnolog%C3%ADa/%C2%BFpuede-superar-la-fresnel-la-cilindroparab%C3%B3lica>. Accedido el 9 de Noviembre de 2013.

Fernández, J. M. 2009. Tecnología de las energías renovables. Madrid: AMV Ediciones, Ediciones Mundi-Prensa.

European Environmental Agency (EEA). 1995. CORINE Land Cover. [pdf]. Accesible en <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.

German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics. 2005. Concentration Solar Power for the Mediterranean Region (MED-CSP). [pdf]. Accesible en [http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal\\_news/newsarchiv2008\\_1/algerien\\_med\\_csp.pdf](http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal_news/newsarchiv2008_1/algerien_med_csp.pdf).

Greenpeace. 2005. Renovables 2050. Un informe sobre el potencial de las energías renovables en la España peninsular. [pdf]. Accesible en <http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/renovables-2050.pdf>.

González, J. 2009. Energías renovables. Barcelona: Ed. Reverté.

Gutiérrez, J., Gould, M. 2000. Los SIG: Sistemas de Información Geográfica. Madrid: Editorial Síntesis S.A.

Hoyer-Klick, C., Beyer, H. G., Dumortier, D., Schroedter Homscheidt, M., Wald, L., Martinoli, M., Schillings, C., Gschwind, B. t., Menard, L., Gaboardi, E., Polo, J., Cebecauer, T., Huld, T., Suri, M., de Blas, M., Lorenz, E., Kurz, C., Remund, J., Ineichen, P., Tsvetkov, A. and Hofierka, J., 2009. MESoR - Management and exploitation of solar resource knowledge. Proceedings of: SolarPACES 2009, Berlin.

IDAE, CENER, AICIA, e IDOM. 2011. Evaluación del potencial de energía solar termoeléctrica. Estudio técnico PER 2011-2020. [pdf]. Accesible en [http://ida.electura.es/publicacion/296/evaluaci%C3%B3n\\_potencial\\_energ%C3%ADa\\_solar\\_termoel%C3%A9ctrica](http://ida.electura.es/publicacion/296/evaluaci%C3%B3n_potencial_energ%C3%ADa_solar_termoel%C3%A9ctrica).

- Instituto Geográfico Nacional. N.d. Modelo Digital de Elevaciones. Accesible en <http://www.ign.es>.
- Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., Rhind, D. 2001. Geographic Information Systems and Science. Chichester: Ed. John Wiley and Sons, Ltd.
- Madrid, A. 2009. Energías renovables. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones. Madrid: Ed. AMV Ediciones, Mundi Prensa.
- Moldes, F.J. 1995. Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica. Madrid: Editorial Ra-Ma.
- Moreno, A. 2007. Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de Autoaprendizaje con ArcGIS. 2ª edición. Madrid: Editorial Ra-Ma.
- Moselle, B. ed, Padilla, J. ed, Schmalensee, R. ed. 2010. Electricidad verde. Energías renovables y sistemas eléctricos. Madrid: Ed Marcial Pons.
- National Renewable Energy Laboratory. 2007. Southwest Concentrating Solar Power 1000 MW Initiative. [online]. Disponible en [http://www.nrel.gov/csp/1000mw\\_initiative.html](http://www.nrel.gov/csp/1000mw_initiative.html).
- Ortega, M. 2003. Energías renovables. 2ª edición. Madrid: Ed. Thompson Paraninfo.
- Peña, J. 2008. Sistemas de Información Geográfica Aplicados a La gestión del Territorio. 2ª edición. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Protermosolar. N.D. Disponible en <http://www.protermosolar.com/termosolar.html>. Accedido el 9 de Noviembre de 2013.
- Polo, J. 2012. Generación de Mapas de Radiación Solar a partir de Satélites Geoestacionarios. Informes Técnicos CIEMAT. [pdf].
- Polo, J., Ramírez, L., Navarro, A., 2012. Proyecto SOLEFEX. Diseño de la hoja de ruta Andalucía-Marruecos para el impulso de la energía solar termoeléctrica. [pdf]. Accesible en <http://www.solefex.org/files/2012/11/Triptico-Solefex.pdf>.
- Protermosolar. N.d. Asociación Española de la Industria Termoeléctrica. Accesible en <http://www.protermosolar.com>.
- Roldán, J. 2008. Fuentes de energía. Madrid: Ed. Paraninfo.
- United Nations Environment Program (UNEP). 2008. Green Jobs: Towards decent work in a sustainable, low-carbon world. [pdf]. Accesible en [http://www.unep.org/PDF/UNEPGreenjobs\\_report08.pdf](http://www.unep.org/PDF/UNEPGreenjobs_report08.pdf).
- Vignola, F., Harlan, P., Perez, R. and Kmiecik, M., 2007. Analysis of satellite derived beam and global solar radiation data. Solar Energy.
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R. and Renne, D., 1999. Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. Theoretical and Applied Climatology.





