



# UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

## TESIS DOCTORAL

Título
<b>Estrategias para la evaluación del impacto visual de plantas fotovoltaicas mediante sistemas de información geográfica</b>
Autor/es
<b>Enrique Zorzano Alba</b>
Director/es
Luis Alfredo Fernández Jiménez
Facultad
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Titulación
Departamento
Ingeniería Eléctrica
Curso Académico

Tesis presentada como compendio de publicaciones. La edición en abierto de la misma NO incluye las partes afectadas por cesión de derechos



Estrategias para la evaluación del impacto visual de plantas fotovoltaicas mediante sistemas de información geográfica, tesis doctoral de Enrique Zorzano Alba, dirigida por Luis Alfredo Fernández Jiménez (publicada por la Universidad de La Rioja), se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported.

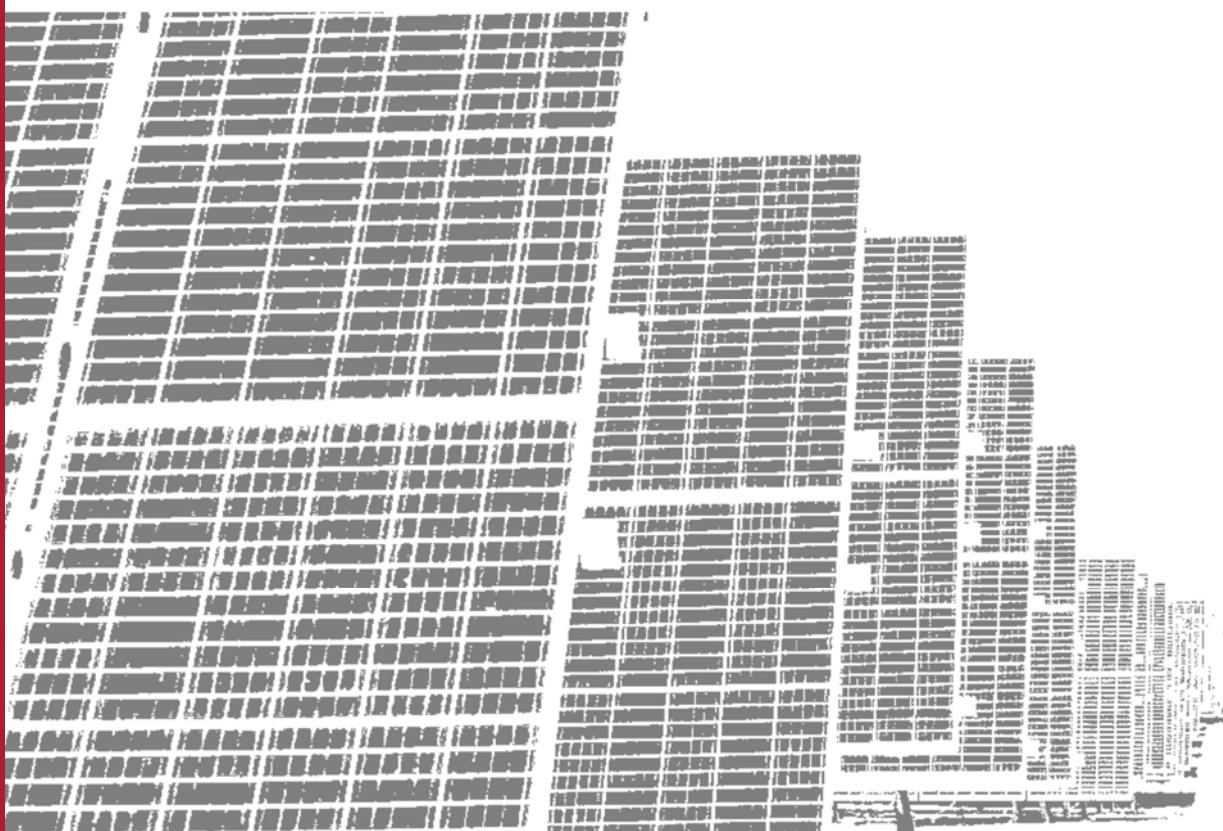
Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.



**Programa de Doctorado en Innovación en  
Ingeniería de Producto y Procesos Industriales**

**ESTRATEGIAS PARA LA EVALUACIÓN DEL  
IMPACTO VISUAL DE PLANTAS  
FOTOVOLTAICAS MEDIANTE SISTEMAS DE  
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**Enrique Zorzano Alba**



**Director**

Dr. Luis Alfredo Fernández Jiménez

LOGROÑO, 2022





UNIVERSIDAD  
DE LA RIOJA

**TESIS DOCTORAL  
2022**

**Programa de Doctorado en Innovación en  
Ingeniería de Producto y Procesos Industriales**

**ESTRATEGIAS PARA LA EVALUACIÓN DEL  
IMPACTO VISUAL DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA**

**Enrique Zorzano Alba**

**Director:** Dr. Luis Alfredo Fernández Jiménez



*A Rosa*

*A Katrina y Abel*

*“La ciencia es la progresiva  
aproximación del hombre al  
mundo real”*



Max Planck



---

## AGRADECIMIENTOS

---

A lo largo de este trabajo de investigación he contado con la ayuda de personas e instituciones sin las cuales esta tesis doctoral no hubiese visto la luz y a las que deseo expresar mi más sincera gratitud.

En primer lugar, al director y tutor de esta tesis, el doctor D. Luis Alfredo Fernández Jiménez, por compartir sus conocimientos, por su paciencia y su perseverancia. Sus buenos consejos y sus palabras de apoyo siempre fueron útiles para dar luz a los momentos en los que el trabajo se hacía confuso por la ceguedad de mi pensamiento.

Deseo expresar también mi agradecimiento a todos mis compañeros y amigos del Grupo de Investigación “Planificación, Operación y Control de Sistemas de Energía Eléctrica – PLOCEL”, Alfredo, Pedro Lara, Montse, Eduardo, Pedro Zorzano, Alberto y Candi. A todos ellos, por su constante apoyo, su ayuda incondicional y el interés mostrado con su interpellación semanal “estado actual de la tesis”, muchas gracias.

A todos mis compañeros del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de La Rioja, al Dr. D. Ignacio J. Ramírez Rosado que me empujó a la aventura de la tesis doctoral y, especialmente a Charo por su constante ánimo, su extraordinaria ayuda y su gran profesionalidad con los trámites administrativos en los estudios de tercer ciclo. Muchas gracias.

Especialmente deseo expresar mi agradecimiento a mi familia. Por estar incondicionalmente conmigo, por apoyarme y darme fuerzas durante este largo camino, a cambio de sufrir mis largas ausencias, aunque no en lo personal, si en lo emotivo y porque convivir con un doctorando no es tarea sencilla. Gracias por todo.

Por último, quiero agradecer la financiación a los trabajos de investigación vinculados a esta tesis, por parte del “Ministerio de Economía y Competitividad” del Gobierno de España, en el marco del Proyecto de Investigación ENE2013-48517-C2-2-R; por parte de la Universidad de La Rioja y del Banco Santander en el marco del Proyecto de Investigación REGI2020-28; y por parte de los Fondos FEDER de la Unión Europea. Además quiero agradecer a la Universidad de la Rioja y al Banco Santander la financiación recibida a través de las diversas ayudas para la realización de tesis doctorales (ATUR).

---

## PUBLICACIONES

---

Esta tesis corresponde a un compendio de trabajos previamente publicados en revistas científicas, cuyas referencias completas e indicadores de calidad se recogen a continuación.

---

### PUBLICACIÓN 1

---

Fernández-Jiménez, L.A.; Mendoza-Villena, M.; Zorzano-Santamaría, P.J.; García-Garrido, Eduardo; Lara-Santillán, P.M.; Zorzano-Alba, E.; Falces, A.; “Site selection for new PV power plants based on their observability”; *Renewable Energy*; 78, pp. 7–15, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.12.063.

Factor de impacto JCR: 3.404; posición en el área “*Energy & Fuels*”: Q2. Factor de Impacto SJR: 1.767; posición en el área “*Renewable energy, sustainability and the environment*”: Q1.

---

### PUBLICACIÓN 2

---

Fernández-Jiménez, L.A.; Mendoza-Villena, M.; García-Garrido, E.; Lara-Santillán, P.M.; Zorzano-Santamaría, P.J.; Zorzano-Alba, E.; Falces, A.; “High voltage overhead power line routing under an objective observability criterion”; *Energies*; 10(10), 2017, doi: 10.3390/en10101576.

Factor de impacto JCR: 2.676; posición en el área “*Energy & Fuels*”: Q2. Factor de Impacto SJR: 0.67; posición en el área “*Renewable energy, sustainability and the environment*”: Q2.

## PUBLICACIÓN 3

---

Zorzano-Alba, E.; Fernández-Jiménez, L.A.; García-Garrido, E.; Lara-Santillán, P.M.; Falces, A.; Zorzano-Santamaría, P.J.; Capellán-Villacián, C.; Mendoza-Villena, M.; “Visibility assessment of new photovoltaic power plants in areas with special landscape value”; *Applied Sciences*; 12(2), 703, 2022, doi: 10.3390/app12020703.

Factor de impacto JCR: 2.679; posición en la categoría “*Engineering Miscelaneus*”: Q2. Factor de impacto SJR: 0.44; posición en la categoría “*Engineering Miscelaneus*”: Q2.

---

## INDICE

---

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1    ARTÍCULOS PUBLICADOS CORRESPONDIENTES A LA TESIS.....	2
1.2    RESUMEN.....	4
1.3    OBJETIVOS .....	7
1.4    METODOLOGÍA.....	8
<b>CAPÍTULO 2. UNIDAD TEMÁTICA.....</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO 3. PRINCIPALES DESARROLLOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>24</b>
3.1    SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS PARA NUEVAS CENTRALES FOTOVOLTAICAS EN FUNCIÓN DE SU OBSERVABILIDAD .....	24
3.1.1    Estructura de datos.....	25
3.1.2    Metodología .....	27
3.2    TRAZADO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN BAJO UN CRITERIO OBJETIVO DE OBSERVABILIDAD.....	39
3.2.1    Estructura de datos.....	40
3.2.2    Metodología .....	41
3.3    EVALUACIÓN DE LA VISIBILIDAD DE NUEVAS CENTRALES FOTOVOLTAICAS EN ZONAS DE ESPECIAL VALOR PAISAJÍSTICO .....	50
3.3.1    Estructura de datos.....	51
3.3.2    Metodología .....	52

<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
4.1. RESULTADOS DE LA SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS PARA NUEVAS CENTRALES FOTOVOLTAICAS EN FUNCIÓN DE SU OBSERVABILIDAD .....	63
4.2. RESULTADOS deL TRAZADO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN BAJO UN CRITERIO OBJETIVO DE OBSERVABILIDAD .....	70
4.3. RESULTADOS de LA EVALUACIÓN DE LA VISIBILIDAD DE NUEVAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS EN ÁREAS CON ESPECIAL VALOR PAISAJÍSTICO .....	74
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>86</b>
<b>APÉNDICE I:</b> Site selection for new PV power plants based on their observability .....	91
<b>APÉNDICE II:</b> High voltage overhead power line routing under an objective observability criterion .....	103
<b>APÉNDICE III:</b> Visibility assessment of new photovoltaic power plants in areas with special landscape value.....	119

---

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1.	Ejemplo de rejilla de un conjunto de datos ráster .....	12
Figura 2.2.	Tamaño de celda en un ráster; <i>a</i> ) entidad original; <i>b</i> ) representación en un ráster de 10 x 10 celdas; <i>c</i> ) representación en un ráster de 5 x 5 celdas .....	13
Figura 2.3.	En un GIS los objetos espaciales que aparecen en la imagen pueden ser representados como, polígonos (superficie de la balsa de riego y edificios), líneas (límites de campos de cultivo y caminos) y puntos (árboles) .....	14
Figura 2.4.	El MDT representa el suelo terrestre desnudo sin ningún objeto, mientras que el MDS incluye también todos los objetos de la superficie .....	15
Figura 2.5.	Composición de capas en un sistema GIS. La capa 1 corresponde a un modelo digital de elevaciones (MDE); la capa 2 corresponde a un conjunto de datos ráster cuyas celdas contienen los valores de la variable analizada; la capa 3 recoge datos en formato vectorial donde cada punto, línea o polígono contiene diferentes atributos .....	16
Figura 3.1.	Variables de distancia $b_1$ y $b_2$ utilizadas por Ogburn en la operación de visión difusa .....	29
Figura 3.2.	Función de decaimiento con la distancia para un objeto con un tamaño de 10 metros .....	30
Figura 3.3.	Diagrama de flujo para el cálculo del <i>POH</i> en la celda $i$ , estando los observadores en el punto de observación $j$ .....	33
Figura 3.4.	Diagrama de flujo para el cálculo del <i>POH</i> en la celda $i$ , estando los observadores en el nodo $n$ del segmento de carretera $k$ .....	36

Figura 3.5.	Ejemplo de una sección de mapa <i>GPOHM</i> .....	47
Figura 3.6.	Ejemplo de una sección de mapa de Rutas de Menor Coste ( <i>LCP</i> ) .....	49
Figura 3.7.	La altura $H_{pv}$ de la planta FV se divide en segmentos de igual longitud para posteriores análisis de visibilidad con diferentes valores de altura .....	57
Figura 3.8.	Líneas de visión que conectan el observador con la instalación FV y con el horizonte global .....	59
Figura 3.9.	Diagrama de flujo del cálculo de $APT_{i,n}$ para una planta FV situada en la zona geográfica representada por la celda $i$ , estando los observadores en la posición representada por el nodo $n$ .....	61
Figura 4.1.	MDT de La Rioja donde se representan las zonas bajo estudio y las principales poblaciones y carreteras. Los valores de la leyenda corresponden a la altura en metros sobre el nivel del mar .....	64
Figura 4.2.	Datos de tráfico correspondientes a las carreteras de la zona estudiada.....	65
Figura 4.3.	<i>a)</i> mapa <i>OSGPOH</i> . <i>b)</i> mapa <i>ORGPOH</i> .....	66
Figura 4.4.	Mapa <i>GPOHI</i> obtenido con los factores de ponderación $w_s = 0,8$ y $w_r = 0,2$ .....	67
Figura 4.5.	<i>a)</i> Mapa de Horas Potenciales de Observación Globales para observadores in situ, <i>OSGPOH</i> . <i>b)</i> Mapa de Horas Potenciales de Observación Globales para observadores en carretera, <i>ORGPOH</i> . Ambos mapas representan el territorio municipal de Arnedo .....	68
Figura 4.6.	Mapa <i>nGPOH</i> en el que se ha tomado un valor de 0,5 para los factores de ponderación $w_s$ y $w_r$ .....	69
Figura 4.7.	Región seleccionada en la que se incluyen centros urbanos, carreteras y <i>GPOHM</i> (en horas) .....	71
Figura 4.8.	Mapa <i>CSM</i> donde puede verse la trayectoria óptima y corredores visuales para una nueva HVOPL de 66 kV entre los puntos origen y destino indicados .....	73
Figura 4.9.	Camino de Santiago a su paso por la Comunidad Autónoma de La Rioja.....	74
Figura 4.10.	Las cinco rutas del Camino de Santiago que atraviesan por La Rioja .....	75
Figura 4.11.	Mapa de la variable <i>GAPT</i> , en horas/año, de la zona estudiada .....	79

---

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

Se presenta esta tesis doctoral como compendio de publicaciones acorde a la normativa para la defensa de tesis doctorales de la Universidad de La Rioja, aprobada por el Consejo de Gobierno de esta Universidad en la sesión celebrada el 3 de noviembre de 2016, siguiendo el procedimiento para la tramitación de tesis doctorales, aprobado por el Comité de Dirección de Doctorado en la sesión con fecha 17 de febrero de 2017.

En el Capítulo 1 se recogen los artículos publicados que dan origen a esta tesis por compendio de publicaciones. En el mismo capítulo se presenta un resumen de la unidad temática de la tesis, los objetivos establecidos en el trabajo de investigación y la metodología utilizada.

En el Capítulo 2 se presenta la unidad temática y las metodologías que han sido desarrolladas para la búsqueda de los lugares más apropiados para la construcción de plantas fotovoltaicas y otras instalaciones asociadas, como líneas eléctricas, exclusivamente desde el criterio de su percepción visual. Estas metodologías se basan en diversos análisis espaciales mediante Sistemas de Información Geográfica (GIS) y permiten evaluar la perturbación visual que, las citadas instalaciones, pueden producir en el paisaje.

El Capítulo 3 recoge los resultados obtenidos tras aplicar tales metodologías a casos de estudio en determinadas zonas geográficas de la Comunidad Autónoma de La Rioja (España).

En el Capítulo 4 se recogen las conclusiones finales. A continuación de este, se incluye una lista de referencias bibliográficas y finalmente se exponen los Apéndices I, II y III, que recogen las publicaciones completas que dan origen al presente trabajo de investigación.

## **1.1 ARTÍCULOS PUBLICADOS CORRESPONDIENTES A LA TESIS**

---

En este apartado se presentan tres artículos que integran el compendio de publicaciones, que da lugar a esta tesis, y los cuales han sido publicados en revistas científico-técnicas indexadas en bases de datos internacionales con factor de impacto en áreas temáticas relacionadas con la Ingeniería Eléctrica, las energías renovables, la alteración del paisaje y el impacto visual.

El primer artículo fue publicado por Elsevier en la revista *Renewable Energy* la cual se encuentra indexada en los *Journal Citation Reports* (JCR) de Clarivate Analytics. La revista también se encuentra indexada en *Scimago Journal Rank* (SJR) de Elsevier. En el año de publicación (2015) la revista obtuvo los siguientes índices:

Factor de impacto JCR: 3.404; posición en el área “*Energy & Fuels*”: Q2.

Factor de Impacto SJR: 1.767; posición en el área “*Renewable energy, sustainability and the environment*”: Q1.

El segundo artículo fue publicado por *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI) en la revista *Energies* que actualmente se encuentra indexada en los *Journal Citation Reports* (JCR) de Clarivate Analytics. La revista también se encuentra indexada en *Scimago Journal Rank* (SJR) de Elsevier. En el año de publicación (2017) la revista obtuvo los siguientes índices:

Factor de impacto JCR: 2.676; posición en el área “*Energy & Fuels*”: Q2.

Factor de Impacto SJR: 0.67; posición en el área “*Renewable energy, sustainability and the environment*”: Q2.

El tercer artículo ha sido publicado por *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI) en el número especial *GIS Applications in Green Development* de la revista *Applied Sciences*, que actualmente se encuentra indexada en los *Journal Citation Reports* (JCR) de Clarivate Analytics. La revista también se encuentra indexada en *Scimago Journal Rank* (SJR) de Elsevier. En la fecha de publicación (enero de 2022) estaban accesibles las estadísticas de la revista hasta el año 2020, año en el cual no había sido creado el número especial donde se publicó el artículo. En ese año la revista obtuvo los siguientes índices generales:

Factor de impacto JCR: 2.679; posición en la categoría “*Engineering Miscelaneus*”: Q2.

Factor de impacto SJR: 0.44; posición en la categoría “*Engineering Miscelaneus*”: Q2.

A continuación, se indican las referencias de los artículos publicados.

1. Fernández-Jiménez, L.A.; Mendoza-Villena, M.; Zorzano-Santamaría, P.J.; García-Garrido, Eduardo; Lara-Santillán, P.M.; Zorzano-Alba, E.; Falces, A.; “Site selection for new PV power plants based on their observability”; *Renewable Energy*, 78, pp. 7–15, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.12.063.
2. Fernández-Jiménez, L.A.; Mendoza-Villena, M.; García-Garrido. E.; Lara-Santillán, P.M.; Zorzano-Santamaría, P.J.; Zorzano-Alba, E.; Falces, A.; “High voltage overhead power line routing under an objective observability criterion”; *Energies*, 10(10), 2017, doi: 10.3390/en10101576.
3. Zorzano-Alba, E.; Fernández-Jiménez, L.A.; García-Garrido, E.; Lara-Santillán, P.M.; Falces, A.; Zorzano-Santamaría, P.J.; Capellán-Villacián, C.; Mendoza-Villena, M.; “Visibility assessment of new photovoltaic power plants in areas with special landscape value”; *Applied Sciences*, 12(2) 703, 2022, doi: 10.3390/app12020703.

## **1.2 RESUMEN**

---

Las centrales eléctricas basadas en energías renovables ofrecen importantes ventajas medioambientales con respecto a las centrales eléctricas convencionales, principalmente la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero. A pesar de las ventajas, frecuentemente existe una oposición de la población local a la construcción de estas infraestructuras. Una de las causas de esta oposición es la alteración o modificación visual del entorno que estas infraestructuras pueden provocar, sobre todo si se instalan próximas a lugares con gran valor cultural y/o paisajístico. En este ámbito es interesante disponer de herramientas de ayuda para identificar aquellas zonas geográficas donde el impacto visual causado por estas instalaciones sea mínimo.

Por este motivo, el marco en el que se engloban los trabajos de investigación que dieron lugar a los artículos recogidos en el compendio de publicaciones que conforman esta tesis doctoral, es la búsqueda de los lugares más adecuados para la construcción de nuevas infraestructuras eléctricas, lugares en los que se respeten ciertos criterios establecidos de observabilidad desde determinados puntos de observación. El término “observabilidad” no aparece en el diccionario de la Real Academia Española (RAE), sin embargo, en este trabajo la observabilidad representa el número acumulado de horas, en las que un objeto puede ser visto por cada uno de los posibles observadores durante un periodo de tiempo determinado. Esta nueva variable, tal como se ha definido, es más afín al impacto visual que la “visibilidad”, que, o bien, hace referencia a la cualidad de ser visible, o bien, a la distancia a la que pueden reconocerse o verse los objetos, según recoge la RAE. En este contexto, no será lo mismo que un objeto sea visto por un observador, que por 100 observadores y tampoco será igual que dicho objeto sea visto durante un minuto, que durante una hora. Por lo tanto, el término “observabilidad” estará asociado a una variable objetiva que no estará sujeta a valoraciones personales.

Las infraestructuras eléctricas consideradas, en los estudios realizados en la elaboración de este trabajo, son centrales eléctricas basadas en energías renovables (fundamentalmente plantas fotovoltaicas) y determinadas instalaciones asociadas a

las mismas, como líneas eléctricas aéreas de alta tensión. Para este fin, se han utilizado Sistemas de Información Geográfica (GIS), cuya eficacia en el análisis de datos espaciales es ampliamente reconocida.

Un GIS permite utilizar gran variedad de estructuras de datos georreferenciados, es decir, datos vinculados a una posición geográfica. La función principal de un GIS es consultar, integrar, analizar, almacenar, editar y representar de forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un determinado territorio. La superposición de capas de datos geográficos en un GIS permite realizar complicados cálculos y facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa geográfico, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, convirtiéndose así, en una valiosa herramienta de apoyo en la toma de decisiones.

Las centrales fotovoltaicas (FV) han sido estos últimos años las instalaciones generadoras de energía eléctrica basadas en fuentes renovables con un mayor crecimiento. A pesar de sus ventajas medioambientales, existen también algunas restricciones respecto a la aceptación social de estas instalaciones. Una de estas restricciones es el impacto visual que las grandes centrales fotovoltaicas pueden generar en las personas a causa de cambios indeseados en el paisaje, provocando el rechazo de la población local y, por consiguiente, el retraso o anulación de la construcción de nuevas instalaciones de este tipo.

En este contexto, se desarrolló inicialmente una metodología para clasificar los lugares factibles de una determinada zona geográfica, para la construcción de nuevas plantas fotovoltaicas en función de su observabilidad. Esta metodología se basa en métodos de *fuzzy viewshed* (cuencas visuales difusas) y *decaimiento visual* con la distancia, que permiten calcular el número máximo de horas, de un día medio, en las que la nueva planta fotovoltaica puede ser vista por cada posible observador. Este observador puede estar fijo en un lugar (*in situ*) o en movimiento, viajando por carretera. Una vez que la metodología ha sido implementada en un GIS es posible presentar los resultados en formato de mapas que ayudan de una forma fácil a identificar visualmente las mejores áreas de la zona estudiada.

Posteriormente, se desarrolló un segundo trabajo que presenta una metodología que ayuda a identificar las rutas óptimas para la construcción de nuevas Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión (HVOPL por sus siglas en inglés) bajo un criterio de observabilidad, permitiendo la selección de aquellas rutas con menor tiempo de observación, en una determinada zona de estudio. Esta metodología utiliza métodos de *fuzzy viewshed* y una *función de decaimiento* cuyos valores decrecen con la distancia. La aplicación de esta metodología sobre un sistema GIS consigue un conjunto de rutas que une los puntos origen y destino de la nueva HVOPL, creando un corredor visual, que incluye todas las rutas posibles con una observabilidad de sus apoyos por debajo de un determinado umbral límite.

Por último, se ha desarrollado una nueva metodología que sirve de ayuda para la búsqueda de las zonas geográficas factibles para la construcción de futuras plantas FV en zonas con gran valor paisajístico y/o cultural, también bajo el criterio de su observabilidad, ayudando a mantener el entorno libre de intrusiones visuales causadas por este tipo de instalaciones. A partir de varios análisis repetitivos es posible determinar cuál es la observabilidad que, de la nueva planta FV, tienen los posibles observadores que transitan por la zona estudiada. La observabilidad es evaluada mediante el tiempo de percepción acumulado en un año, teniendo en cuenta la velocidad en la dirección de desplazamiento de los observadores. En cada análisis también se considera el posible aumento del grado de visibilidad de la planta FV cuando ésta queda total o parcialmente por encima de la línea del horizonte, con el cielo de fondo. Generalmente las instalaciones con un cielo claro como fondo tienen mayor contraste de color y, por tanto, mayor grado de percepción visual que instalaciones con un color de fondo más oscuro, como el suelo o terreno que se encuentra detrás. No se han tenido en cuenta las variaciones en el grado de visibilidad causadas por los cambios de luz y contrastes de color a largo del día o por las condiciones meteorológicas. Esta metodología puede ayudar a los diferentes agentes implicados en la toma de decisiones a clasificar los lugares más adecuados para la instalación de nuevas plantas FV bajo un criterio de percepción visual, manteniendo los entornos de especial interés cultural o paisajístico a salvo de perturbaciones que puedan causar un impacto visual.

### **1.3 OBJETIVOS**

---

Los objetivos que se han marcado en este trabajo de investigación se enumeran a continuación.

1. Desarrollar una nueva metodología, basada en GIS, para identificar en una zona geográfica, las localizaciones más adecuadas para la construcción de nuevas plantas fotovoltaicas bajo el criterio de su observabilidad. Se tendrán en cuenta factores como la orografía de la zona de estudio, la altura sobre el terreno de las instalaciones fotovoltaicas y del observador y la disminución de la agudeza visual al aumentar la distancia entre el objeto observado y el observador. Esta metodología permite calcular el número máximo de Horas Potenciales de Observación (*POH*), que representa el valor acumulado del número máximo de horas, de un día medio, en el cual una planta fotovoltaica puede ser vista por cada posible observador. Se han considerado dos tipos de observadores: observador fijo (*in situ*), generalmente localizado en los núcleos urbanos, y observador en movimiento, el cual se desplaza a lo largo de las carreteras. Con la evaluación de la variable *POH* en la zona estudiada, es posible obtener un mapa que ayuda a identificar visualmente los lugares de la zona con mayor o menor observabilidad.
2. Crear una metodología para determinar las posibles rutas para la construcción de una nueva HVOPL con un límite definido para la observabilidad de sus apoyos. Esta metodología, basada en GIS, da como resultado un mapa que permite identificar fácilmente corredores visuales. Los corredores visuales son las zonas del mapa en las que el coste acumulado de la trayectoria, desde una celda origen hasta una celda destino, se encuentra por debajo de un determinado valor umbral. La variable utilizada como coste corresponde a las Horas Potenciales de Observación Globales (*GPOH*), y corresponde al valor acumulado del número de horas de un día medio en el que cualquier apoyo de la nueva HVOPL puede ser visto por todos los posibles observadores *in situ*,

localizados en los núcleos urbanos y por los observadores en movimiento que se desplazan a lo largo de carreteras.

3. Desarrollar una nueva metodología basada en un sistema GIS, que ayude a los diferentes agentes implicados en la toma de decisiones a identificar y seleccionar los lugares más adecuados, de una determinada zona geográfica, para la instalación de nuevas plantas fotovoltaicas bajo el criterio de su observabilidad, manteniendo los paisajes de especial interés o los espacios culturales singulares a salvo de perturbaciones que pudieran causar un impacto visual. Se pretende obtener un conjunto de datos ráster (mapas ráster) que recojan los valores de la variable denominada Tiempo de Percepción Acumulado (*APT*). La variable *APT* representa el número de horas acumuladas que una planta fotovoltaica puede ser vista, en un año medio, por potenciales observadores en movimiento, caminando a lo largo de una ruta o camino. Para la evaluación de esta variable se incluyen dos nuevos factores: un factor que considera la parte visible de la instalación FV, desde un determinado punto de observación y un índice que tiene en cuenta la parte de la instalación que es vista por encima de la línea del horizonte, desde ese mismo punto de observación. Estos factores permitirán dar mayor grado de visibilidad a aquellas instalaciones que se vean total o parcialmente por encima del horizonte.

## 1.4 METODOLOGÍA

---

La metodología que se ha seguido para alcanzar los objetivos establecidos se presenta seguidamente.

1. Revisión bibliográfica<sup>1</sup> sobre técnicas de geocomputación utilizando Sistemas de Información Geográfica.

---

<sup>1</sup> Cada una de las revisiones bibliográficas se refiere a cada uno de los años en que se publicaron los correspondientes artículos que constituyen el compendio de publicaciones.

2. Revisión bibliográfica sobre modelos, técnicas y herramientas utilizadas para llevar a cabo análisis de visibilidad desde varios puntos de observación.
3. Revisión bibliográfica sobre modelos, técnicas y herramientas utilizadas para la elaboración de mapas de corredores visuales en GIS.
4. Estudio y aprendizaje de programación de funciones en lenguaje de programación R.
5. Revisión bibliográfica sobre técnicas de geocomputación utilizando el lenguaje de programación R y su integración en sistemas GIS.
6. Creación e implementación de un modelo espacial en un sistema GIS para identificar las ubicaciones óptimas, bajo el criterio de observabilidad, para la construcción de nuevas plantas fotovoltaicas. El resultado obtenido serán mapas ráster que recogerán los valores de la variable *POH* que representa el valor acumulado del número máximo de horas de un día medio en el que una planta fotovoltaica puede ser vista por cada posible observador fijo en un lugar o en movimiento.
7. Creación e implementación de una metodología en un sistema GIS, que permita determinar las posibles rutas para la construcción de una nueva HVOPL, con un límite máximo definido para la observabilidad de sus apoyos, por parte de posibles observadores. Como resultado se obtendrá una serie de mapas que permitirán identificar fácilmente los corredores visuales en los que el coste acumulado de la trayectoria, desde una celda origen hasta una celda destino se encuentra por debajo de dicho límite de observabilidad.
8. Creación e implementación de un nuevo modelo espacial en un sistema GIS para identificar las localizaciones más adecuadas para la construcción de nuevas plantas fotovoltaicas, bajo el criterio de su observabilidad. El modelo permitirá calcular el valor correspondiente al Tiempo de Percepción Acumulado (*APT*) el cual representa el número

de horas acumuladas que una planta fotovoltaica puede ser vista, en un año medio, por posibles observadores en movimiento.

9. Creación e implementación de nuevas herramientas GIS mediante lenguaje de programación R, que ayudarán a determinar factores que afectan al grado de percepción visual, relacionados con la parte vista (en términos de altura) de la instalación FV y la parte vista que queda por encima de la línea del horizonte, que intervienen directamente en el cálculo del *APT*.

---

## CAPÍTULO 2. UNIDAD TEMÁTICA

---

La integración en la red eléctrica de plantas de generación basadas en energías renovables se ha visto impulsada en los últimos años por razones medioambientales, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de combustibles fósiles. Las ayudas económicas de las autoridades gubernamentales para las instalaciones de energías renovables, principalmente las plantas de generación basadas en energía eólica y fotovoltaica, han supuesto un intenso proceso de expansión en toda Europa [1]. La disponibilidad de terrenos para construir una nueva instalación es la primera necesidad que hay que satisfacer. En el caso de nuevos parques eólicos o centrales fotovoltaicas, son muchos los factores que intervienen en la decisión de seleccionar el lugar adecuado (recurso renovable, distancias a carreteras, distancias a líneas eléctricas, orografía del terreno, proximidad a núcleos urbanos, impacto visual, etc.) [2,3].

A pesar de las ventajas que ofrecen las centrales eléctricas basadas en energías renovables, a menudo, pueden sufrir el rechazo social debido a su alto impacto visual, especialmente si se encuentran ubicadas en lugares próximos a zonas con un gran valor cultural y/o paisajístico. Por ello, la localización de estas infraestructuras de generación eléctrica tiene una fuerte dependencia geográfica y afecta significativamente a la planificación. Los modelos de análisis espacial, implementados en un sistema GIS, son adecuados para buscar soluciones satisfactorias que cumplan con los criterios de visibilidad marcados.

Un Sistema de Información Geográfica es un conjunto de hardware, software, bases de datos y procesos diseñados para consultar, integrar, analizar,

almacenar, editar y representar, de forma eficiente, datos localizados geográficamente, asociados a una determinada región o territorio. Un GIS integra muchos tipos diferentes de capas de datos espaciales. Un dato espacial es cualquier dato que hace referencia a una determinada localización o zona geográfica [4]. Los sistemas GIS trabajan con diferentes tipos de datos, entre los que destacan los datos ráster y los datos vectoriales.

Un conjunto de datos ráster se compone de celdas o píxeles regularmente espaciados formando una rejilla o malla. Cada celda de la rejilla representa una unidad o área geográfica y, por lo general, es de forma cuadrada, aunque pueden existir casos en los que se utilicen celdas de tipo rectangular. La rejilla define el espacio geográfico como una matriz de puntos de cuadrícula cuadrados de igual tamaño dispuestos en filas y columnas. Cada celda de la cuadrícula almacena un valor numérico que representa un atributo geográfico como, la elevación media del terreno, pendiente de la superficie del suelo, usos del terreno, o cualquier otra variable de interés (Figura 2.1). Cada celda de la rejilla se referencia por sus coordenadas geográficas.

2	2	1	1	1	1	2	2	3	2
2	2	2	1	1	2	2	3	2	2
2	2	2	2	2	2	3	2	2	2
2	4	4	2	2	2	3	2	2	2
4	4	4	2	2	2	2	3	2	2
4	5	4	4	2	2	2	2	3	2
4	5	5	5	4	2	2	2	3	2
4	6	6	5	4	2	2	2	3	2
4	5	6	5	4	4	2	3	2	2
2	4	5	5	4	4	2	3	2	2

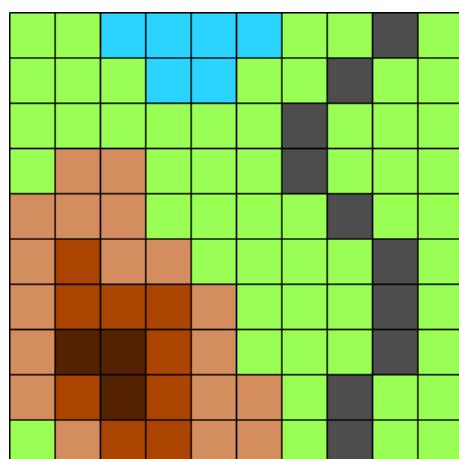


Figura 2.1. Ejemplo de rejilla de un conjunto de datos ráster.

El nivel de detalle de un ráster depende, en general, del tamaño de la celda o píxel del ráster (resolución espacial). La celda debe ser lo suficientemente pequeña para capturar el detalle necesario y lo suficientemente grande para realizar un análisis rápido y un almacenamiento de los datos de manera eficiente. Con una

celda de tamaño muy pequeño es posible representar mayor detalle en las entidades y disponer de mayor cantidad de datos. Sin embargo, los ráster con tamaños de celda más pequeños implican mayores tiempos de procesamiento y mayor espacio de almacenamiento (Figura 2.2). El conjunto de celdas que constituye el área geográfica bajo estudio y los valores asociados a la variable que representan, se recogen en una capa ráster en el sistema GIS.

Es posible cambiar el tamaño de celda o píxel de un ráster mediante diferentes técnicas de muestreo. Esto no implica que si un ráster se muestrea a un tamaño de celda más pequeño (mayor resolución) se obtenga más detalle. El detalle será el mismo, pero, sin embargo, se utilizará un número mayor de celdas para la misma información, reduciendo la velocidad de procesamiento de análisis.

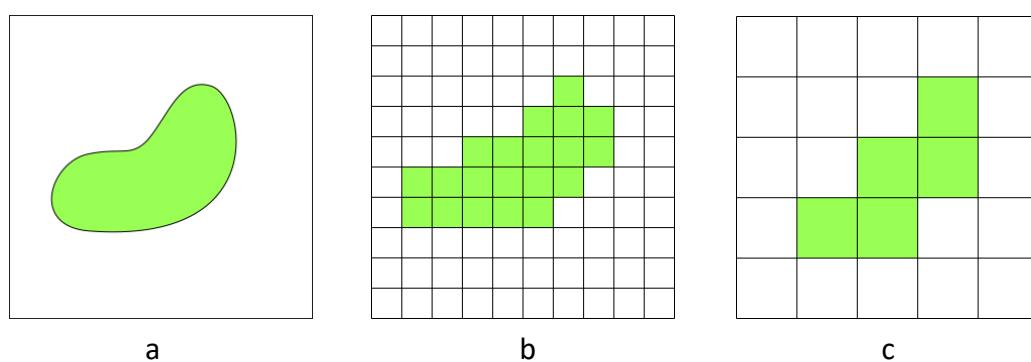


Figura 2.2. Tamaño de celda en un ráster; a) entidad original; b) representación en un ráster de  $10 \times 10$  celdas; c) representación en un ráster de  $5 \times 5$  celdas.

En los sistemas GIS los datos en formato vectorial definen elementos geométricos como puntos, líneas y polígonos. Este formato resulta especialmente adecuado para la representación de entidades reales ubicadas en el espacio como carreteras, líneas eléctricas, ríos, centros urbanos, parcelas de cultivo, etc. (Figura 2.3).

Los atributos de los objetos espaciales en formato vectorial se almacenan en una base de datos denominada *tabla de atributos*, lo que permite visualizar, consultar y analizar los datos. La tabla está constituida por filas y columnas, y todas

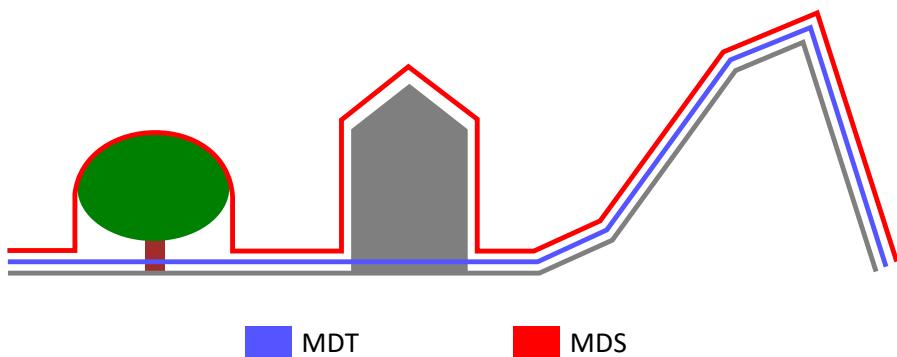
las filas (registros) tienen el mismo número de columnas (campos). Cada registro representa un objeto espacial, mientras que cada campo puede almacenar una característica concreta del objeto (superficie, longitud, especie de árbol, fecha, etc.).

Generalmente, las aplicaciones GIS agrupan los diferentes conjuntos de datos (ráster y vectoriales) en distintas coberturas o capas. Los objetos vectoriales espaciales de una capa tienen el mismo tipo de geometría, por lo que también les corresponden los mismos tipos de atributos. Por ejemplo, en una capa podemos representar los centros urbanos de una región mediante polígonos, los cuales tendrán asociados atributos como el número de habitantes, superficie ocupada, valor medio del suelo, etc. En otra capa se pueden representar las carreteras mediante líneas, que pueden tener asociados atributos como la longitud, límite de velocidad, o la densidad de tráfico. Otra capa puede contener puntos que representen puntos kilométricos, vértices geodésicos, árboles, etc.



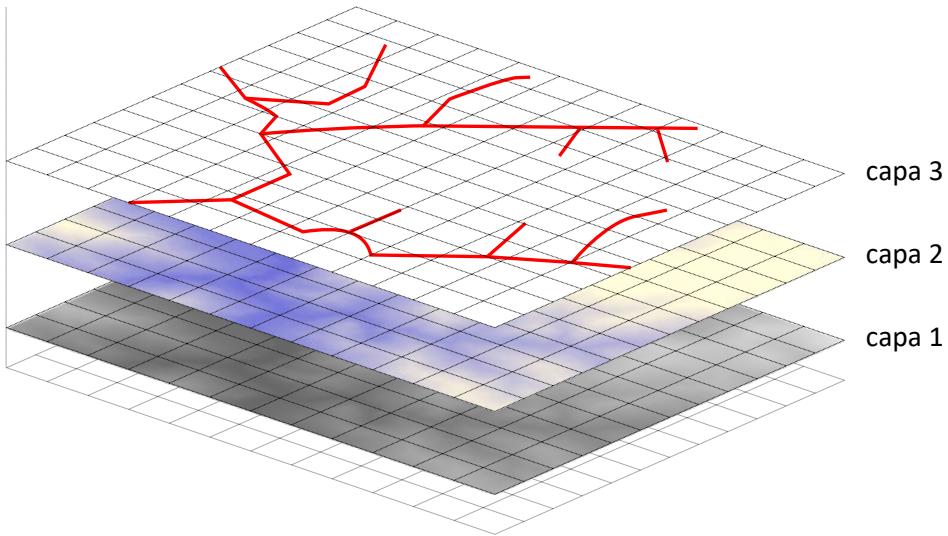
*Figura 2.3. En un GIS los objetos espaciales que aparecen en la imagen pueden ser representados como, polígonos (superficie de la balsa de riego y edificios), líneas (límites de campos de cultivo y caminos) y puntos (árboles).*

En un GIS debe existir una capa base que corresponde a la capa de datos a la que se referencian, geométricamente, el resto de las capas. Es habitual que el modelo digital de elevaciones (MDE) se utilice como capa base. El MDE es la representación digital de la elevación de la superficie terrestre con respecto a una referencia. En concreto, los MDE incluyen a los modelos digitales del terreno (MDT) y a los modelos digitales de superficie (MDS) [5]. Los MDT representan la elevación del suelo desnudo, sin tener en cuenta ningún elemento de la superficie, mientras que los MDS representan la elevación de la superficie terrestre, incluidos los obstáculos no asociados exclusivamente a la orografía como, por ejemplo, árboles, vegetación, edificios y otros objetos naturales o artificiales (Figura 2.4).



*Figura 2.4. El MDT representa el suelo terrestre desnudo sin ningún objeto, mientras que el MDS incluye también todos los objetos de la superficie.*

Hay que destacar que el conjunto de capas que se integran en un mismo sistema GIS tiene una característica común, que es fundamental para realizar análisis espaciales, y es que todas las capas están georreferenciadas con respecto a una referencia geográfica y, por tanto, un punto de una determinada capa tiene exactamente las mismas coordenadas (x, y) en las demás. Esta característica permite hacer una perfecta superposición entre todas las capas para llevar a cabo determinadas operaciones espaciales, combinando adecuadamente la información contenida en las mismas (Figura 2.5), lo que a su vez facilita poder explorar, visualizar y consultar los datos.



*Figura 2.5. Composición de capas en un sistema GIS. La capa 1 corresponde a un modelo digital de elevaciones (MDE); la capa 2 corresponde a un conjunto de datos ráster cuyas celdas contienen los valores de la variable analizada; la capa 3 recoge datos en formato vectorial donde cada punto, línea o polígono contiene diferentes atributos.*

Los conjuntos de datos ráster permiten almacenar diferente información, en forma de valores numéricos asociados a distintas variables. Es decir, cada capa ráster está asociada a una variable diferente. Mediante técnicas de geocomputación es posible crear nuevas capas ráster que recojan información relevante en el contexto de las investigaciones y trabajos desarrollados. Por ejemplo, es factible crear una capa ráster cuyas celdas recojan los valores correspondientes a las horas acumuladas de observación, durante un periodo de tiempo dado, de determinadas infraestructuras por parte de los observadores en la zona. Estos observadores pueden estar fijos en determinadas localizaciones o, por el contrario, en movimiento a través de diversas rutas como carreteras o caminos.

Los datos de carreteras, caminos y otros tipos de infraestructuras como líneas eléctricas pueden ser almacenados en capas de datos vectoriales. Las localizaciones donde se ubican los posibles observadores también pueden ser

almacenadas en este tipo de formato vectorial. Hay que tener en cuenta, que en función de las técnicas de geocomputación aplicadas para el tratamiento de datos geográficos, puede resultar más interesante trabajar en formato ráster o en formato vectorial, por lo que existe la posibilidad de que tengamos que pasar de un formato a otro. Para pasar de formato vectorial a ráster tendremos que hacer una “rasterización” y, por el contrario, para pasar de formato ráster a vectorial tendremos que realizar una “vectorización”. La conversión de un formato a otro es muy habitual y para ello existen herramientas específicas en la mayoría de los GIS.

El empleo de sistemas GIS obedece a la necesidad de resolver problemas espaciales en los que cabe la posibilidad de considerar aspectos técnicos, medioambientales, económicos, sociales, etc., y, además, a la capacidad que tiene este tipo de sistemas para la representación gráfica de los datos que intervienen en el análisis, así como de los resultados obtenidos.

Decidir la ubicación de nuevas infraestructuras como, por ejemplo, una central eléctrica basada en energías renovables, una línea eléctrica aérea, etc., es una actividad que requiere de detallada información espacial de la zona analizada. Conocer la disponibilidad de terrenos con capacidad para alojar las futuras instalaciones es una de las primeras necesidades que se tendrán que satisfacer. En el caso particular de la construcción de una planta basada en energía renovable también es fundamental conocer el potencial energético disponible en el área estudiada. Por ejemplo, Moser et al. en [6] evalúan el potencial fotovoltaico en el sur del Tirol, teniendo en cuenta las instalaciones FV en los tejados y en otras superficies no convencionales.

Un sistema GIS permite realizar un análisis espacial de otros datos de la zona de estudio como son: la orografía, las distancias a carreteras y a líneas eléctricas, recurso renovable o incluso considerar los datos climáticos [7], lo que, sin duda, puede ayudar a localizar los mejores emplazamientos para construir nuevas plantas energéticas basadas en recursos renovables.

Otro importante factor que puede influir notablemente en la búsqueda de las localizaciones más adecuadas es el alto impacto visual de este tipo de

infraestructuras. A menudo pueden sufrir el rechazo de la población local, sobre todo, si se encuentran en áreas próximas a lugares con alto valor paisajístico y/o cultural, lo que puede ralentizar e incluso bloquear la construcción de tales infraestructuras [8], incurriendo en posibles sobrecostes. Por lo tanto, los modelos de análisis espacial pueden resultar adecuados para buscar soluciones factibles y encontrar localizaciones que cumplan con los criterios de visibilidad fijados previamente.

La evaluación del impacto visual y/o paisajístico se ha convertido en una pieza importante en el desarrollo de proyectos de nuevas infraestructuras de energía como parques eólicos, plantas fotovoltaicas, centrales hidroeléctricas, líneas eléctricas aéreas, etc. En [9] se propone una clasificación de los impactos paisajísticos causados por las principales tecnologías basadas en energías renovables (energía hidroeléctrica, eólica y solar) mediante el empleo de tres métricas que se han utilizado ampliamente para la evaluación de los impactos, como son: el uso del suelo (área ocupada por las instalaciones), la visibilidad (zonas desde las que son visibles las instalaciones) y la percepción del público. En ese mismo trabajo se elabora una clasificación genérica del impacto paisajístico, basada en los datos de proyectos realizados en diferentes países, que demuestra que la energía hidroeléctrica es la que menos afecta al paisaje por unidad de generación de energía, seguida de la solar y la eólica, respectivamente. Así, siendo las instalaciones basadas en energía eólica las que más afectan al paisaje, no es de extrañar que en la literatura científica sean abundantes las publicaciones que tratan la evaluación del impacto visual de estas infraestructuras [10–12]. En [13] se analizan las variables que pueden afectar al impacto visual de dichas instalaciones, como la magnitud visual y la diferencia global de color, según el autor. Del análisis de las imágenes del parque eólico en estudio se obtienen parámetros como la diferencia de claridad, la diferencia de saturación de color y la diferencia de tonalidad, que intervienen en el cálculo de la diferencia global de color que representa la visibilidad del parque eólico. El autor analiza las imágenes del parque eólico a diferentes horas del día y, a partir de los datos de visibilidad atmosférica, determina la distribución temporal de los impactos visuales en la zona de estudio. Otros métodos tienen en cuenta la altura de la parte visible del aerogenerador y qué porcentaje de éste ocupa la escena,

para lo cual se han utilizado programas informáticos GIS junto con programas de generación de gráficos 3D [14].

Pese a que las instalaciones correspondientes a parques eólicos son las que afectan al paisaje en mayor grado, en el marco en el que se engloban los artículos recogidos en esta tesis por compendio de publicaciones, sólo serán consideradas las instalaciones correspondientes a plantas fotovoltaicas (FV) y a líneas eléctricas aéreas, ya que éstas últimas son fundamentales para la integración de dichas plantas en la red eléctrica. El tamaño de las grandes plantas FV, su geometría regular y la superficie reflectante de los paneles, hacen que estas plantas sean visibles a grandes distancias y pueden contrastar con los entornos naturales o rurales circundantes [15]. Precisamente, debido a la característica reflectante de su superficie, también existe riesgo de deslumbramiento [16], sin embargo, en ese estudio los autores concluyen que, aunque el deslumbramiento puede aumentar el impacto visual, éste sólo se produce durante períodos de tiempo muy cortos, por lo que podría ser ignorado.

En la evaluación del impacto visual de una planta FV, el tamaño y la distancia entre el observador y la instalación tienen una importancia relevante [17]. Torres Sibille *et al.* [18] presentan una función para el cálculo de un indicador del impacto estético de los plantas solares: los factores utilizados son la visibilidad, la fractalidad, el color, la climatología y un factor de concurrencia, relacionado con la concentración de paneles solares; esta metodología es muy similar a la utilizada para parques eólicos en [10], donde el factor de concurrencia es sustituido por el factor de continuidad de los aerogeneradores. Finalmente, los resultados se comparan con los obtenidos mediante encuestas con fotografías entre los habitantes de las proximidades de la zona estudiada.

En [19] se define un índice de impacto visual relativo que tiene en cuenta aspectos como el número de habitantes del entorno, la orografía del terreno y la altura de las plantas fotovoltaicas. A partir de este índice, se generan mapas de impacto visual para dos tipos de instalaciones fotovoltaicas (con paneles fijos y con seguidores). La mayoría de los GIS disponen de herramientas que permiten determinar el área geográfica visible o cuenca visual (*viewshed*) desde uno o varios

puntos de observación. Florio *et al.* presentan en [20] una metodología para evaluar la visibilidad de las superficies de la envolvente de los edificios expuestos a la radiación solar que podrían albergar módulos solares (térmicos o fotovoltaicos) en zonas urbanas, donde la percepción pública de este tipo de instalaciones no se ve afectada. La visibilidad se determina en función del número acumulado de veces que estas superficies son vistas desde los puntos de observación, dispuestos de forma equidistante a lo largo de la vía urbana, teniendo en cuenta la altura del observador.

Las nuevas centrales eléctricas basadas en fuentes renovables quedan integradas en la red eléctrica mediante la construcción de nuevas líneas eléctricas aéreas de alta tensión, HVOPL, por sus siglas en inglés (High Voltage Overhead Power Lines). Habitualmente, esta integración es ampliamente aceptada entre la población, sin embargo, no es tan buena entre la población local, como se recoge en algunos trabajos realizados en países del norte de Europa [21]. El impacto visual constituye una de las principales objeciones planteadas por grupos y comunidades que se oponen a la construcción de nuevas HVOPL [22]. La evaluación del impacto visual causado por nuevas HVOPL ha sido recogido por Harrison [23]. El autor define un nuevo índice como una medida para evaluar el impacto visual de una HVOPL e identifica los factores relativos al diseño y la ubicación de los apoyos, que pueden afectar al impacto visual de estas líneas (altura del apoyo, ubicación del apoyo, color, tipo de apoyo y grado de apantallamiento por la vegetación). Los costes que suponen mitigar el impacto estético negativo de las HVOPL en el paisaje de un entorno urbano pueden superar los costes que suponen enterrar esas mismas líneas eléctricas, según se recoge en el trabajo [24]. Sin embargo, en los entornos rurales los costes de las líneas subterráneas son mayores, lo que hace que esta opción sólo sea posible en zonas de cierto interés medioambiental o paisajístico [25], minimizando la alteración del entorno e impacto ambiental. El impacto visual causado por los apoyos que integran una línea eléctrica es uno de los principales factores de oposición social a la construcción de una nueva HVOPL, lo que puede motivar que su construcción sea bloqueada, o al menos retrasada, causando sobrecostes a los servicios públicos [26].

Seleccionar aquellas rutas en las que las nuevas HVOPL presentan una menor observabilidad, puede contribuir eficazmente a reducir la oposición social y acelerar de esta forma su construcción, minimizando sobrecostes. Como ya se ha mencionado, los sistemas GIS son herramientas adecuadas para la búsqueda y selección de estas rutas, permitiendo la evaluación simultánea de factores técnicos, económicos y medioambientales. En el trabajo [27] se presenta la evaluación del impacto ambiental de una HVOPL utilizando GIS, considerando únicamente la visibilidad de las líneas con las rutas seleccionadas a una distancia de 3 km, en una zona con interés paisajístico y turístico. La metodología desarrollada en [28] se ocupa de la búsqueda de la ubicación más adecuada para líneas eléctricas aéreas de transporte bajo el criterio del impacto visual. Para ello se utiliza un GIS, obteniendo como resultado un mapa ráster de exposición visual, en el que cada celda representa el número de veces que un lugar es visto desde varios lugares de observación como casas o carreteras. En el caso de las carreteras, cada celda atravesada por una carretera constituye una posición de observación en el mapa de exposición visual. En [29] se presenta una metodología para determinar las rutas más adecuadas para la construcción de nuevas líneas eléctricas, teniendo en cuenta el impacto visual causado por los cables o apoyos. Los corredores se identifican en el mapa de costes global, definido a partir de seis criterios (topográfico, tipo de terreno, infraestructuras lineales, zonas de peligro, zonas protegidas y visibilidad), como las áreas cubiertas por, al menos, una de las rutas óptimas obtenidas aplicando diferentes factores de ponderación a cada criterio. Los lugares de observación se limitan a los edificios.

En zonas geográficas próximas a lugares con un gran valor cultural, monumental, paisajístico y turístico, el rechazo de la población a la construcción de instalaciones de este tipo (plantas fotovoltaicas, líneas eléctricas aéreas) puede verse incrementado. Por ejemplo, en zonas cercanas a centros históricos o monumentales, las instalaciones fotovoltaicas, visibles desde estos lugares, pueden perturbar la percepción de los valores culturales de la escena [30]. Por ello, el impacto visual en lugares con un gran patrimonio cultural se ha convertido en un tema controvertido [31] y, en general, las metodologías propuestas en los trabajos recogidos en este compendio de publicaciones, pueden utilizarse para evaluar la

construcción de nuevas plantas fotovoltaicas en lugares que, por su patrimonio cultural y su valor monumental, histórico o paisajístico, deben ser preservados [32].

En este contexto, se han desarrollado varios modelos espaciales para la búsqueda de las zonas geográficas más adecuadas, para la construcción de plantas fotovoltaicas e instalaciones asociadas (líneas eléctricas), bajo un criterio objetivo de su observabilidad, evaluando la intrusión visual que estas instalaciones pueden tener en lugares con acreditado valor paisajístico y cultural.

En primer lugar y bajo ese criterio, se ha desarrollado una metodología, basada en GIS, para clasificar los lugares factibles para la construcción de nuevas centrales FV. La metodología se basa en los métodos *fuzzy viewshed* y *decaimiento visual* con la distancia, lo que hace posible determinar el número máximo de horas que la nueva central FV puede ser vista por cada posible observador, en un día medio. Este número será función de los habitantes de la zona, del tamaño de la planta, de los posibles observadores y su distancia a la planta FV. En esta metodología se han considerado dos tipos de observadores: observadores fijos en un lugar (*in situ*), que corresponden con aquellos que se encuentran en los centros urbanos y, observadores en movimiento, que corresponden con aquellos que se desplazan a lo largo de caminos y carreteras que atraviesan la zona de estudio.

En segundo lugar, se presenta una nueva metodología que ayuda a identificar las rutas óptimas para el trazado de una nueva HVOPL, bajo un criterio objetivo de observabilidad, permitiendo la selección de las rutas, de una zona geográfica, en las que la futura HVOPL tendrá menor observabilidad. La aplicación de la metodología propuesta consigue un conjunto de rutas que une los puntos de origen y destino de la nueva HVOPL creando un “corredor visual”, que incluye todas las rutas posibles con una observabilidad de sus apoyos por debajo de un umbral límite establecido. Un corredor visual corresponde al área geográfica entre el punto origen y destino, en la que la observabilidad de cualquier trazado de una nueva línea es igual o inferior a un valor límite.

Finalmente se ha creado una nueva metodología para identificar, de forma objetiva, las áreas geográficas más adecuadas para la construcción de nuevas

centrales FV en zonas de especial interés paisajístico, cultural y/o turístico, contribuyendo a mantener el entorno libre de las posibles perturbaciones visuales provocadas por estas instalaciones. A partir de varios análisis repetitivos, se determina la observabilidad de la futura planta fotovoltaica, mediante la evaluación del Tiempo de Percepción Acumulado, *APT*, que, de la instalación, tienen los visitantes de la zona estudiada. La pendiente del terreno será un factor a considerar pues influye directamente en la velocidad de desplazamiento de los observadores y por lo tanto en el tiempo de observación. Igualmente se ha tenido en cuenta la parte visible de la planta FV y la parte de la instalación que puede ser vista total o parcialmente por encima de la línea del horizonte (instalaciones con el cielo claro de fondo tendrán mayor grado de visibilidad).

## **CAPÍTULO 3. PRINCIPALES DESARROLLOS DE LA INVESTIGACIÓN**

---

A continuación, se presentan los principales desarrollos y aportaciones a la investigación que han dado origen a los artículos publicados en revistas científicas y que son la base de esta tesis por compendio de publicaciones.

### **3.1 SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS PARA NUEVAS CENTRALES FOTOVOLTAICAS EN FUNCIÓN DE SU OBSERVABILIDAD**

---

En este apartado se presenta una nueva metodología para la clasificación de los lugares factibles, de una zona geográfica, para la construcción de nuevas centrales fotovoltaicas en función de su observabilidad. Esta metodología se basa en los métodos *fuzzy viewshed* y *decaimiento visual* motivado por la distancia del observador a la planta FV. Al estar integrada en un GIS permite la presentación de resultados visuales en forma de mapas que ayudan a identificar rápidamente las mejores áreas en las que la observabilidad de este tipo de instalaciones es menor. Estos mapas reproducen la variable denominada Horas Potenciales de Observación (*POH*) en cada zona geográfica. *POH* representa el valor acumulado del número máximo de horas, de un día medio, en las que la nueva planta fotovoltaica puede ser vista por cada posible observador. Esta variable está relacionada con los habitantes de los núcleos urbanos en la zona, el tamaño del objeto observado (planta

FV), los posibles observadores en movimiento que recorren caminos y carreteras, y su distancia a la instalación FV.

### 3.1.1 Estructura de datos

Un GIS permite realizar análisis espaciales a través de operaciones que se desarrollan en base a datos georreferenciados. El análisis espacial es el proceso de manipular información espacial para extraer información nueva y significativa a partir de los datos originales [33]. Para el problema que se presenta de evaluación de la observabilidad de nuevas centrales FV, desde diferentes puntos de observación, resultan adecuados los modelos de datos “ráster” y los modelos de datos “vectoriales”.

Los modelos de datos ráster están asociados a celdas o píxeles, por lo que son más adecuados para recoger datos de información del terreno o zona geográfica bajo estudio como, elevaciones, distancias, pendientes, obstáculos geográficos, etc., que podrán intervenir en futuros análisis espaciales. El análisis espacial está basado en operaciones con matrices, donde cada matriz corresponde a una cobertura geográfica. El nivel de detalle con el que se realiza dicho análisis espacial es función del tamaño de la celda o resolución espacial del ráster.

En los problemas que se presentan de evaluación de la visibilidad es recomendable trabajar con tamaños de celda lo suficientemente pequeños (resoluciones altas) para capturar el detalle necesario, aunque surge el inconveniente de que los ráster obtenidos necesitan mayor espacio de almacenamiento y más tiempo de procesamiento.

Los modelos de datos vectoriales son estructuras de datos adecuadas para almacenar información geográfica asociada a entidades geométricas de objetos como líneas, puntos y polígonos. Este formato resulta especialmente adecuado en un GIS para la representación de entidades reales ubicadas en el espacio como carreteras, vías de ferrocarril, ríos, líneas eléctricas, centros urbanos, puntos de observación, atalayas, etc.

Ambos tipos de datos (ráster y vectorial), quedaron definidos ampliamente en el Capítulo 2 del presente documento.

Los datos de entrada necesarios para aplicar la metodología que se presenta en el apartado 3.1, se indican a continuación:

- Datos vectoriales correspondientes a los puntos de observación. Tendrán asociada una tabla de atributos la cual contiene: la posición geográfica de cada punto de observación, la altura de los ojos del observador sobre el suelo y el número de observadores potenciales. El número de observadores puede corresponder al número de habitantes del núcleo urbano asociado al punto de observación, al número medio de visitantes de un mirador, etc.
- Datos vectoriales correspondientes a puntos de observación por los que circulan observadores potenciales en movimiento (observadores en el interior de vehículos que se desplazan a lo largo de una carretera). Tendrán asociada una tabla de atributos la cual contiene: la posición geográfica de cada punto de observación (puntos distribuidos a lo largo de la carretera o camino), la altura de los ojos del observador sobre el suelo, el número medio de ocupantes (observadores) del vehículo, el tráfico medio diario (*ADT*) que recorre cada tramo de carretera. Un tramo de carretera corresponde a la sección de carretera comprendida entre dos bifurcaciones.
- Datos correspondientes a la altura sobre el terreno de los paneles fotovoltaicos que integran la planta fotovoltaica. Estos datos son almacenados en la tabla de atributos de los puntos de observación.
- Datos correspondientes a las elevaciones del terreno desnudo, cuyos valores se recogen en el conjunto de datos ráster, correspondiente al Modelo Digital del Terreno (MDT) de la zona estudiada.

### **3.1.2 Metodología**

Aquí se presenta la metodología desarrollada para identificar visualmente los lugares más adecuados, de una determinada zona geográfica, para la construcción de una nueva planta FV, desde el punto de vista de la observabilidad. Los resultados obtenidos son mapas en formato ráster. Este formato mantiene la información geográfica en celdas o pixeles que representan una porción elemental de la zona geográfica estudiada. Los mapas resultantes están construidos con los valores de la variable correspondiente a las horas potenciales de observación, *POH*, la cual tiene en cuenta todos los posibles observadores en la zona geográfica estudiada.

La metodología considera dos tipos de observadores; observadores *in situ*, estáticos en una determinada ubicación, que corresponden a residentes en núcleos urbanos y rurales del área geográfica, y observadores en movimiento, correspondientes a observadores que se desplazan por carreteras (rutas) que conectan dichos núcleos.

Además del número y tipo de observadores, la variable *POH* depende de otros factores como la orografía de la zona y las dimensiones de la planta fotovoltaica, principalmente la altura de los paneles sobre el suelo y la extensión de terreno ocupada. La orografía está representada en el sistema GIS mediante el modelo digital del terreno (MDT). El MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable continua [34]. En el caso particular de la metodología propuesta, la variable a representar por el MDT es la elevación del terreno desnudo.

Para un único punto de observación fijo (ciudad, pueblo, aldea, etc.) y para un único segmento de carretera, se define *POH* como un valor numérico que depende del número de posibles observadores y de la distancia entre ellos y el objeto observado. En el cálculo de *POH* la distancia desempeña un papel fundamental ya que la agudeza visual humana disminuye con la distancia [35]. La orografía entre el punto de observación y el objeto observado también influye significativamente en el valor que toma la variable *POH*.

Algunos trabajos publicados relacionados con aplicaciones de los sistemas GIS han propuesto métodos para tener en cuenta la distancia en la formulación de la agudeza visual humana. Así, Fisher [36] propuso un método para tratar el problema de la degradación de la visibilidad con la distancia, modificando el análisis de las cuencas visuales utilizando la teoría de conjuntos difusos junto con una función de decaimiento de la distancia. El autor propuso el método *fuzzy viewshed* (cuencas visuales difusas) para abordar el hecho de que un objeto puede ser visto con diferente grado de nitidez (o incluso no ser visto) por el mismo observador en determinadas circunstancias, o por diferentes observadores en las mismas condiciones. Esta variabilidad se acomete mediante la aplicación de la teoría de los conjuntos difusos, generando una cuenca visual que incorpora grados de pertenencia a un conjunto, en contraposición a la naturaleza binaria de los análisis estándar de cuencas visuales, que toman el valor 1 para “visible” y 0 para “no visible”. Sin embargo, en sus análisis no se tenía en cuenta el tamaño del objeto observado.

Ogburn [17] aplica el método *fuzzy viewshed* modificado para tener en cuenta el tamaño del objeto. En ese trabajo, el autor establece que los límites de las distintas formas de agudeza visual se miden en función del ángulo visual ocupado por el objeto dentro del campo de visión del observador, teniendo en cuenta tanto el tamaño del objeto como la distancia de éste al observador. Así, propone el uso de valores de pertenencia difusos obtenidos mediante la aplicación de una función de decaimiento, cuyos valores disminuyen con la distancia en relación con el tamaño del objeto observado.

Los parámetros de la función de decaimiento se calculan teniendo en cuenta la distancia a la que un objeto alcanza el límite estándar de agudeza de reconocimiento, es decir, el punto en el que el objeto ocupa un arco visual de  $1'$ . La función de decaimiento con la distancia  $\mu(x)$  se muestra en la expresión (3.1), donde  $x$  representa la posición del objeto observado,  $d$  es la distancia entre la posición del observador y la posición  $x$  del objeto, y  $b_1$  representa la distancia del observador al límite del primer plano, donde la visibilidad es mayor. La suma de  $b_1$

y  $b_2$  corresponde a la distancia a la que un objeto, de la anchura del objeto observado, ocupa un arco visual de  $1^\circ$ , como se muestra en la Figura 3.1.

$$\begin{cases} \mu(x) = 1 & \text{for } d \leq b_1 \\ \mu(x) = \frac{1}{1 + 2\left(\frac{d - b_1}{b_2}\right)^2} & \text{for } d > b_1 \end{cases} \quad (3.1)$$

Los parámetros  $b_1$  y  $b_2$  dependen del tamaño del objeto observado. Para  $b_1$  se ha utilizado la distancia correspondiente al límite de visión a corta distancia definido por Higuchi [37].

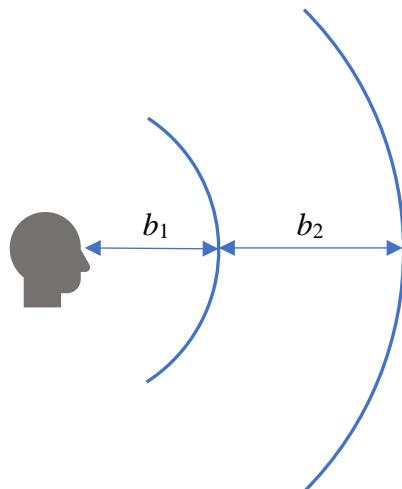


Figura 3.1. Variables de distancia  $b_1$  y  $b_2$  utilizadas por Ogburn en la operación de visión difusa.

Los parámetros  $b_1$  y  $b_2$  toman los valores 570 m y 33800 m, respectivamente, para un objeto observado con un tamaño de 10 m. En la Figura 3.2 se representa la función de decaimiento con la distancia, para un objeto de ese tamaño.

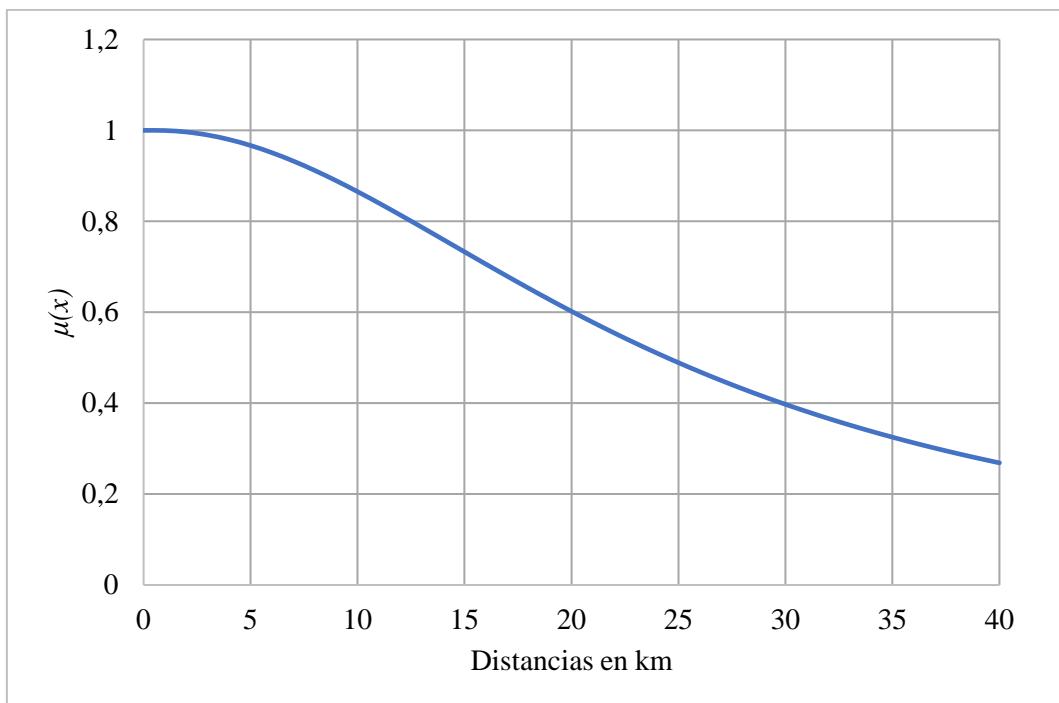


Figura 3.2. Función de decaimiento con la distancia para un objeto con un tamaño de 10 metros.

Para calcular  $POH$  se ha utilizado la función de decaimiento con la distancia, ya que, como se ha mencionado, considera el tamaño del objeto observado. Es necesario puntualizar que, aunque la altura de una planta PV es normalmente inferior a su anchura, se ha tomado únicamente la altura como medida de su tamaño, si bien la anchura se ha considerado indirectamente por medio del tamaño de celda en los datos ráster.

La metodología considera dos tipos de observadores; observadores estáticos en una posición fija (*in situ*), correspondientes a residentes en núcleos urbanos y rurales del área geográfica, y observadores en movimiento, correspondientes a observadores que se desplazan por carreteras (rutas) que conectan dichos núcleos. A continuación, se describe la metodología utilizada para calcular  $POH$  teniendo en cuenta los dos tipos de observador.

- **Observadores estáticos (*in situ*)**

Inicialmente, se crea un conjunto de datos vectoriales correspondientes a los puntos de observación. Estos datos se recogen en una capa del sistema GIS. Esta capa tiene asociada una tabla de atributos donde, para cada punto, quedan almacenados los siguientes datos: coordenadas geográficas, altura de los ojos del observador sobre el terreno y número de posibles observadores potenciales. Estos observadores pueden corresponder al número de posibles residentes tanto en núcleos urbanos como rurales, número medio diario de visitantes en miradores, monumentos, etc. En un GIS, las etapas del proceso de cálculo de *POH*, correspondiente a una planta FV colocada en el área geográfica representada<sup>2</sup> por la celda  $i$ , y considerando los observadores en un punto de observación  $j$ ,  $POH_{i,j}$ , se detallan a continuación:

1. El punto de partida es el MDT correspondiente a la zona geográfica donde se construirá la nueva planta fotovoltaica. La zona geográfica está representada por un conjunto de celdas regulares en GIS. El tamaño de las celdas se elige en función del tamaño real de la planta FV, la cual debe ocupar el área representada por una única celda. Por tanto, en cada celda  $i$  se almacenan los datos correspondientes a la altura del terreno (orografía) y a la superficie ocupada por la planta FV.
2. Los datos relativos a la altura sobre el suelo de los ojos del observador y el número de observadores potenciales ( $obs_j$ ) en la posición  $j$ , son leídos por el sistema GIS de la tabla de atributos asociada a la capa de datos vectoriales que contiene los puntos de observación.
3. Posteriormente se aplica el filtro de visibilidad ( $f_{i,j}$ ). Este filtro corresponde a una función la cual devuelve un valor 0 si la planta PV colocada en la celda  $i$  no es visible desde la posición  $j$ . Por el contrario, devuelve el valor 1 cuando la planta FV en la celda  $i$  es visible desde el

---

<sup>2</sup> Cuando se dice que una planta FV está situada en una celda concreta, significa realmente que la planta fotovoltaica está situada en la zona geográfica representada por esa celda en un GIS.

punto de observación  $j$ . El valor del filtro de visibilidad se almacena en la celda  $i$ .

4. Mediante funciones GIS se calcula la distancia euclídea entre el centro de la celda  $i$  y la posición  $j$ , es decir, la distancia entre la planta PV y el observador ( $d_{i,j}$ ).
5. Posteriormente, conociendo la distancia entre la celda  $i$  y el punto de observación  $j$  (determinada en la etapa 4), se calcula el valor de la función de decaimiento con la distancia  $\mu(d_{i,j})$  mediante la expresión (3.1).
6. Finalmente se aplica la expresión (3.2), donde  $hmd$  representa el número de horas de luz de un día medio (se ha tomado 12 h) y corresponde con el tiempo durante el cual es posible ver la instalación FV. El valor obtenido corresponde al  $POH$  en la celda  $i$ , teniendo en cuenta un único punto de observación fijo  $j$ . Este puede corresponder a un centro urbano o rural, un mirador, etc.

$$POH_{i,j} = f_{i,j} \cdot obs_j \cdot \mu(d_{i,j}) \cdot hmd \quad (\text{horas/día}) \quad (3.2)$$

En la Figura 3.3 se presenta, de forma esquemática, el proceso de cálculo de  $POH_{i,j}$  de una planta fotovoltaica, colocada en el área geográfica representada por la celda  $i$  y vista desde un punto de observación  $j$ .

Se repiten los pasos de 2 a 6 para todos los puntos de observación fijos  $j$ . Existirá un total de  $M$  puntos de observación con posiciones geográficas diferentes y, además, cada uno puede tener diferentes valores de altura y número de posibles observadores en la zona de estudio y alrededores. Los valores de  $POH_{i,j}$  obtenidos para cada punto de observación, se acumulan para obtener el valor global de las horas potenciales de observación *in situ* ( $OSGPOH_i$ ), como muestra la expresión (3.3). Esta variable representa el valor acumulado del número máximo de horas de

observación en un día medio, para todos los posibles observadores fijos de la zona. El valor obtenido para esta variable se almacena en la celda  $i$ .

$$OSGPOH_i = \sum_{j=1}^M POH_{i,j} \quad (\text{horas/día}) \quad (3.3)$$

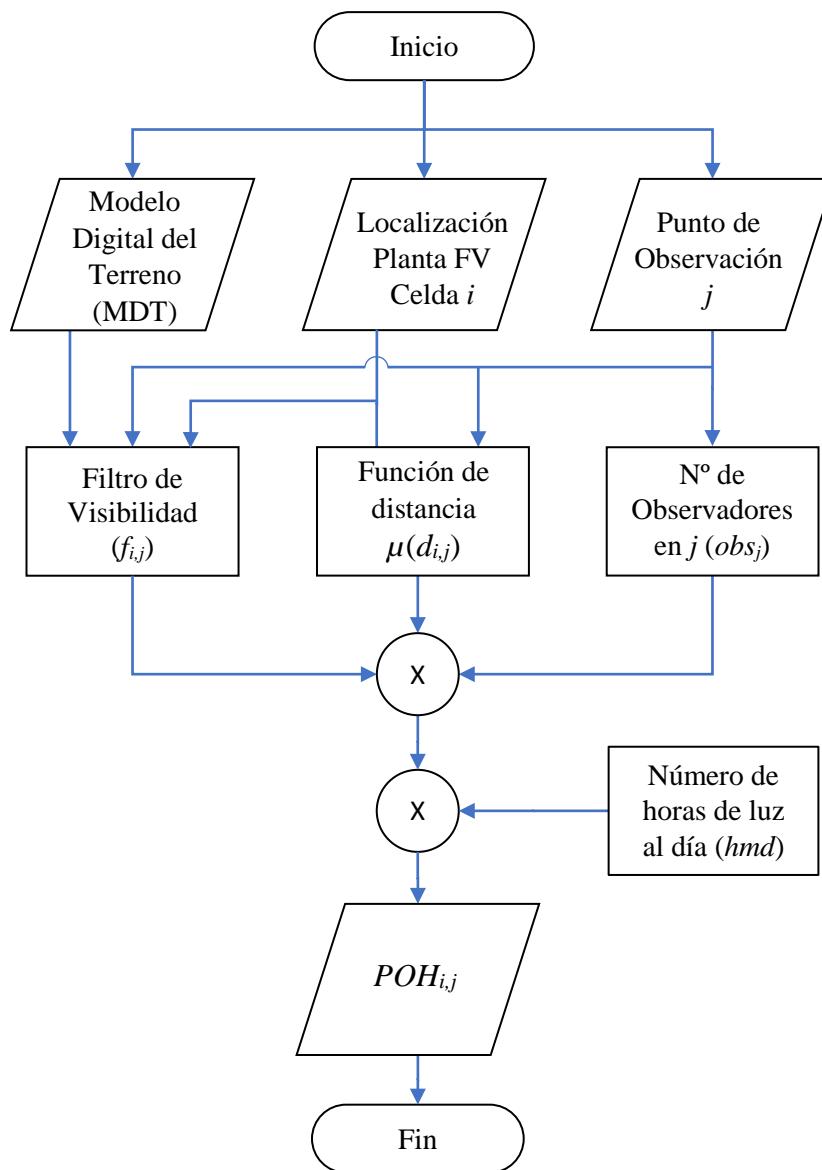


Figura 3.3. Diagrama de flujo para el cálculo del  $POH$  en la celda  $i$ , estando los observadores en el punto de observación  $j$ .

- **Observadores en movimiento**

El proceso de cálculo de *POH* para este tipo de observadores difiere ligeramente del utilizado con los observadores fijos. En esta ocasión los posibles observadores se desplazan a lo largo de una carretera. Para evaluar el número de observadores se utiliza el tráfico medio diario (*ADT*) de vehículos en cada tramo de carretera que cruza la zona de estudio. Un tramo de carretera está limitado por dos bifurcaciones o cruces. Los tramos de carretera se dividen en segmentos. Un segmento corresponde a la porción de carretera en el que cualquiera de sus puntos tiene el mismo valor de *ADT* y el mismo valor de velocidad media de los vehículos que circulan por ese segmento.

Las carreteras se recogen en una capa de datos vectoriales en un GIS. Dicha capa lleva asociada una tabla de atributos. Esta tabla incluye, para cada segmento  $k$  de carretera los siguientes datos: número de posibles observadores ( $obs_k$ , su valor se determina multiplicando *ADT* por el número medio de ocupantes por vehículo), su longitud y la velocidad media de los vehículos en ese segmento. Suponemos la misma altura sobre la carretera para todos los observadores de la misma. Para ubicar los puntos de observación de un segmento de carretera, se divide éste en nodos separados uniformemente. El cociente de la distancia entre nodos consecutivos y la velocidad media, representa el tiempo de observación ( $t_n$ ) en un nodo  $n$ . Las etapas del proceso de cálculo<sup>3</sup> de *POH*, correspondiente a una planta FV colocada en la celda  $i$  y considerando los observadores que circulan por el nodo  $n$  del segmento  $k$ ,  $POH_{i,n}$ , se detallan a continuación:

1. En el MDT de la zona de estudio, los datos correspondientes a la altura del terreno (orografía) y a la superficie ocupada por la planta FV, se almacenan en la celda  $i$ .

---

<sup>3</sup> El proceso de cálculo considera distancias entre el centro de cada celda  $i$  y cada nodo  $n$  del segmento de carretera  $k$ . En los múltiples análisis de visibilidad que se realizan se requiere un gran esfuerzo computacional, incluso con los equipos informáticos disponibles actualmente. La potencia de cálculo disponible en 2015, año de publicación del artículo recogido en [50] y que forma parte de esta tesis por compendio de publicaciones, era mucho más reducida. Con el objetivo de minimizar el esfuerzo computacional, en el proceso de cálculo de *POH* en ese artículo, se consideró la distancia entre el centro de cada celda  $i$  y el segmento de carretera  $k$ .

2. Los datos correspondientes a los nodos o puntos de observación del segmento de carretera  $k$  se leen desde su tabla de atributos.
3. Después se aplica el filtro de visibilidad ( $f_{i,n}$ ) al nodo  $n$  del segmento  $k$ . El filtro ( $f_{i,n}$ ) toma el valor 0 si la planta PV colocada en la celda  $i$  no es visible desde el nodo  $n$ . Por el contrario, toma el valor 1 si la planta FV en la celda  $i$  es visible desde ese nodo  $n$ .
4. Mediante funciones GIS se calcula la distancia euclídea ( $d_{i,n}$ ) entre el centro de la celda  $i$  y el nodo  $n$  del segmento de carretera  $k$ .
5. Conociendo la distancia  $d_{i,n}$ , se calcula el valor correspondiente a la función de decaimiento con la distancia,  $\mu(d_{i,n})$ , utilizando la expresión (3.1).
6. El resultado del producto del número de observadores  $obs_k$  que circulan por el nodo  $n$  del segmento  $k$ , y de los valores obtenidos del filtro de visibilidad  $f_{i,n}$ , del factor de decaimiento con la distancia  $\mu(d_{i,n})$  y del tiempo de observación  $t_n$ , se acumula en la celda  $i$ , como muestra la expresión (3.4).

$$POH_{i,n} = obs_k \cdot f_{i,n} \cdot \mu(d_{i,n}) \cdot t_n \quad (\text{horas/día}) \quad (3.4)$$

En la Figura 3.4 se presenta el diagrama de flujo correspondiente al cálculo de  $POH_{i,n}$  de una planta FV colocada en la celda  $i$ , considerando los observadores ubicados en un nodo  $n$  del segmento de carretera  $k$ .

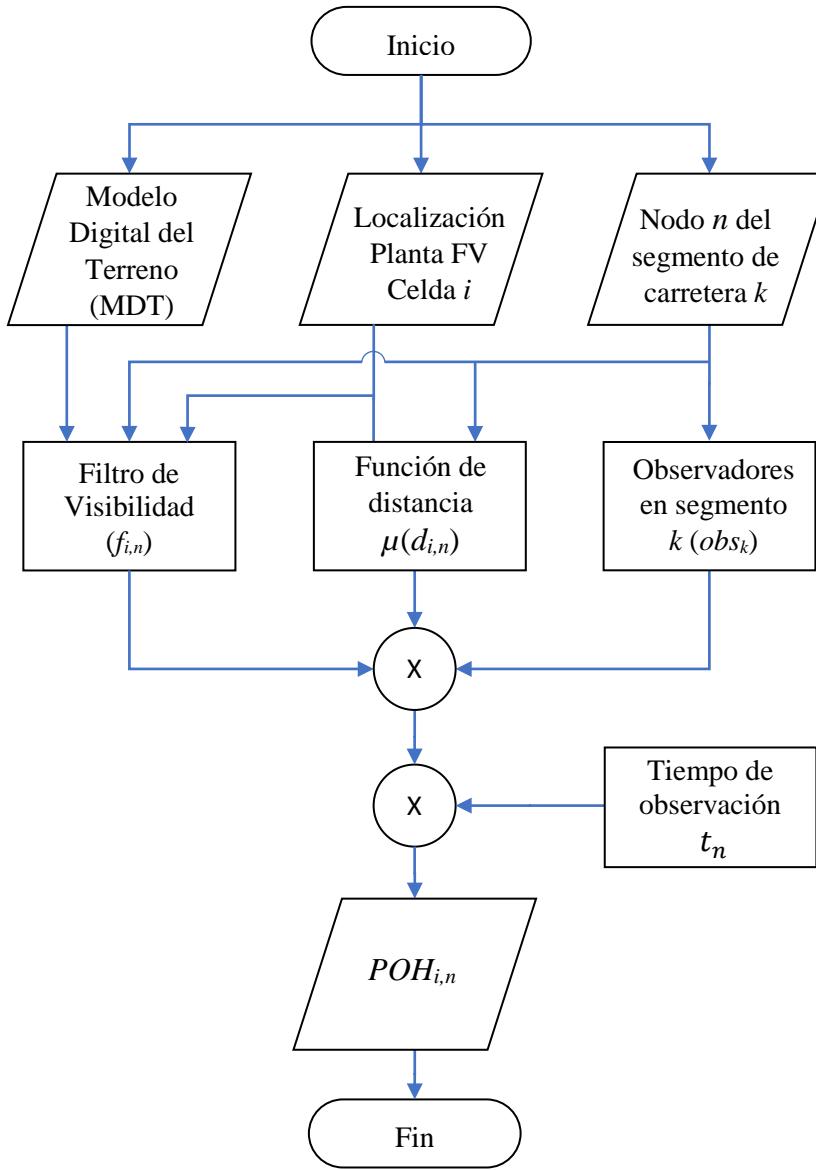


Figura 3.4. Diagrama de flujo para el cálculo del POH en la celda  $i$ , estando los observadores en el nodo  $n$  del segmento de carretera  $k$ .

Posteriormente, teniendo en cuenta el número total  $N_k$  de nodos del segmento de carretera  $k$ , el valor acumulado de  $POH$  para ese segmento  $k$ ,  $POH_{i,k}$ , vendrá dado por la expresión (3.5).

$$POH_{i,k} = obs_k \sum_{n=1}^{N_k} f_{i,n} \cdot \mu(d_{i,n}) \cdot t_n \quad (\text{horas/día}) \quad (3.5)$$

Este proceso se repite para todos los posibles observadores en carretera y para el número total de segmentos de todas las carreteras,  $K$ , en la zona estudiada y alrededores. Posteriormente, los valores obtenidos de  $POH_{i,k}$ , para cada segmento  $k$  de carretera, se acumulan aplicando la expresión (3.6) para obtener el valor global de horas de observación en carretera ( $ORGPOH_i$ ), es decir, el valor acumulado del número máximo de horas de observación en un día medio para todos los posibles observadores en carretera. El valor numérico obtenido se almacena en la celda correspondiente a la posición  $i$ .

$$ORGPOH_i = \sum_{k=1}^K POH_{i,k} \quad (\text{horas/día}) \quad (3.6)$$

Este proceso puede adaptarse fácilmente a otro tipo de observadores en movimiento, desde senderistas hasta pasajeros de un tren. Será necesario modificar en la tabla de atributos la altura de los observadores sobre el suelo y la velocidad media asociada al segmento del camino o carretera.

- **Mapas de índices normalizados**

Aplicando los procesos descritos con anterioridad a todas las celdas  $i$ , se obtiene como resultado un conjunto de mapas que representan el valor de la variable  $POH$  en cada celda  $i$ . Las zonas con valores más bajos o más altos son fácilmente identificables mediante una escala de color. No obstante, el valor de la variable de interés en cada celda puede ser normalizado respecto al valor más alto en dichas celdas, obteniendo un mapa donde todas las celdas presentarán valores comprendidos entre 0 y 1. Así, es posible obtener los valores normalizados de  $OSGPOH$  ( $nOSGPOH$ ) y  $ORGPOH$  ( $nORGPOH$ ) utilizando la expresión (3.7), donde  $\max(OSGPOH)$  y  $\max(ORGPOH)$  son los valores máximos, de todas las celdas, de ambas variables.

$$\begin{cases} nOSGPOH_i = \frac{OSGPOH_i}{\max(OSGPOH)} \\ nORGPOH_i = \frac{ORGPOH_i}{\max(ORGPOH)} \end{cases} \quad (3.7)$$

Los mapas normalizados obtenidos, representan una clasificación de las posibles zonas para construir una nueva planta FV. Las celdas con valores más bajos corresponden a las áreas con valores menores de  $POH$  y donde es más factible la construcción de una nueva planta FV, bajo el criterio de su observabilidad. Por el contrario, las celdas con valores más altos corresponden a las zonas con mayores valores de  $POH$  y, por tanto, zonas que ofrecen un alto impacto visual y deben evitarse para colocar la futura planta. Las celdas con valores igual a 0 corresponden a áreas con impacto visual nulo, ya que no son visibles ni por los observadores *in situ* ni por los observadores en movimiento.

Con el objetivo de incluir a los observadores *in situ* y a los observadores en movimiento en un único mapa, pueden llevarse a cabo dos estrategias.

En la primera estrategia (estrategia A) pueden combinarse las variables normalizadas  $nOSGPOH$  y  $nORGPOH$  utilizando la expresión (3.8) para obtener el índice de horas potenciales de observación globales ( $GPOHI$ ). Ambos valores son acumulados en cada celda con factores de ponderación normalizados ( $w_s$  y  $w_r$ ) para considerar la importancia de cada tipo de observador.

$$\begin{aligned} w_s + w_r &= 1 \\ GPOHI_i &= w_s \cdot nOSGPOH_i + w_r \cdot nORGPOH_i \end{aligned} \quad (3.8)$$

La variable  $GPOHI$  puede representarse en un mapa en el que cada celda  $i$  almacena un valor entre 0 y 1. Esta estrategia puede utilizarse en zonas con números muy diferentes de cada tipo de observador y existan razones para incrementar la importancia de un tipo u otro, como puede ocurrir en zonas turísticas, accesos por carretera a parques naturales, etc. Para evitar la penalización de posibles observadores *in situ*, debe elegirse esta estrategia cuando los posibles observadores

en carretera no sean mayoritariamente habitantes de la zona estudiada: los observadores *in situ* se ven afectados visualmente todos los días, mientras que los observadores en carretera pueden verse afectados sólo ocasionalmente.

En la segunda estrategia (estrategia B) las variables normalizadas  $nOSGPOH$  y  $nORGPOH$  se combinan mediante la expresión (3.9), obteniendo el valor normalizado de las horas potenciales de observación globales  $nGPOH$ . Los valores obtenidos son acumulados en cada celda  $i$  con factores de ponderación normalizados ( $w_s$  y  $w_r$ ) y, a la vez, normalizados respecto al valor más alto de todas las celdas de la zona estudiada.

$$w_s + w_r = 1$$

$$nGPOH_i = \frac{w_s \cdot OSGPOH_i + w_r \cdot ORGPOH_i}{\max(w_s \cdot OSGPOH + w_r \cdot ORGPOH)} \quad (3.9)$$

La variable  $nGPOH$  puede ser representada en un mapa en el que cada celda  $i$  almacena un valor entre 0 y 1. Esta estrategia puede utilizarse en zonas donde haya especial interés en agrupar a los observadores *in situ* y a los observadores en carretera para obtener una clasificación conjunta. Al utilizar los factores de ponderación ( $w_s$ ,  $w_r$ ) es posible asignar más importancia a uno u otro tipo de observador. Esta estrategia debe elegirse cuando los observadores *in situ* y los observadores en carretera son casi los mismos, es decir, las carreteras son utilizadas principalmente por los habitantes de la zona.

### **3.2 TRAZADO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN BAJO UN CRITERIO OBJETIVO DE OBSERVABILIDAD**

---

Aquí se presenta una nueva metodología para determinar objetivamente los posibles trazados o rutas de una nueva Línea Eléctrica Aérea de Alta Tensión (HVOPL) con un límite definido para la observabilidad de sus apoyos. Esta metodología está basada en GIS y permite obtener un mapa para identificar corredores visuales. Este mapa se denomina Mapa de Selección de Corredores (CSM por sus siglas en inglés). Los corredores visuales se definen como las zonas

del *CSM* en las que el coste acumulado de la ruta desde una celda origen a una celda destino, cruzando cualquier celda del área estudiada, se encuentra por debajo de un determinado umbral. La variable utilizada como coste son las Horas Potenciales de Observación Globales (*GPOH*), la cual corresponde al valor acumulativo del número de horas, en un día medio, en el que cualquier apoyo de una nueva HVOPL puede ser visto por todos los posibles observadores. Los corredores visuales son áreas que incluyen las rutas óptimas y casi óptimas según el criterio de observabilidad, es decir, para cada celda, dentro de un corredor visual, se puede trazar una ruta que cruce esa celda y con un valor acumulado para la variable *GPOH* por debajo de un límite definido. Para evaluar esta variable se tienen en cuenta los posibles observadores fijos (*in situ*), correspondientes a los habitantes de los centros urbanos o zonas habitadas, y los posibles observadores en movimiento que recorren las carreteras y caminos de la zona. Los resultados obtenidos pueden ayudar a lograr un consenso entre los principales interesados, ya que se centra en las cuestiones específicas de la línea eléctrica prevista y su observabilidad desde una perspectiva objetiva.

### 3.2.1 Estructura de datos

Para el problema que se presenta de trazado de líneas eléctricas aéreas de alta tensión bajo un criterio objetivo de observabilidad, desde diferentes puntos de observación, mediante GIS, resultan adecuados los conjuntos de datos “ráster” y “vectoriales”. Los datos de entrada que se precisan en el GIS para llevar a cabo la metodología propuesta se muestran a continuación:

- Datos vectoriales correspondientes a los puntos de observación donde se ubican los observadores *in situ*. La tabla de atributos contiene, para cada punto de observación, la posición geográfica, la altura de los ojos del observador sobre el suelo y el número de posibles observadores potenciales de ese tipo.
- Datos vectoriales correspondientes a los puntos de observación recorridos por observadores en movimiento. La tabla de atributos

asociada contiene la posición geográfica de cada punto de observación (puntos distribuidos a lo largo de la carretera), la altura de los ojos del observador sobre el suelo, el número medio de ocupantes (observadores) del vehículo y el tráfico medio diario (*ADT*) que recorre cada segmento de la carretera.

- Datos correspondientes a la altura de los apoyos que formarán parte de la futura HVOPL. Estos datos estarán almacenados en la tabla de atributos asociada a los puntos de observación.
- Datos ráster correspondientes al Modelo Digital del Terreno (MDT). Cada celda del mapa almacena la altura del terreno desnudo de la zona geográfica representada por esa celda.

### 3.2.2 Metodología

La metodología propuesta crea un mapa que ayuda a encontrar posibles caminos o rutas para el trazado de nuevas HVOPL bajo un criterio objetivo de observabilidad. El resultado obtenido es un mapa de selección de corredores (*CSM*), en formato ráster. Un *CSM* se obtiene a partir de otros dos mapas que contienen las rutas de menor coste (*LCP*). Un mapa *LCP* corresponde a un conjunto de datos ráster que contiene en cada celda el valor mínimo de coste acumulado, siguiendo el camino óptimo desde el origen de la línea eléctrica, definido por el usuario, hasta esa celda. El trazado óptimo se refiere a la ruta con mínimo coste acumulado. La variable de coste utilizada es *GPOH*, que representa el valor acumulado del número de horas en un día medio en el cual, cualquier apoyo de la nueva HVOPL puede ser visto por todos los posibles observadores. La evaluación de *GPOH* en todas las celdas ráster permite obtener el Mapa de Horas Potenciales de Observación Globales (*GPOHM*) que representa una zona geográfica donde es posible identificar fácilmente las áreas con mayor o menor observabilidad para la futura HVOPL, permitiendo seleccionar la ruta con los menores valores de *GPOH* y, por tanto, con el menor impacto visual en la zona.

La variable  $GPOH$  corresponde a la suma de la variable Horas Potenciales de Observación ( $POH$ ) en todas las posiciones posibles del observador. Se define  $POH$ , para un único punto de observación (pueblo, granja, etc.) o para un único segmento (de carretera, ferrocarril, etc.), como el valor acumulado del número máximo de horas de observación, en un día medio, para todos los posibles observadores fijos en ese punto o en movimiento por ese segmento de carretera. El valor de  $POH$  depende de la orografía de la zona estudiada y, dado que la agudeza visual humana disminuye con la distancia [35], de la distancia entre el observador y el objeto observado, que actúa como factor de ponderación en el propio cálculo de  $POH$ .

Para considerar la distancia del observador al objeto observado, Fisher en [36] propone el método *fuzzy viewshed*, donde utiliza funciones de pertenencia difusas, cuyos valores disminuyen con la distancia. En la metodología que aquí se presenta se ha utilizado un enfoque similar, utilizando una función de ponderación. Los parámetros de esta función se ajustaron teniendo en cuenta la altura de los apoyos de la línea de alta tensión y el límite de la agudeza visual. Esta función fue propuesta por Weigel en [38] y se muestra en la expresión (3.10), donde  $w$  representa el factor de ponderación y  $d$  la distancia entre el observador y el objeto observado.

$$\begin{cases} w = 0,3 & \text{for } d \leq 57,5 \text{ m} \\ w = \frac{-0,0638 \cdot \ln(d) + 0,59}{1,105} & \text{for } 57,5 < d < 10.000 \text{ m} \\ w = 0 & \text{for } d \geq 10.000 \text{ m} \end{cases} \quad (3.10)$$

La orografía del terreno desempeña un papel fundamental en el cálculo de los valores de  $POH$  ya que los accidentes geográficos pueden impedir que la línea eléctrica sea visible desde algunas zonas. Para tener en cuenta la orografía, se ha utilizado el MDT de la zona estudiada.

Para alcanzar el objetivo final, obtener un Mapa de Selección de Corredores ( $CSM$ ), previamente es necesario determinar otra serie de mapas, como el Mapa de

Horas Potenciales de Observación Globales (*GPOHM*) y los mapas correspondientes a las Rutas de Menor Coste (*LCP*). La forma de obtener estos mapas se detalla a continuación.

### 3.2.2.1 Mapa de Horas Potenciales de Observación Globales (*GPOHM*)

El cálculo de *GPOHM* se realiza de forma diferente para los observadores con una posición fija (*in situ*) y para los observadores en movimiento (en carretera). En ambos casos se ha considerado la misma altura sobre el suelo para los apoyos de la nueva HVOPL.

- **Observadores estáticos (*in situ*)**

Dependiendo de las características del punto de observación, el número de observadores potenciales puede corresponder a los habitantes de núcleos urbanos, rurales, granjas, o incluso visitantes diarios de puntos de especial interés turístico como miradores, monumentos, etc.

Primeramente, se crea un conjunto de datos vectoriales correspondientes a los puntos de observación donde se ubicarán los observadores *in situ*. Estos puntos se almacenan en una capa de un sistema GIS. Se crea una tabla de atributos en la que se recoge toda la información necesaria para cada punto de observación, posición geográfica, número de observadores potenciales y su altura de visión o altura de los ojos sobre el suelo, en ese punto. El valor de la variable *POH* para un único punto de observación *j* y un apoyo colocado en el área geográfica elemental representada por la celda *i*,  $POH_{i,j}$ , se calcula como se indica a continuación:

1. El punto de partida es el MDT de la zona geográfica donde se construirá la futura HVOPL. El tamaño de las celdas se elige en función de la longitud media de un vano de la línea eléctrica proyectada, de forma que en el centro de cada celda se coloque un apoyo. Por tanto, en cada celda *i* se almacenan los datos correspondientes a la altura del terreno y a la superficie ocupada por un apoyo de la línea.

2. Los datos correspondientes al punto de observación  $j$  se leen de la tabla de atributos asociada a la capa vectorial que contiene dicho punto. Estos datos son, la altura de los ojos del observador sobre el suelo y el máximo número posible de observadores en el punto  $j$  ( $obs_j$ ).
3. La visibilidad del apoyo situado en la celda  $i$  se determina mediante la aplicación de un filtro de visibilidad ( $f_{i,j}$ ). El filtro devuelve un valor igual a 1 si el apoyo es visible desde el punto de observación  $j$ , por el contrario, devuelve un valor igual a 0 si el apoyo no es visible desde el punto  $j$ . Este filtro es una función integrada en el sistema GIS y tiene en cuenta la altura del apoyo y la altura media sobre el suelo de la línea de los ojos de los observadores en el punto  $j$ .
4. Mediante funciones GIS se obtiene la distancia euclídea desde el punto central de la celda  $i$  hasta el punto  $j$  ( $d_{i,j}$ ).
5. Seguidamente se calcula el factor de ponderación  $w(d_{i,j})$  en función de la distancia  $d_{i,j}$ , utilizando la expresión (3.10).
6. Finalmente se calcula el valor de  $POH_{i,j}$  como se muestra en la expresión (3.11), donde ( $hmd$ ) representa el número de horas de luz de un día medio.

$$POH_{i,j} = f_{i,j} \cdot obs_j \cdot w(d_{i,j}) \cdot hmd \quad (\text{horas/día}) \quad (3.11)$$

Se repite este proceso para todos los puntos de observación  $j$ , y el valor acumulado obtenido corresponde al número de Horas Potenciales de Observación Globales *in situ*, para un apoyo situado en la celda  $i$ ,  $OSGPOH_i$ . Suponiendo un total de  $J$  puntos de observación *in situ*, este valor se calcula mediante la expresión (3.12), quedando su resultado almacenado en la celda  $i$ .

$$OSGPOH_i = \sum_{j=1}^J POH_{i,j} \quad (\text{horas/día}) \quad (3.12)$$

- **Observadores en movimiento**

Los observadores en movimiento se desplazan a lo largo de una carretera, lo que modifica el proceso de cálculo de  $POH$ . El número de posibles observadores se determina usando el tráfico diario medio de vehículos ( $ADT$ ) en cada tramo de carretera. Un tramo de carretera está limitado por dos bifurcaciones o cruces. Los tramos de carretera se dividen en segmentos, que son las porciones de un tramo de carretera y que poseen la misma velocidad media para los vehículos y el mismo valor de  $ADT$ . Se crea una nueva tabla de atributos que almacena la información necesaria para los observadores en carretera. La tabla contiene, para cada segmento de carretera, el valor de  $ADT$ , su longitud, velocidad media de los vehículos y altura sobre el suelo de los ojos de los viajeros. La altura de los apoyos de la línea eléctrica es la misma que la utilizada para los observadores *in situ*.

Para identificar los puntos de observación de un segmento de carretera, se divide éste en nodos separados uniformemente. El cociente de la distancia entre nodos consecutivos y la velocidad media, representa el tiempo de observación ( $t_n$ ) en un nodo  $n$ . Supongamos un segmento de carretera  $k$  y un apoyo de la nueva línea eléctrica situado en la zona geográfica representada por la celda  $i$ , el valor de la variable  $POH$ , considerando únicamente el segmento  $k$  y la celda  $i$ ,  $POH_{i,k}$ , se calcula para cada nodo  $n$  del citado segmento, como sigue:

1. En cada celda  $i$  del MDT de la zona de estudio se almacenan los datos correspondientes a la altura del terreno (orografía) y a la superficie ocupada por un apoyo de la HVOPL.
2. Se leen los datos correspondientes a los nodos del segmento de carretera  $k$  desde su tabla de atributos.

3. Se aplica un filtro de visibilidad ( $f_{i,n}$ ) entre la celda  $i$  y el nodo  $n$ . El filtro devuelve un valor igual a 1 si el apoyo es visible desde el punto de observación  $n$ , por el contrario, devuelve un valor igual a 0 si el apoyo no es visible desde el nodo  $n$ . Este filtro es una función GIS predefinida y se tiene en cuenta la altura del apoyo y la altura sobre el suelo de la línea de los ojos de los observadores en el nodo  $n$ .
4. Utilizando funciones GIS se obtiene la distancia euclídea ( $d_{i,n}$ ) entre el nodo  $n$  y el punto central de la celda  $i$ .
5. Posteriormente se utiliza la expresión (3.13) para calcular el factor de ponderación  $w(d_{i,n})$ , función de la distancia  $d_{i,n}$ .
6. El producto de los valores obtenidos del filtro de visibilidad  $f_{i,n}$ , el factor de ponderación  $w(d_{i,n})$  y el tiempo de observación en el nodo  $n$ ,  $t_n$ , se acumula en la celda  $i$ .
7. Tras procesar el número total de nodos  $N_k$  del segmento de carretera  $k$ , el valor acumulado en la celda  $i$  se multiplica por el *ADT* del segmento  $k$  ( $ADT_k$ ), y el número medio de personas por vehículo en ese segmento de carretera ( $obs_k$ ), cómo se expresa en (3.13).

$$POH_{i,k} = ADT_k \cdot obs_k \sum_{n=1}^{N_k} f_{i,n} \cdot w(d_{i,n}) \cdot t_n \quad (\text{horas/día}) \quad (3.13)$$

Este procedimiento se repite para un total de  $K$  segmentos de carretera en la zona estudiada. La acumulación de los valores de  $POH_{i,k}$  obtenidos para cada segmento de carretera permite calcular el valor global de las Horas Potenciales de Observación en carretera,  $ORGPOH_i$ , según se expresa en (3.14).  $ORGPOH_i$  representa el número acumulado de horas en un día medio en el que el apoyo de la HVOPL, situado en la zona representada por la celda  $i$ , puede ser visto por los observadores en carretera.

$$ORGPOH_i = \sum_{k=1}^K POH_{i,k} \quad (\text{horas/día}) \quad (3.14)$$

Este procedimiento puede adaptarse fácilmente para estudiar otro tipo de viajeros (en tren, peatones, en bicicleta, etc.). Será necesario modificar la tabla de atributos incluyendo la información relativa a los datos de estos nuevos tipos de viajeros.

- **Mapa de Horas Potenciales de Observación Globales (*GPOHM*)**

Por último, se calcula, para cada celda  $i$ , el valor de las Horas Potenciales de Observación Globales ( $GPOH_i$ ) sumando los valores obtenidos de  $OSGPOH_i$  y  $ORGPOH_i$ . En este cálculo se consideran los factores  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , con el objeto de asignar diferentes grados de importancia a los observadores *in situ* y a los observadores en carretera, según se muestra en la expresión (3.15).

$$GPOH_i = \lambda_1 \cdot OSGPOH_i + \lambda_2 \cdot ORGPOH_i \quad (3.15)$$

Con los valores  $GPOH_i$  de todas las celdas se puede representar el mapa *GPOHM*. Un ejemplo de *GPOHM* se muestra en la Figura 3.5.

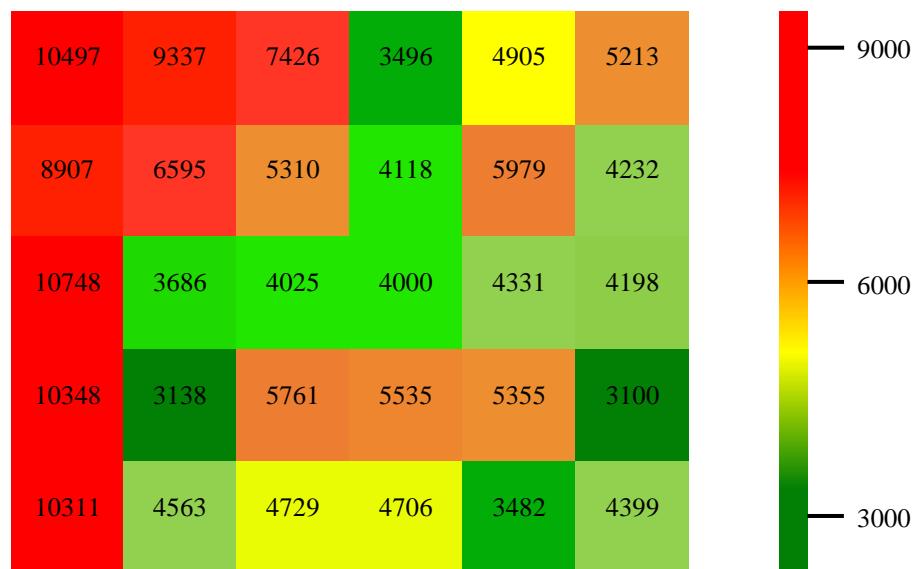


Figura 3.5. Ejemplo de una sección de mapa *GPOHM*.

### 3.2.2.2 Trazado de una HVOPL bajo el criterio de observabilidad.

Una vez determinado el mapa  $GPOHM$ , para obtener el Mapa de Selección de Corredores ( $CSM$ ), previamente es necesario determinar los mapas correspondientes a las Rutas de Menor Coste ( $LCP$ ).

- **Rutas de menor coste ( $LCP$ )**

Las  $LCP$  se determinan a partir del mapa  $GPOHM$ , obtenido anteriormente. El trazado de la posible HVOPL se construye mediante la selección de celdas vecinas que unen el punto origen y el punto final de la línea eléctrica. Por lo tanto, la ruta óptima entre dos celdas es el conjunto de celdas conectadas, ópticamente, con celdas vecinas de forma secuencial a lo largo de la ruta. El cálculo se basa en la aplicación del paquete *gdistance* [39], implantado en el software R [40], que proporciona funciones para calcular diversas medidas de distancia y rutas en diversos espacios geográficos representados por mallas o rejillas.

$GPOHM$  es un mapa que representa un espacio bidimensional  $\Omega$  de forma que  $\Omega = \{(x, y) : x = 1, \dots, X; y = 1, \dots, Y\}$ , donde la celda elemental con coordenadas  $(x, y)$  es un área geográfica, posible candidata para la colocación de un apoyo de la futura HVOPL. El conjunto  $P = \{p_1, \dots, p_k, \dots, p_K\} = \{(x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_K, y_K)\} = segmentos\{s_1, \dots, s_k, \dots, s_K\}$  corresponde a la ruta compuesta de  $K+1$  celdas. Los segmentos de línea  $s_k$  son los enlaces entre las celdas  $p_{k-1}$  y  $p_k$ . Un segmento únicamente puede unir una celda con otra de las ocho celdas vecinas que la rodean en el espacio  $\Omega$ .

A cada segmento  $s_k$  que une dos celdas vecinas,  $p_{k-1}$  y  $p_k$ , se le asocia un valor de transición  $f(s_k)$ . Este valor es independiente de la dirección seguida por el segmento. El valor de transición corresponde al valor  $GPOH$  almacenado en la celda  $p_k$ ,  $GPOH_{p_k}$  como se muestra en la expresión (3.16).

$$f(s_k) = GPOH_{p_k} \quad (3.16)$$

La ruta óptima desde la celda origen a cualquier celda de destino es el conjunto  $P$  de segmentos con los valores de transición acumulados más bajos. El mapa de  $LCP$  corresponde al archivo ráster donde los valores de transición acumulados más bajos, desde la celda origen, quedan almacenados en cada celda  $p_k$ . Para tener en cuenta el valor de la variable  $GPOH$  en la celda origen, ese valor se añade a todas las celdas del mapa  $GPOH$ , obteniendo el mapa de  $LCP$ . La Figura 3.6 muestra la sección del mapa  $LCP$  obtenido a partir del mapa  $GPOHM$  representado en la Figura 3.5. La celda central, en color verde oscuro, se ha tomado como celda origen.

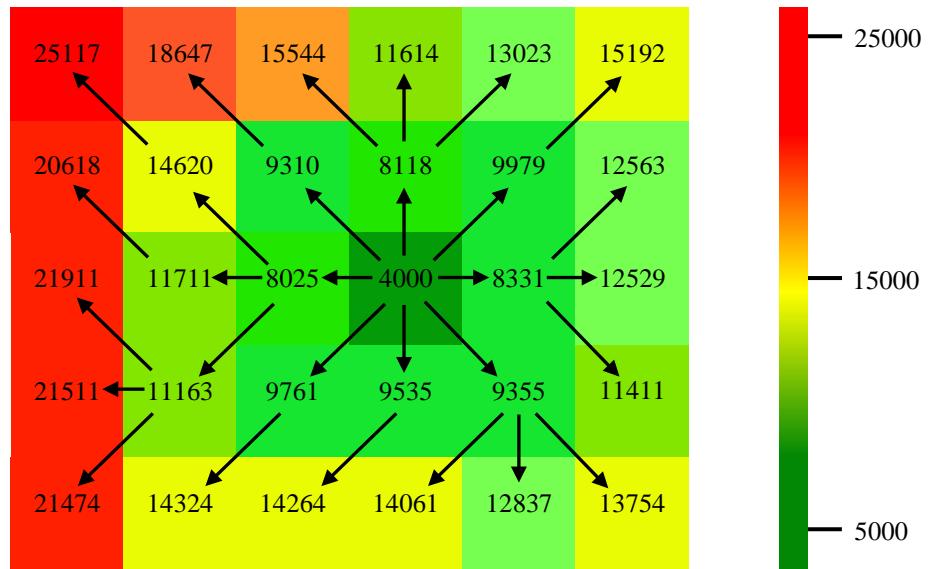


Figura 3.6. Ejemplo de una sección de mapa de Rutas de Menor Coste (LCP).

El valor contenido en cada celda del mapa de la Figura 3.6 corresponde al valor acumulado de  $GPOH$  siguiendo la ruta óptima desde la celda origen. Las flechas indican los enlaces seleccionados entre celdas vecinas en el proceso de cálculo.

- **Mapa de selección de corredores (CSM)**

El mapa  $CSM$  se obtiene a partir de dos mapas  $LCP$ . El primer mapa  $LCP$  se obtiene tomando el origen de la HVOPL como celda origen (celda  $A$ ), y el segundo mapa se obtiene tomando la celda final o destino de la línea eléctrica, como

celda origen (celda  $B$ ). Sumando el valor contenido en cada celda de ambos mapas  $LCP$  y restando el valor de  $GOPHM$ , se obtiene el valor de  $CSM$  para cada celda, como se indica en (3.17).

$$CSM_{p_k} = LCP_{A,p_k} + LCP_{B,p_k} - GPOH_{p_k} \quad (3.17)$$

Dado que el valor de  $LCP_{A,p_k}$  corresponde al coste del camino óptimo desde la celda  $A$  hasta la celda  $p_k$ , y  $LCP_{B,p_k}$  corresponde al coste del camino óptimo desde el destino  $B$  hasta la misma celda  $p_k$ , entonces la suma de los dos valores, para cada celda, da como resultado el coste del camino óptimo que une el origen y el destino y cruza esa celda  $p_k$ . Después hay que restar el valor de  $GPOH$  en esa celda  $p_k$ , ya que se ha contabilizado en ambos mapas  $LCP$ .

Los corredores visuales se definen dentro de las regiones frontera en el  $CSM$ , como el conjunto de celdas con un valor  $CSM_{p_k}$ , inferior a un valor umbral  $h_{max}$  definido por el usuario. Expresión (3.18).

$$p_k \in \Omega, : CSM_{p_k} \leq h_{max} \quad (3.18)$$

El camino óptimo estará compuesto por todas las celdas que contienen el valor mínimo,  $h_{min}$ . Por otra parte, las celdas que contienen el valor umbral,  $h_{max}$ , pertenecen a las fronteras del corredor. Es decir, los corredores visuales son zonas que incluyen trayectorias óptimas o casi óptimas según el criterio de observabilidad. Los límites del corredor visual están compuestos por las celdas cuyo valor corresponde al umbral seleccionado por el usuario.

### **3.3 EVALUACIÓN DE LA VISIBILIDAD DE NUEVAS CENTRALES FOTOVOLTAICAS EN ZONAS DE ESPECIAL VALOR PAISAJÍSTICO**

---

Aquí se presenta una nueva metodología, basada en GIS, para identificar, de forma objetiva, las zonas donde las nuevas plantas fotovoltaicas tendrán una mayor o menor observabilidad para un conjunto de potenciales observadores en

movimiento. Su aplicación está enfocada a lugares o zonas geográficas de especial protección paisajística, cultural y/o turística.

Mediante diversos análisis repetitivos, se determina el grado de visibilidad, total o parcial, de nuevas plantas FV; se evalúa también el posible tiempo de observación de los visitantes o turistas de la zona, considerando la ruta que siguen y su velocidad. Además, se propone un factor de mejora en la evaluación del grado de visibilidad para este tipo de instalaciones, las cuales pueden ser vistas, total o parcialmente, por encima de la línea del horizonte (con el cielo de fondo), y que, por lo general, en días claros, tendrán mayor contraste de color y, por ende, mayor visibilidad.

El resultado obtenido es un mapa que muestra la clasificación de las zonas geográficas en función de la variable denominada Tiempo de Percepción Global Acumulado (*GAPT*). La metodología puede aplicarse a zonas turísticas o con cualidades singulares en las que, debido a su ubicación o a su relación con el paisaje, es necesario delimitar aquellos lugares en los que la presencia de nuevas plantas FV sería menos perjudicial en términos de impacto visual. Algo similar ocurre con zonas cercanas a lugares históricos y emblemáticos, ya que las instalaciones fotovoltaicas visibles desde estos lugares pueden tener un impacto negativo en la percepción del valor cultural de la escena [30]. El impacto visual en lugares con un gran patrimonio cultural se ha convertido en un tema controvertido [31] y, en general, la metodología propuesta puede utilizarse para evaluar la construcción de nuevas plantas FV en lugares que, por su patrimonio cultural y su valor histórico o paisajístico, deben ser preservados [32].

### 3.3.1 Estructura de datos

Para el problema de evaluación de la visibilidad de plantas FV en áreas con un especial interés paisajístico o turístico, son necesarios conjuntos de datos de entrada en formato ráster y vectorial. Los datos de entrada, que se precisan en el sistema GIS para llevar a cabo la metodología propuesta, se muestran a continuación:

- Capa vectorial GIS que recoge el recorrido de caminos o carreteras de los que, más tarde, se extraerán los puntos de observación.
- Datos vectoriales correspondientes a los puntos de observación o nodos, por los que se desplazarán los posibles observadores en movimiento. Estos puntos se representan en una capa vectorial y tienen asociada una tabla de atributos que contiene los siguientes datos: coordenadas geográficas, altura de los ojos del observador sobre el suelo, altura máxima del objeto observado sobre el suelo, elevación del punto de observación (coordenada  $z$ ), pendiente del terreno en la dirección de desplazamiento, velocidad de desplazamiento de los observadores y tiempo medio de observación. Éste último es función de la velocidad de desplazamiento y se calculará a lo largo del proceso.
- Número anual de observadores que viajan a lo largo de los puntos de observación de una ruta dada.
- Datos ráster correspondientes al Modelo Digital de Superficie (MDS) y al Modelo Digital del Terreno (MDT). Con el objetivo de tener en cuenta los obstáculos visuales sobre el terreno (vegetación, edificios, etc.) se utiliza un MDS de la zona analizada, mientras que la planta FV y los puntos de observación se colocan sobre el MDT.

### **3.3.2 Metodología**

El principal objetivo es obtener un conjunto de mapas GIS que faciliten la identificación objetiva de aquellos lugares donde el tiempo de percepción de una planta FV sea más reducido. Las herramientas GIS permiten crear estos mapas trabajando con datos en formato ráster. Estos mapas representan, para cada zona geográfica o celda, los valores de la variable denominada Tiempo de Percepción Global Acumulado (*GAPT*). Esta variable corresponde al valor acumulado del número de horas al año que la planta FV propuesta, puede ser vista por todos los posibles observadores en movimiento, considerando todos los puntos de observación de la zona en estudio. La variable *GAPT* es la suma de los valores de

otra variable denominada Tiempo de Percepción Acumulado (*APT*), para todos los puntos de observación de cada ruta de la zona estudiada.

Considerando un único punto de observación, el valor de la variable *APT*, en cualquier celda, representa el valor acumulado de las posibles horas al año en las que la planta FV propuesta (situada en el área representada por dicha celda) puede ser vista por todos los observadores que pasan por el punto de observación.

Además de los datos mencionados en el apartado 3.3.1, el cálculo del número de horas de percepción acumuladas al año, representado por la variable *APT*, tiene en cuenta factores de mayoración y minoración. Como factor de mayoración se incluye la fracción de la planta FV que puede verse por encima de la línea del horizonte y tiene el cielo como fondo. En estas situaciones el contraste de color de la instalación FV generalmente es mayor en días claros. No se han considerado otras condiciones climatológicas que pueden influir en la visibilidad de la planta. Como factores de minoración se incluyen: la fracción de la planta fotovoltaica que es posible ver desde el punto de observación (a menor fracción visible menor será la percepción visual), y la distancia entre el punto de observación y la celda en la que se encuentra la planta FV propuesta. Para tener en cuenta la disminución de la agudeza visual del ser humano con la distancia, es necesario introducir un factor de ponderación en función de esa distancia. Este factor ya ha sido mostrado en la expresión (3.10).

Esta metodología se ha aplicado a posibles observadores que se desplazan caminando a una determinada velocidad. Sin embargo, también es aplicable a otros tipos de observadores que se desplazan con otros medios de locomoción (vehículos terrestres, a caballo, etc.). Sólo se trata de utilizar los valores adecuados de velocidad media y altura de los ojos del observador sobre el suelo cuando éste utiliza esos medios de locomoción. El número de observadores potenciales (*NOY*) corresponde al número anual de caminantes que se desplazan por una ruta (carretera, camino o sendero). Los valores de *NOY* de cada ruta es posible obtenerlos de las autoridades locales.

El resultado son mapas en formato ráster que recogerán los valores de las variables  $APT$  y  $GAPT$ , cuyos procesos de cálculo se describen con detalle en las siguientes secciones.

### 3.3.2.1 Evaluación de $APT$

Supóngase que, a lo largo de una determinada ruta,  $k$ , se disponen  $N_n$  nodos o puntos de observación. El valor  $APT_{i,k}$  corresponde a la suma de los valores de la variable  $APT$  para los  $N_n$  nodos de la ruta  $k$ , considerando una futura planta fotovoltaica colocada en la celda  $i$ . A continuación se describen las etapas que definen el proceso completo de evaluación de la variable  $APT_{i,k}$ .

1. Generación del conjunto de posiciones de los puntos de observación. Estas posiciones se generan tomando  $N_n$  nodos equidistantes a lo largo del recorrido de la ruta  $k$ , a una distancia seleccionada previamente. La capa GIS que contiene los datos vectoriales correspondientes a los nodos tiene asociada una tabla de atributos que almacena los datos específicos de cada nodo según se ha recogido en el apartado 3.3.1.
2. Determinación de la velocidad de marcha del observador. Un observador que camina por rutas delimitadas sobre diferentes tipos de terreno no tiene una velocidad constante, como puede ocurrir cuando camina por terreno llano y libre de obstáculos. La velocidad del observador será generalmente más lenta cuando camine por un terreno abrupto con pendientes pronunciadas. Para determinar el tiempo de marcha en función de las pendientes, la Federación Española de Montaña y Escalada (FEDME) recomienda el Método de Información de Excursiones (MIDE) [41], creado con el objetivo de prevenir accidentes mediante una valoración previa de la excursión. Sin embargo, en esta metodología, se ha utilizado la función de Tobler modificada, propuesta por Márquez en [42], por su sencillez para implementarla en un GIS y por los buenos resultados obtenidos en diferentes tipos de senderos. Consiste en una función exponencial que proporciona la velocidad de marcha en función de la pendiente del tramo de la ruta por

la que camina el observador. Esta función se muestra en (3.19), donde  $ws_n$  es la velocidad de marcha (km/h) en el nodo  $n$  y  $\delta_n$  es el ángulo de la pendiente del terreno, en grados, en la dirección habitual de la marcha en ese nodo.

$$ws_n = 4.8 \cdot e^{-5.3 |0.7 \tan \delta_n + 0.03|} \quad (\text{km/hora}) \quad (3.19)$$

Para determinar el ángulo de la pendiente del terreno  $\delta_n$ , en el sentido de la marcha, asociado a cada nodo  $n$ , se realizan los siguientes pasos:

- A cada punto de observación  $n$  se le asigna el valor almacenado en la celda, del MDT, que posee las mismas coordenadas de ese nodo. Este valor corresponde a la coordenada  $z$  del nodo, el cual se almacena en la tabla de atributos de la capa GIS que contiene los nodos de la ruta  $k$ .
- Conocida la diferencia entre los valores de la coordenada  $z$  de dos nodos consecutivos,  $n$  y  $n+1$ , y la distancia  $d_n$  entre ellos (medida sobre el plano horizontal), es sencillo obtener el ángulo de la pendiente  $\delta_n$ , cuando el observador se desplaza del nodo  $n$  al  $n+1$ . Si  $\delta_n$  tiene un valor positivo, se trata de una pendiente ascendente, mientras que, si ese valor es negativo, la pendiente es descendente. El valor obtenido se almacena en el registro correspondiente al nodo  $n$  en su tabla de atributos.
- Se analizan todos los nodos de la ruta  $k$  en la dirección de la marcha, obteniendo el valor de  $\delta_n$  en cada nodo.
- Se determina el valor de la distancia real recorrida ( $D_n$ ) por el observador al desplazarse entre los nodos consecutivos  $n$  y  $n+1$ ;  $D_n = d_n / \cos \delta_n$ .

- A continuación, se aplica la función de senderismo (3.19), obteniendo los valores de la velocidad del observador  $ws_n$  en cada nodo  $n$ . Este valor se almacena en su tabla de atributos.
3. Posteriormente se calcula del tiempo medio de observación  $t_n$  en el nodo  $n$ . Esta variable corresponde al tiempo de viaje, utilizado por el caminante, para ir del nodo  $n$  al nodo  $n+1$  a lo largo de la ruta seleccionada  $k$ . El tiempo  $t_n$  se calcula como el cociente de la distancia real entre dichos nodos y la velocidad del observador  $ws_n$  asignada al nodo  $n$ ;  $t_n = D_n/ws_n$ . El valor obtenido para  $t_n$  se almacena en la tabla de atributos.
  4. Evaluación de la distancia euclídea,  $d_{i,n}$ , entre la nueva planta FV, colocada en la celda  $i$ , y el punto de observación  $n$ , mediante el uso de herramientas específicas GIS. Posteriormente, se obtiene el factor de ponderación  $w_{i,n}$  para cada celda  $i$ , en función de la distancia  $d_{i,n}$ , utilizando la expresión mostrada en (3.10).
  5. Determinación del factor de altura visible ( $fhv_{i,n}$ ). Este factor representa la parte visible (en términos de altura) de la futura planta FV, instalada en la celda  $i$ , cuando el observador se encuentra en el punto de observación  $n$ . Previamente la altura máxima de la planta ( $H_{pv}$ ) se divide en segmentos de longitud  $h_{seg}$ . Para determinar  $fhv_{i,n}$  en cada nodo, se llevan a cabo varios análisis repetitivos, siguiendo los pasos indicados a continuación:
    - Para realizar un correcto análisis de visibilidad sobre un ráster DSM, es necesario generar un nuevo DSM en el cual los valores de elevación en la celda  $i$  (ubicación de la planta FV) y del nodo  $n$  (ubicación del observador) deben corresponder con los valores de elevación del suelo desnudo, en esas mismas posiciones en el ráster MDT.

- Sea  $h$  la altura analizada de la instalación fotovoltaica. En cada análisis,  $h$  se incrementa en un segmento de longitud  $h_{seg}$ , pudiendo  $h$  tomar valores comprendidos entre  $h_{seg}$  y la altura máxima  $H_{pv}$  de la planta FV, como se recoge en la Figura 3.7.

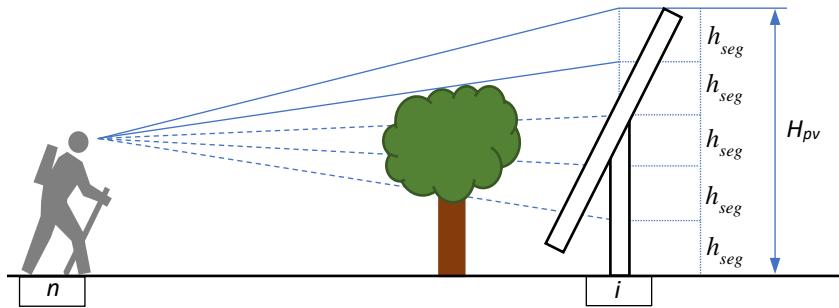


Figura 3.7. La altura  $H_{pv}$  de la planta FV se divide en segmentos de igual longitud para posteriores análisis de visibilidad con diferentes valores de altura.

- Se llevan a cabo análisis de visibilidad para evaluar el factor de visibilidad ( $f\nu_{i,n}^h$ ) de la planta FV con una altura  $h$  y situada en la celda  $i$ , estando el observador en el nodo  $n$ . El resultado obtenido para  $f\nu_{i,n}^h$  tomará el valor 0, si desde el nodo  $n$  no es posible que el observador vea la planta fotovoltaica. Por el contrario,  $f\nu_{i,n}^h$  tomará el valor 1, si desde el nodo  $n$  es posible ver la instalación FV de altura  $h$ . Los resultados, tras aplicar el análisis a todas las celdas de la zona de estudio, se recogen en un ráster binario (sólo almacena unos y ceros).
- El valor de  $h$  se incrementa en un segmento, repitiéndose de nuevo el análisis de visibilidad desde el mismo nodo  $n$ . El último análisis será cuando  $h$  alcance el valor de  $H_{pv}$ . Cada análisis para cada valor de  $h$  da como resultado un conjunto de datos ráster binarios de  $f\nu_{i,n}^h$ .
- A continuación, se suman los valores de  $f\nu_{i,n}^h$  obtenidos para cada valor de  $h$ . El resultado representa el número de segmentos de altura

de la planta FV situada en la celda  $i$  que pueden ser vistos desde el nodo  $n$ . Finalmente, se multiplica por el término  $h_{seg}/H_{pv}$ , obteniendo el factor de altura visible  $fhv_{i,n}$ , según se muestra en la expresión (3.20), que representa el valor por unidad de la altura  $H_{pv}$  vista desde el nodo  $n$ .

$$fhv_{i,n} = \frac{h_{seg}}{H_{pv}} \sum_{h=h_{seg}}^{H_{pv}} fv_{i,n}^h \quad \text{for } H_{pv} > 0 \quad (3.20)$$

6. Posteriormente se evalúa el índice *skyline*. Por lo general, las instalaciones que sobresalen por encima de la línea del horizonte (con cielo claro de fondo) tendrán mayor contraste de color y, por ende, mayor visibilidad que instalaciones que queden por debajo del horizonte, con el terreno de fondo [43]. Para tener en cuenta este aspecto, se calcula el índice *skyline*, al que denominaremos (*Isk*). Si consideramos una planta FV en la celda  $i$  y un observador en el punto de observación  $n$ , el conocimiento del índice  $Isk_{i,n}$  permite dar más peso a la instalación que se ve, total o parcialmente, por encima de la línea del horizonte. Para determinar este índice será necesario evaluar que fracción, en términos de altura, de la instalación FV es visible desde el nodo  $n$ , por encima del horizonte.

El índice  $Isk_{i,n}$  se calcula mediante la expresión (3.21), donde únicamente se consideran valores positivos.

$$\begin{cases} Isk_{i,n} = \frac{d_{i,n}(\tan \theta f_{i,n} - \tan \theta h_{i,n})}{H_{pv}} & \text{for } \theta f_{i,n} > \theta h_{i,n} \\ Isk_{i,n} = 0 & \text{for } \theta f_{i,n} \leq \theta h_{i,n} \end{cases} \quad (3.21)$$

En esa expresión,  $\theta f_{i,n}$  corresponde al ángulo de elevación de la línea de visión [44] que conecta los ojos del observador, colocado en el punto

de observación  $n$ , con la altura máxima  $H_{pv}$  de la instalación FV, colocada en la celda  $i$ , y  $\theta h_{i,n}$  es el ángulo de elevación de la línea de visión que conecta los ojos del observador con el horizonte global más allá de la celda  $i$ , como se muestra en la Figura 3.8.

El índice  $Isk_{i,n}$  puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1. Representa el valor por unidad de la altura  $H_{pv}$ , que queda sobre la línea del horizonte, visto por un observador situado en el nodo  $n$ . Cuando toda la instalación, en términos de altura, se encuentra por debajo de la línea del horizonte  $Isk_{i,n}$  toma el valor 0, mientras que, si la totalidad de la instalación está por encima de la línea del horizonte, desde el punto de vista del observador,  $Isk_{i,n}$  toma el valor 1.

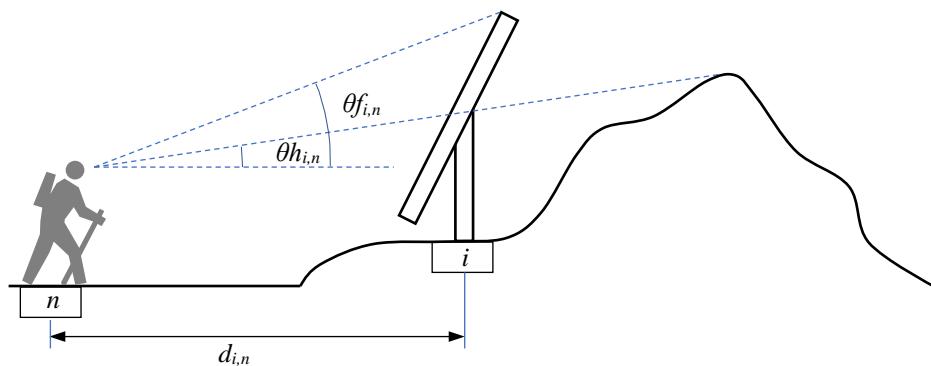


Figura 3.8. Líneas de visión que conectan el observador con la instalación FV y con el horizonte global.

Para evaluar el índice *skyline*, previamente es necesario determinar los ángulos de elevación  $\theta h_{i,n}$  y  $\theta f_{i,n}$  como se expone a continuación:

- En primer lugar, supongamos que los observadores pueden mirar en cualquier dirección, por lo que es necesario determinar la línea del horizonte alrededor de cada punto de observación  $n$ . Por lo tanto, es preciso evaluar la altura del horizonte  $\theta h_{i,n}$  para valores de acimut del observador de 0 a 360 grados sexagesimales. El acimut del observador se refiere al ángulo, medido sobre el plano horizontal, formado por la

dirección en la que mira el observador con respecto a una dirección de referencia. En este proceso, el valor del acimut es de 0 grados cuando el observador está orientado al este y de 90 grados cuando está orientado al norte. Tras la aplicación de herramientas GIS, el resultado obtenido, para cada nodo  $n$ , es un conjunto de datos ráster en el que cada celda  $i$  contiene el valor del ángulo de elevación  $\theta h_{i,n}$  de la línea de visión que conecta los ojos del observador, en el nodo  $n$ , con el horizonte global más allá del área representada por la celda  $i$ . En consecuencia, todas las celdas con el mismo valor de acimut tomarán también el mismo valor de  $\theta h_{i,n}$ .

- Para obtener el ángulo de elevación  $\theta f_{i,n}$  se utilizan herramientas específicas GIS de análisis de visibilidad en cada nodo. Como resultado se obtiene un conjunto de datos ráster en el que cada celda  $i$  contiene el valor del ángulo  $\theta f_{i,n}$ .
- Posteriormente, con la ayuda de técnicas de procesamiento de capas ráster, se determina el índice  $Isk_{i,n}$  mediante la expresión (3.21).

Para un único observador situado en el nodo  $n$ , el valor de  $APT_{i,n}$  en la celda  $i$  tomará el valor resultante del producto de los siguientes términos: factor de altura de visibilidad  $fhv_{i,n}$ , factor de ponderación  $w_{i,n}$  en función de la distancia  $d_{i,n}$ , tiempo medio de observación  $t_n$ , y el término  $(1 + Isk_{i,n})$ . Este último término se ha introducido para dar mayor grado de visibilidad a las instalaciones que pueden ser vistas por encima de la línea del horizonte. Esta metodología ha sido aplicada a rutas recorridas por los caminantes, generalmente, en períodos de buen tiempo con cielos despejados y alto contraste de color como primavera, verano y otoño. Por consiguiente, la visibilidad de la fracción de la planta FV, que es posible ver por encima de la línea del horizonte, recibe el doble de peso que el resto de la instalación. El proceso completo de cálculo del  $APT_{i,n}$  se muestra en la Figura 3.9.

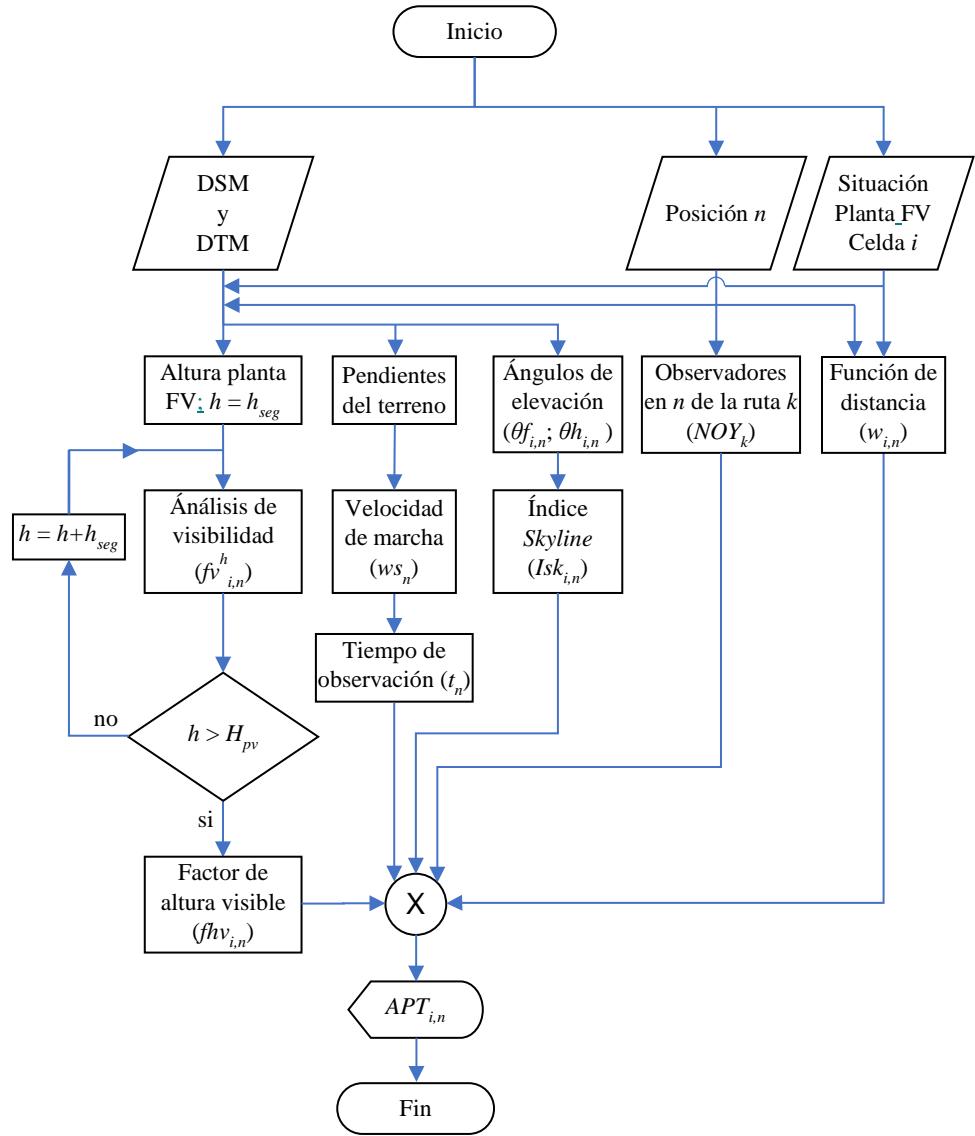


Figura 3.9. Diagrama de flujo del cálculo de  $APT_{i,n}$  para una planta FV situada en la zona geográfica representada por la celda i, estando los observadores en la posición representada por el nodo n.

Teniendo en cuenta el número medio anual de observadores que pueden circular por el nodo n de la ruta k ( $NOY_k$ ), el valor acumulado de  $APT_{i,n}$  vendrá dado por la expresión (3.22).

$$APT_{i,n} = NOY_k \cdot fhv_{i,n} \cdot w_{i,n} \cdot t_n \cdot (1 + Isk_{i,n}) \quad (\text{horas/año}) \quad (3.22)$$

Finalmente, considerando todos los puntos de observación,  $N_n$ , de la ruta  $k$  y el número de observadores  $NOY_k$  desplazándose a lo largo de cada ruta, el valor acumulativo de  $APT_{i,k}$  en la celda  $i$  vendrá dado por la expresión (3.23).

$$APT_{i,k} = NOY_k \sum_{n=1}^{N_n} (fhv_{i,n} \cdot w_{i,n} \cdot t_n) (1 + Isk_{i,n}) \quad (\text{horas/año}) \quad (3.23)$$

### 3.3.2.2 Evaluación de *GAPT*

El proceso descrito, se repite para cada una de las posibles rutas en el área de estudio, de forma que para cada celda  $i$ , el resultado de sumar los valores de  $APT_{i,k}$  de cada ruta  $k$  es el valor del tiempo de percepción acumulado global ( $GAPT_i$ ), como se muestra en la expresión (3.24), donde  $N_k$  representa el número total de rutas en el área de estudio.

$$GAPT_i = \sum_{k=1}^{N_k} APT_{i,k} \quad (\text{horas/año}) \quad (3.24)$$

Los valores calculados de  $GAPT_i$  en cada una de las celdas se recogen en un conjunto de datos ráster, lo que permite identificar visualmente en un mapa aquellas zonas con un valor de  $GAPT$  más bajo y que, por tanto, serán candidatas para la instalación de plantas fotovoltaicas bajo un criterio objetivo de observabilidad.

---

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

---

### 4.1. RESULTADOS DE LA SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS PARA NUEVAS CENTRALES FOTOVOLTAICAS EN FUNCIÓN DE SU OBSERVABILIDAD

---

La metodología de ayuda para la selección de emplazamientos para nuevas centrales FV, en función de su observabilidad, definida en el apartado 3.1, ha sido implementada y ensayada satisfactoriamente en un GIS. Los resultados obtenidos en forma de mapas en formato ráster contienen información de gran interés para los grupos involucrados en la toma de decisiones en la construcción de este tipo de plantas.

Aquí se recogen dos casos prácticos para diferentes zonas de la Rioja. Las zonas seleccionadas son los términos municipales de Aldeanueva de Ebro y de Arnedo, correspondientes a los casos de estudio 1 y 2, respectivamente. Para ambos casos, la metodología aplicada trata de identificar los lugares con la menor observabilidad, teniendo en cuenta todas las poblaciones de las zonas estudiadas y de las áreas circundantes, con un total de 22 poblaciones, incluyendo ciudades, pueblos y aldeas. El número de habitantes de las localidades consideradas en el estudio oscila entre 24.500, como es el caso de la ciudad de Calahorra, y 8 habitantes, en el caso de una pequeña aldea. La Figura 4.1 muestra las dos zonas de ambos casos de estudio.

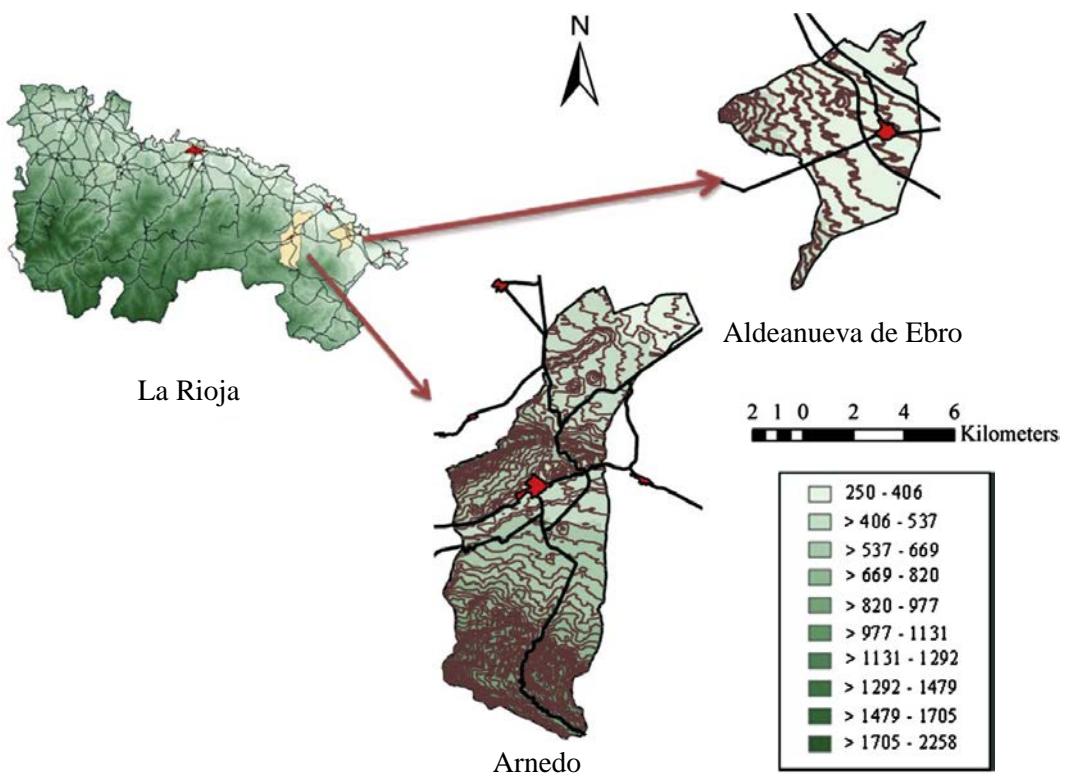


Figura 4.1. MDT de La Rioja donde se representan las zonas bajo estudio y las principales poblaciones y carreteras. Los valores de la leyenda corresponden a la altura en metros sobre el nivel del mar.

Las estaciones de medición del tráfico de vehículos, en las zonas elegidas para ambos estudios, se muestran en la Figura 4.2. En la figura, la ubicación de cada estación de medición ha sido representada con estrellas, mientras que la denominación de la estación de medición, el valor de *ADT* (*IMD* en español) y el porcentaje de vehículos pesados ( $\%P$ ), se han representado en el interior de rectángulos. En los casos de estudio, se ha considerado como segmentos de carretera todos los tramos comprendidos entre dos bifurcaciones, aunque es posible elegir segmentos más cortos. Cada segmento de carretera se dividió en nodos (uno por metro de longitud). Se ha considerado un número total de 53 segmentos de carretera para cada caso de estudio.

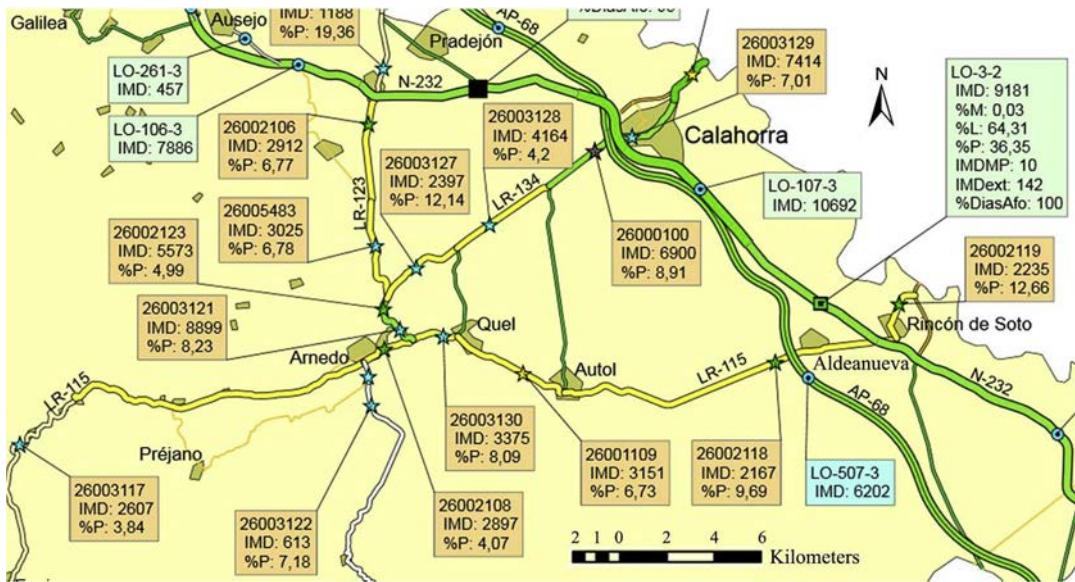


Figura 4.2. Datos de tráfico correspondientes a las carreteras de la zona estudiada.

Las plantas FV consideradas en ambos estudios ocupan la misma superficie, aunque su potencia nominal es diferente. En el caso de estudio 1 se aplica la metodología expuesta, a una planta FV construida a base de seguidores solares con 7 metros de altura media y una potencia nominal total instalada de 0,6 MWp. El caso de estudio 2 considera una planta FV construida a base de paneles fijos montados sobre suelo, con una altura de dos metros y con una potencia total instalada de 1 MWp. Teniendo en cuenta la latitud e irradiación solar media en las zonas estudiadas, se ha estimado una superficie para cada una de estas plantas de 10.000 m<sup>2</sup>. Por ello, se ha elegido un tamaño de celda de 100 x 100 m, por lo que cada celda representa una superficie de 10.000 m<sup>2</sup>, correspondiendo a un emplazamiento potencial para la construcción de la futura planta FV.

#### • Caso de estudio 1

En este primer caso, la nueva planta FV tendrá una capacidad de 0,6 MWp y se construirá a base de seguidores solares a dos ejes. La instalación se construirá en el término municipal de Aldeanueva de Ebro, en la Rioja (España). La altura

máxima de la instalación sobre el terreno será de 7 m y la superficie ocupada, como se ha mencionado anteriormente, será de 10.000 m<sup>2</sup>. Dentro de este término municipal la principal población es Aldeanueva, con 2.800 habitantes. Existen dos carreteras principales que cruzan el territorio municipal, una autopista y una carretera nacional. Los usuarios de ambas carreteras no suelen ser habitantes de la zona y se verán afectados por el impacto visual de la planta ocasionalmente, por lo que en este estudio se ha utilizado la estrategia A, propuesta en el apartado 3.1.2.

En la Figura 4.3a y en la Figura 4.3b se muestran los mapas ráster *OSGPOH* y *ORGPOH*, respectivamente. En ellas, se representa el territorio municipal de Aldeanueva, donde el área ocupada por el centro urbano se representa por un polígono de color amarillo. Las carreteras que cruzan la zona están representadas por líneas negras. En estos mapas, el color verde representa celdas con valor nulo de *POH*. Por lo general, las zonas próximas que rodean el centro urbano adquieren valores elevados de *OSGPOH*, por ejemplo, en la Figura 4.3a, los valores más altos de *OSGPOH*, en color marrón oscuro, se encuentran en la zona correspondiente a la llanura de inundación del río Ebro, con cotas geográficas más bajas que el resto del territorio estudiado. Esto hace que esta área geográfica pueda ser vista por los habitantes del centro urbano, con elevados tiempos de observación.

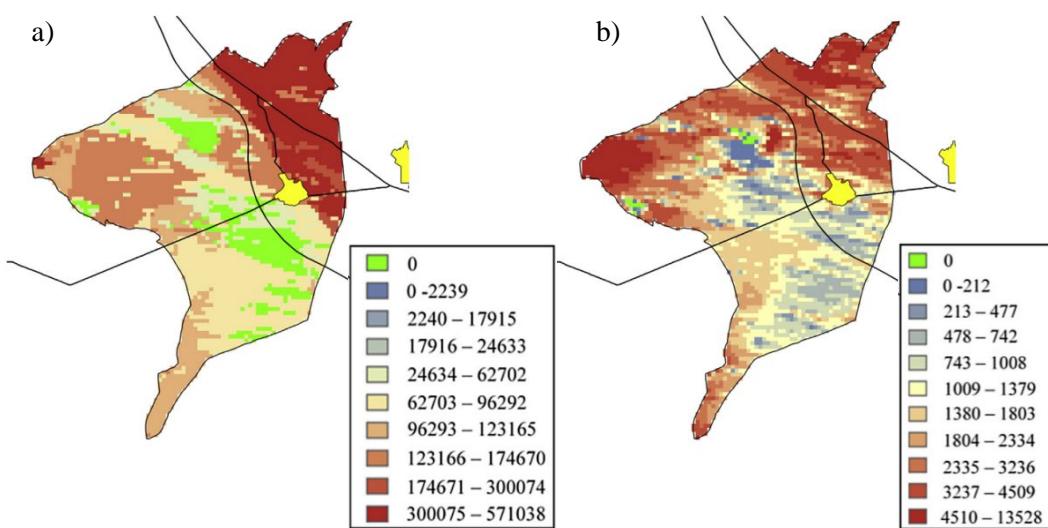


Figura 4.3. a) mapa *OSGPOH*. b) mapa *ORGPOH*.

En el mapa *ORGPOH* (Figura 4.3b) se observa que los valores más altos (color marrón oscuro) corresponden a las zonas visibles desde la mayor parte de los segmentos de carretera y no necesariamente a las zonas adyacentes a las carreteras.

En la Figura 4.4 se muestra el mapa *GPOHI*, obtenido con los factores de ponderación normalizados  $w_s = 0,8$  y  $w_r = 0,2$ . Las celdas con un valor nulo (color verde) corresponden a zonas donde el impacto visual de la nueva planta fotovoltaica es insignificante y no será vista por ninguno de los dos tipos de observadores considerados (*in situ* y en movimiento).

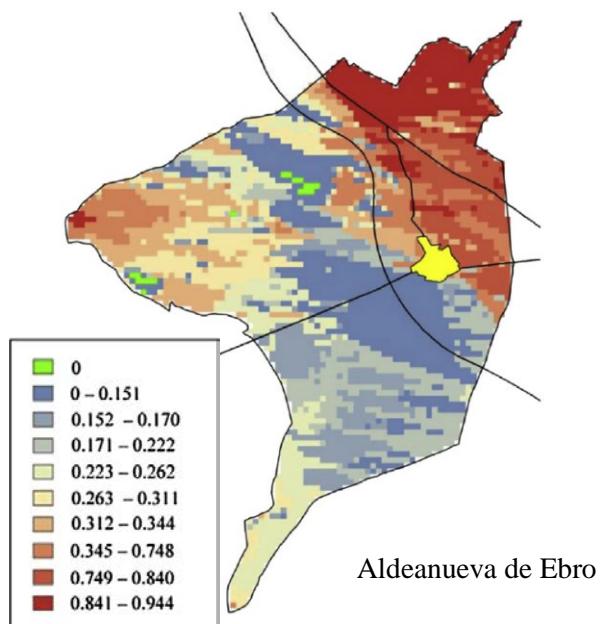


Figura 4.4. Mapa *GPOHI* obtenido con los factores de ponderación  $w_s = 0,8$  y  $w_r = 0,2$ .

#### • Caso de estudio 2

En este caso práctico, la nueva instalación consiste en paneles FV fijos montados sobre el suelo con una capacidad total de 1 MWp. La altura de los paneles sobre el suelo es de dos metros y la superficie ocupada por los mismos es de 10.000 m<sup>2</sup>. La planta FV estará construida en el término municipal de Arnedo, en la

provincia de La Rioja. La principal localidad es la ciudad de Arnedo (14.551 habitantes) situada cerca del centro de la zona estudiada e interconectada mediante carreteras con municipios próximos, como se ve en la Figura 4.1. Estas carreteras son principalmente utilizadas por los habitantes de la zona. La metodología descrita en el apartado 3.1.2, con la estrategia B, fue aplicada para obtener el valor  $POH$  en todas las celdas en el área de estudio. La Figura 4.5a muestra el mapa *OSGPOH* y la Figura 4.5b muestra el mapa *ORGPOH*. Los centros urbanos están representados por polígonos amarillos y las carreteras por líneas de color negro. En ambos mapas, el color verde representa áreas con valor de  $POH$  nulo.

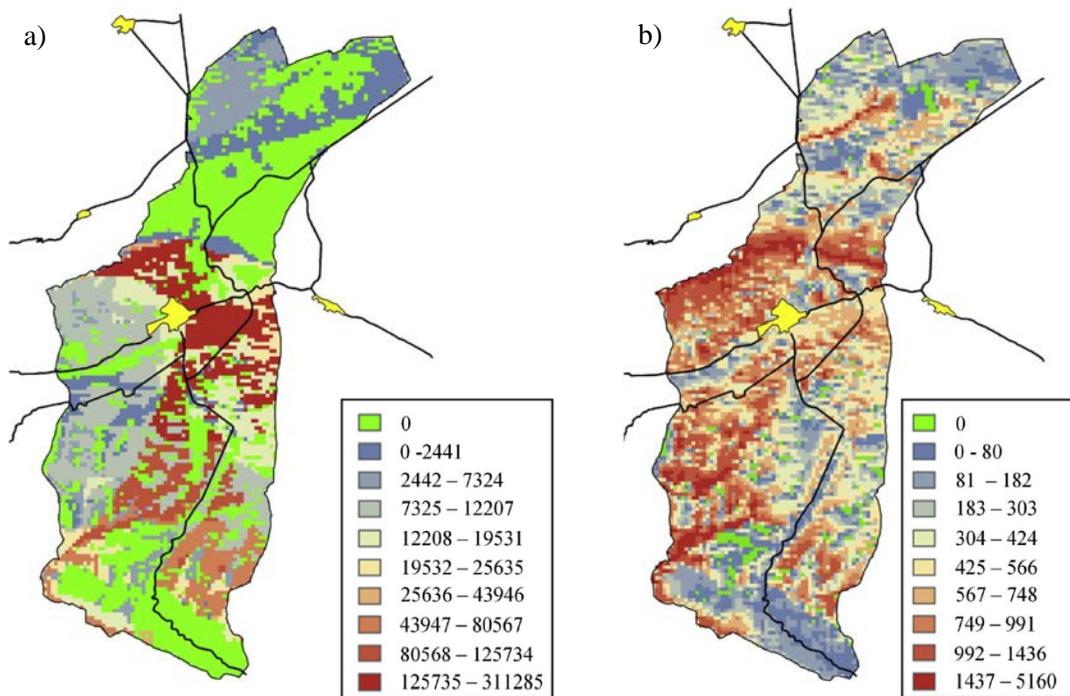


Figura 4.5. a) Mapa de Horas Potenciales de Observación Globales para observadores in situ, *OSGPOH*. b) Mapa de Horas Potenciales de Observación Globales para observadores en carretera, *ORGPOH*. Ambos mapas representan el territorio municipal de Arnedo.

La zona norte del territorio municipal muestra valores bajos de *OSGPOH*, por el contrario, zonas próximas al centro urbano (en dirección este) poseen valores altos de *OSGPOH*, exceptuando aquellas zonas que no pueden ser vistas desde el municipio. Esto se debe a que se encuentra a lo largo de un río, en una depresión

del terreno, y hay zonas cercanas que no se ven desde el centro urbano. Los valores más altos de  $ORGPOH$  corresponden a zonas que pueden ser vistas desde la mayor parte de segmentos de las carreteras de los alrededores.

La Figura 4.6 muestra el mapa  $nGPOH$  obtenido con valores de 0,5 para los factores de ponderación  $w_s$  y  $w_r$ . Se ha asignado el mismo valor a ambos factores porque los observadores que utilizan las carreteras son principalmente habitantes de la zona. Las celdas con valores nulos de  $nGPOH$  (en color verde) representan los mejores lugares para instalar nuevas plantas FV, desde el criterio de la observabilidad, ya que presentan un impacto visual nulo al no ser vistas desde los municipios ni desde las carreteras consideradas en la zona estudiada.

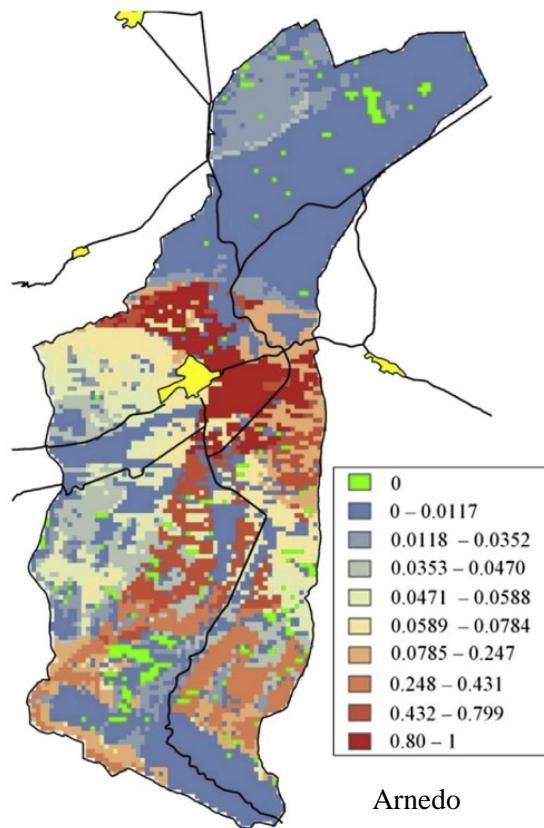


Figura 4.6. Mapa  $nGPOH$  en el que se ha tomado un valor de 0,5 para los factores de ponderación  $w_s$  y  $w_r$ .

Las zonas que rodean el centro urbano por el norte y el este presentan los valores más altos de  $nGPOH$  (celdas con color marrón oscuro), mientras que las zonas con los valores más bajos se sitúan principalmente al norte del territorio municipal.

En los dos casos estudiados, los resultados obtenidos ofrecen una valiosa información a las autoridades municipales o regionales que tienen que aprobar la instalación de la nueva planta FV, facilitando la selección de las zonas más adecuadas con los valores de  $POH$  más bajos.

#### **4.2. RESULTADOS DEL TRAZADO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN BAJO UN CRITERIO OBJETIVO DE OBSERVABILIDAD**

---

La metodología definida en el apartado 3.2 e implementada en un GIS se ha aplicado a una zona de estudio localizada en el sureste de la provincia de La Rioja (España). La nueva instalación consiste en una línea eléctrica aérea de distribución de 66 kV, localizada entre las localidades de Tudelilla y Aldeanueva de Ebro. Esta zona incluye 22 puntos de observación fijos o *in situ* (centros urbanos, pueblos y aldeas) y 53 tramos de carretera. Dado que los núcleos urbanos de la zona que abarca este estudio son relativamente pequeños, para cada núcleo urbano se ha considerado que el número de observadores potenciales es igual al número de habitantes, colocando el punto de observación en el centroide del polígono que representa el municipio. Por otra parte, la mayoría de los tramos de carretera únicamente tienen un límite de velocidad que depende del tipo de carretera. La distancia entre nodos consecutivos en los segmentos de carretera se fijó en 1 m. Las estaciones de medición de tráfico se tuvieron en cuenta para obtener el valor del tráfico medio diario,  $ADT$ , en cada tramo de carretera.

Los principales núcleos de población de la zona estudiada son las localidades de Calahorra (24.500 habitantes), al norte de la zona, las localidades de Arnedo (14.551 habitantes), Quel (2.027 habitantes) y Autol (4.367 habitantes), ubicada en el centro de la zona bajo estudio, como se muestra en la Figura 4.7. En

en este mapa las carreteras que unen los núcleos urbanos se representan con líneas de color blanco.

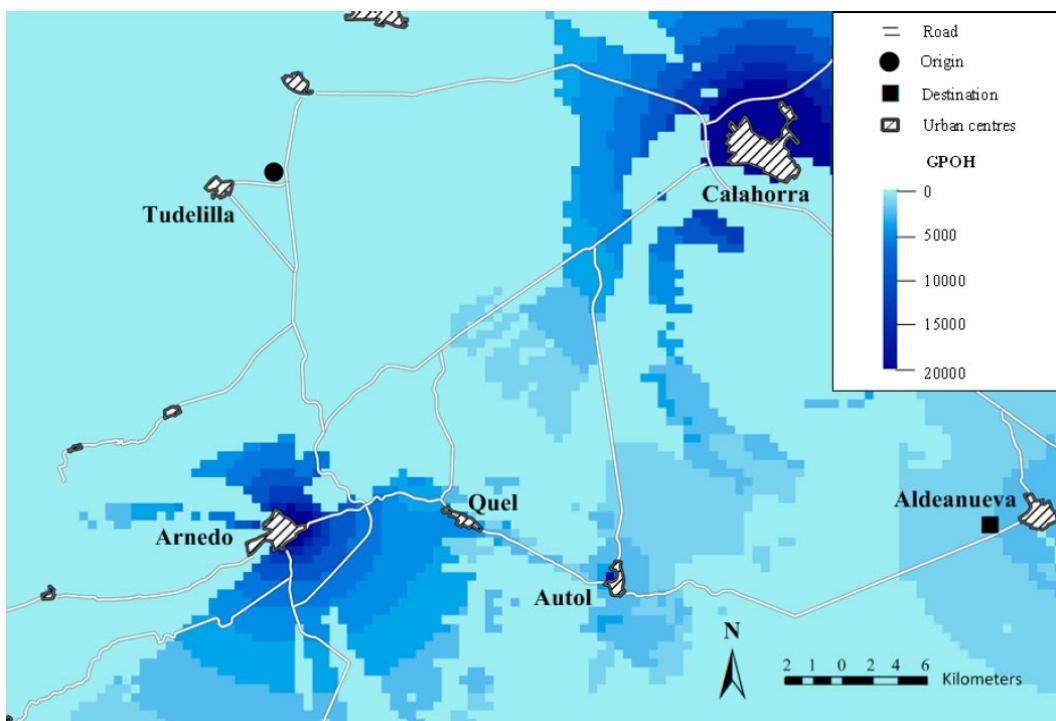


Figura 4.7. Región seleccionada en la que se incluyen centros urbanos, carreteras y GPOHM (en horas).

El proceso computacional se llevó a cabo para identificar los corredores visuales, siguiendo el criterio de observabilidad, correspondientes a la construcción de una nueva línea eléctrica aérea de alta tensión (HVOPL). La línea planificada parte de una localización origen, próxima al municipio de Tudelilla, hasta un punto de destino, próximo al centro urbano de Aldeanueva. Las posiciones relativas de los puntos origen y destino de la línea planificada pueden verse en la Figura 4.7, representados por un círculo y un cuadrado de color negro, respectivamente. Se prevé que la futura línea cuente con apoyos de 25 m de altura y vanos de entre 200 y 300 m de longitud. Por ello, se ha seleccionado un tamaño de celda en el sistema GIS de 200 x 200 m, de forma que cada celda represente una zona potencial para la construcción de uno de los apoyos de la línea proyectada.

El número medio de personas que viajan por vehículo en todos los tramos de carretera es de 1,72 ocupantes, según los datos estadísticos referidos a España [45]. Con objeto de asignar la misma importancia a ambos tipos de observadores (*in situ* y en carretera) a los factores de ponderación  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  se les ha dado el valor 1, según se expuso en la expresión (3.15).

La Figura 4.7 muestra el *GPOHM* obtenido tras aplicar la metodología descrita en el apartado 3.2, donde se puede identificar que la aportación de los observadores *in situ* es mayor que la contribución de los observadores que se desplazan por carretera (colores oscuros corresponden a valores más altos de *GPOH* en las zonas que rodean los centros urbanos de Arnedo y Calahorra, con mayor número de habitantes). Por el contrario, los colores claros representan las zonas con bajos valores de *GPOH*. Algunas de estas zonas también se encuentran próximas a núcleos urbanos, pero mantienen sus valores bajos de *GPOH* ya que no pueden ser vistas debido a los obstáculos orográficos, como ocurre en las proximidades de estos dos centros urbanos. En el caso particular de la zona sur de Calahorra, ésta no puede ser vista por sus habitantes por encontrarse en una meseta con una altura mayor que la del centro de la ciudad.

Posteriormente se determinaron los mapas de rutas de menor coste, *LCP*, desde el origen de la línea aérea planificada (próximo a Tudelilla) al destino (cerca de la localidad de Aldeanueva), como se ha descrito en el apartado 3.2.2. A continuación, se obtuvo el mapa de selección de corredores, *CSM*, según se mostró en la expresión (3.17). La Figura 4.8 muestra el mapa *CSM*, en el que cada celda representa las horas mínimas de observación acumuladas para una nueva HVOPL de 66 kV, que pasa por dicha celda y que une los puntos origen y destino. El trazado óptimo de la nueva HVOPL estará formado por el conjunto de celdas (entre origen y destino) que tengan el valor mínimo del tiempo de observación ( $h_{min} = 38.921$  horas). En el mapa *CSM* estas celdas se han representado en color azul. El valor que contiene cada celda del resto del mapa es mayor que  $h_{min}$  y su diferencia respecto a  $h_{min}$  indica la “distancia”, en términos de visibilidad, entre la trayectoria óptima que pasa por esa celda y la trayectoria óptima representada en el mapa *CSM*, con un valor de celda igual a  $h_{min}$ .

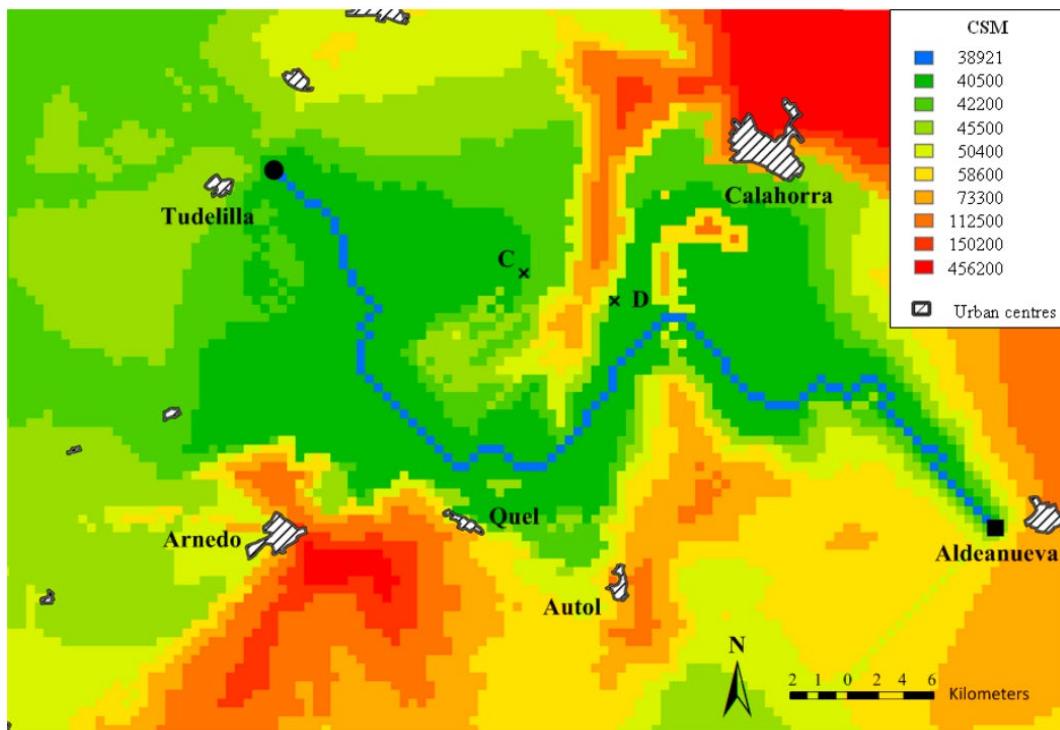


Figura 4.8. Mapa CSM donde puede verse la trayectoria óptima y corredores visuales para una nueva HVOPL de 66 kV entre los puntos origen y destino indicados.

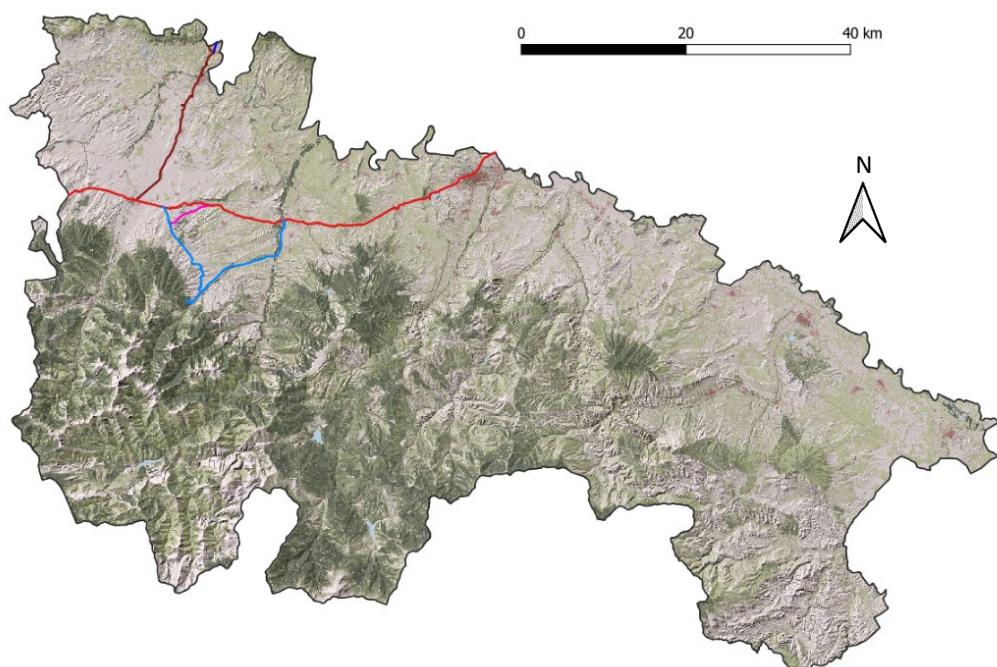
Como ejemplo ilustrativo en el mapa CSM se han definido varios valores de umbral ( $h_{max} = 40.500, 42.200, 45.500, 50.400, 58.600, 73.300, 112.500, 150.200$  y  $456.200$  horas) con objeto de obtener diferentes corredores visuales. Dentro de cada corredor es posible seleccionar rutas diferentes con un valor de horas acumuladas de observación inferior al valor de  $h_{max}$ , que define los límites de dicho corredor. Los corredores visuales pueden ayudar a identificar las zonas en las que es preferible transformar la línea aérea en una línea subterránea según el criterio de observabilidad. Por ejemplo, si la sección de la línea aérea planificada entre los puntos C y D (señalados con cruces en el mapa de la Figura 4.8) se construye como línea subterránea, cruzando las celdas con altos valores de GPOH, pero con nula visibilidad al estar enterrada, podrían conseguirse valores de observabilidad para toda la línea por debajo de  $40.500$  horas con una longitud total considerablemente menor que la de la línea aérea óptima de acuerdo a la observabilidad.

El criterio de observabilidad utilizado en la metodología propuesta permite obtener soluciones adecuadas para la selección automática del trazado de líneas aéreas de alta tensión bajo un criterio objetivo y, por tanto, susceptibles de una menor oposición social a su construcción.

#### **4.3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA VISIBILIDAD DE NUEVAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS EN ÁREAS CON ESPECIAL VALOR PAISAJÍSTICO**

---

La metodología descrita en el apartado 3.3 ha sido implementada en un GIS con objeto de identificar aquellas áreas situadas en zonas geográficas de especial interés cultural y paisajístico, donde la instalación de una nueva planta fotovoltaica no suponga una alteración visual de la escena. La metodología propuesta se ha aplicado a la Comunidad Autónoma de La Rioja. Concretamente, la zona de estudio seleccionada corresponde al área atravesada por el Camino de Santiago, como muestra la Figura 4.9.



*Figura 4.9. Camino de Santiago a su paso por la Comunidad Autónoma de La Rioja.*

El Camino de Santiago es una ruta de peregrinación mundialmente conocida que recorre el norte de España, desde la cordillera occidental de los Pirineos hasta la ciudad de Santiago de Compostela (Galicia). En 1993 fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, formando parte del legado cultural de Europa, uno de los más variados del mundo [46].

En esta Comunidad, el Camino de Santiago no tiene un único recorrido, sino que cuenta con distintas variantes o ramales que discurren por diferentes poblaciones y lugares de gran riqueza cultural, donde es posible visitar santuarios, templos y otros monumentos que forman parte del patrimonio cultural de la región. La ruta principal que atraviesa La Rioja se estableció a principios del siglo XI. Además del interés histórico y cultural del Camino de Santiago, las diferentes rutas de La Rioja atraviesan viñedos, que constituyen un entorno de especial belleza paisajística. Las diferentes rutas del Camino que discurren por esta Comunidad Autónoma se indican con más detalle en la Figura 4.10, y éstas son: ruta principal, ruta de San Millán, ruta de Cirueña, ruta de Haro, y ruta de Briñas.

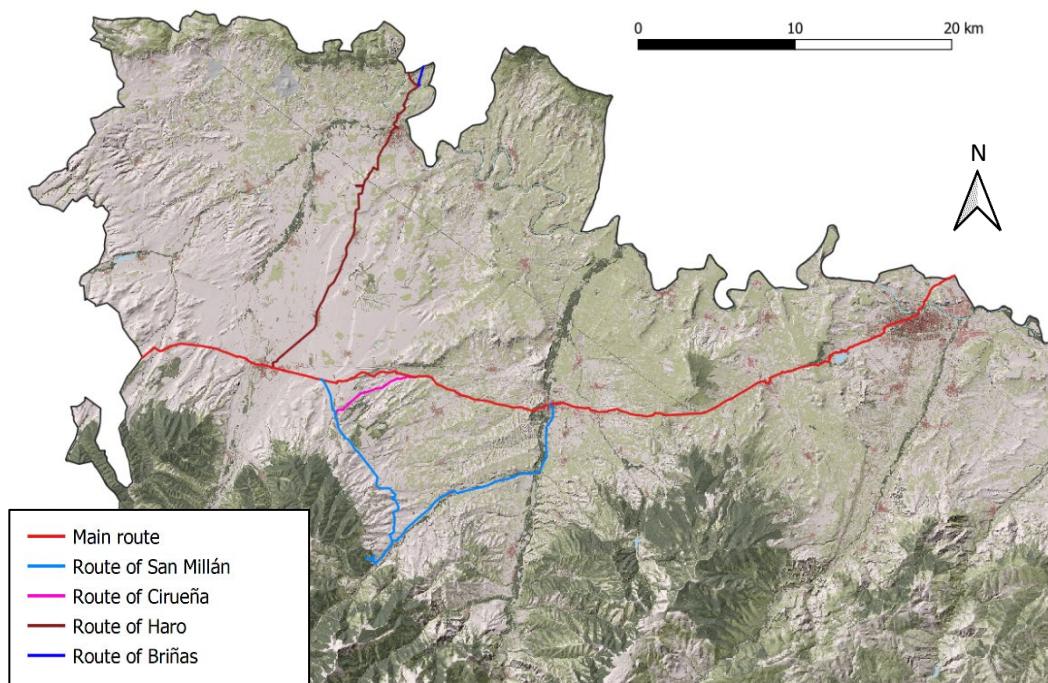


Figura 4.10. Las cinco rutas del Camino de Santiago que atraviesan por La Rioja.

Los posibles observadores potenciales que se han tenido en cuenta corresponden a los peregrinos que recorren a pie cada una de las cinco rutas. Los habitantes de los núcleos urbanos de la zona no han sido incluidos en este estudio. Los datos relativos a las peregrinaciones se han tomado de los informes estadísticos periódicos publicados por la Oficina del Peregrino en la ciudad de Santiago de Compostela. En este caso práctico se utilizaron datos referidos a las peregrinaciones de 2019 [47]. En ese año (anterior a la pandemia de COVID-19) unos 190.000 peregrinos recorrieron las citadas rutas del Camino de Santiago.

En el estudio, para la construcción de nuevas plantas FV, se seleccionó un sistema fotovoltaico compuesto de seguidores de dos ejes. Cada seguidor puede soportar hasta 10 kWp de potencia, dependiendo del tipo de módulo instalado. La altura del seguidor no se mantiene constante a lo largo del día, su valor varía en función del ángulo de elevación del sol (ángulo entre los rayos solares y el plano horizontal). La altura máxima  $H_{pv}$  que puede alcanzar esta instalación es de 6 metros sobre el suelo, principalmente en las primeras y últimas horas del día. Esta altura fue seleccionada porque es el valor más desfavorable, desde el criterio de visibilidad. La superficie ocupada por un solo seguidor es de aproximadamente 625 m<sup>2</sup>, incluyendo el terreno correspondiente a las zonas de tránsito.

En el sistema GIS los principales datos de entrada fueron los modelos MDS y MDT de la zona estudiada. Según los datos del Instituto Geográfico Nacional de España [48], el MDS se obtuvo a partir de los vuelos realizados durante el verano de 2016. Estos datos geográficos están compuestos por un conjunto de celdas cuadradas con un tamaño inicial de 2,5 x 2,5 metros. Utilizando técnicas de muestreo, el MDS original se convirtió a un MDS con un tamaño de celda de 25 x 25 metros. Se utilizó la interpolación del “vecino más cercano” como método de muestreo, que es uno de los métodos de interpolación más rápidos. Con este método, cada celda o píxel de los datos ráster muestreados, adquiere el mismo valor que su vecino más cercano en el ráster original. Originalmente, el MDT tenía un tamaño de celda de 25 x 25 metros, por lo que no fue necesario aplicar técnicas de muestreo para su utilización. El tamaño final de la celda se eligió en función del tamaño que ocupa un seguidor solar de dos ejes de las características mencionadas.

Es decir, cada seguidor solar ocupaba el área geográfica representada por una sola celda en el GIS.

Para la evaluación del Tiempo de Percepción Global Acumulado (*GAPT*) en la zona seleccionada, se siguieron los pasos indicados en el apartado 3.3.2:

1. Mediante una herramienta GIS se generaron nodos equidistantes a lo largo de cada ruta del Camino de Santiago. La distancia elegida entre nodos fue de 25 metros ( $d_n = 25$  m). Los nodos correspondientes a cada una de las cinco rutas se almacenaron en diferentes capas de datos vectoriales, en cuyas tablas de atributos, cada nodo llevaba asociado los datos relativos a la altura media de los ojos del observador sobre el suelo (se ha tomado 1,61 m) y la altura máxima sobre el suelo  $H_{pv}$  de la instalación FV, cuyo valor es de 6 m.
2. Se utilizaron herramientas GIS para obtener el valor de la velocidad de marcha del peregrino  $ws_n$  asociado a cada nodo  $n$ . Este valor fue obtenido aplicando la expresión (3.19). El valor de la velocidad de marcha fue calculado para todos los nodos de las cinco rutas que integran el Camino en el área estudiada.
3. Se calculó el tiempo medio de observación  $t_n$  para cada nodo  $n$ , dividiendo la distancia real que separa nodos consecutivos  $D_n$ , entre la velocidad de marcha del observador,  $ws_n$  en ese nodo.
4. Con una herramienta GIS específica, se generó un mapa ráster de distancia euclídea entre la celda  $i$  y el nodo  $n$ , lo cual, tras aplicar la expresión (3.10), permitió generar un nuevo conjunto de datos ráster donde cada celda contenía el factor de ponderación  $w_{i,n}$ .
5. Posteriormente se realizaron varios análisis de visibilidad repetitivos para calcular el factor de altura visible,  $fhv_{i,n}$ , de la nueva planta FV en la celda  $i$ , siguiendo la metodología descrita en el apartado 3.3.2. En este caso de estudio, la longitud de cada segmento fue de 1 m ( $h_{seg} = 1$ m),

así que la altura máxima  $H_{pv}$  del seguidor FV se dividió en 6 segmentos. Tras los análisis de visibilidad se obtuvo un conjunto de 6 mapas ráster binarios. Posteriormente mediante álgebra de mapas se aplicó la expresión (3.20), obteniendo un mapa ráster de los valores de  $f_{hv_{i,n}}$  (fracción, en términos de altura, de la instalación FV situada en la celda  $i$ , que puede ser vista desde el nodo  $n$ ).

6. Se calculó el índice *skyline*,  $Isk_{i,n}$ , mediante la expresión (3.21). Para cada nodo  $n$  se obtuvieron dos mapas ráster que almacenaban los valores de  $\theta h_{i,n}$  y  $\theta f_{i,n}$ , respectivamente, en la celda  $i$ . Con técnicas de álgebra de mapas se obtuvo el índice  $Isk_{i,n}$ , haciendo posible dar más peso a la visibilidad de plantas FV que asoman por encima de la línea del horizonte.

A continuación, considerando el número anual de peregrinos que recorren a pie todos los nodos de cada una de las 5 rutas,  $NOY_k$ , se aplicó la expresión (3.23), obteniendo un nuevo ráster en el que cada celda  $i$  representaba el valor de  $APT_{i,k}$  de la planta FV situada en esa celda. El volumen de datos en formato ráster obtenidos durante el proceso de cálculo fue elevado, por lo que se decidió utilizar funciones programadas en R [40] para acelerar el proceso y automatizar el acceso a los geo-algoritmos integrados en el software GIS utilizado, QGIS, desde fuera del propio QGIS [49]. Finalmente se obtuvo el valor del tiempo de percepción medio global,  $GAPT_i$ , aplicando la expresión (3.24).

En la Figura 4.11 se muestra el mapa *GAPT* obtenido de la zona estudiada. Los centros urbanos están representados por polígonos amarillos y las rutas que forman parte del Camino de Santiago se han representado con líneas de color rojo. Las celdas con valor de *GAPT* nulo son de color azul oscuro, pero se han hecho transparentes (mostrando las celdas grises y verdes correspondientes al MDS) para una mejor interpretación del mapa. Las áreas con *GAPT* nulo corresponden a los lugares donde la planta FV no es visible desde ninguna de las rutas, o bien, a lugares que están a una distancia mayor que el límite de visión establecido (10 km en el caso estudiado). Estas zonas serán los mejores lugares para la localización de este

tipo de instalaciones, desde el punto de vista de su baja observabilidad desde las rutas del Camino de Santiago.

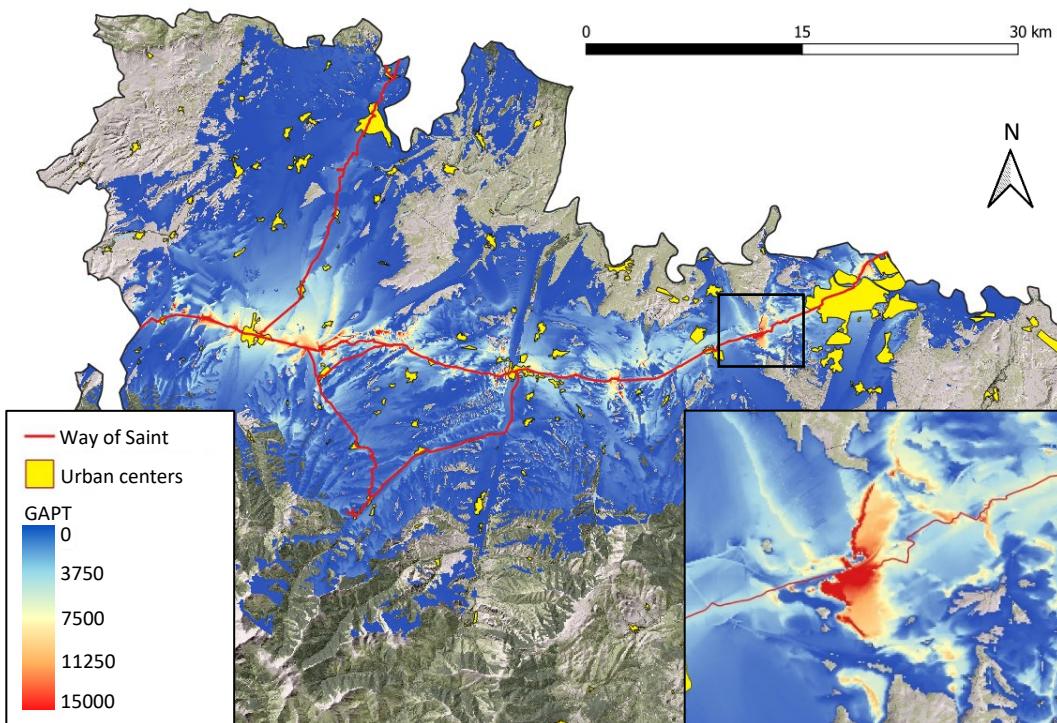


Figura 4.11. Mapa de la variable *GAPT*, en horas/año, de la zona estudiada.

Las celdas azules representan los valores más bajos, distintos de cero, de *GAPT*, mientras que las celdas rojas representan las zonas con valores más altos. Estas últimas, corresponden a zonas que deben evitarse para la construcción de nuevas instalaciones FV. Puede observarse que las celdas con altos valores de *GAPT* se encuentran relativamente próximas a la ruta principal. La razón primordial es que esta ruta es la más transitada por los peregrinos que van hasta Santiago de Compostela. La esquina inferior derecha de la Figura 4.11 muestra una ampliación de la zona marcada con un rectángulo negro. Es una zona con montañas suaves y poca vegetación, próxima a la ruta principal y, como puede observarse, existe un mayor número de celdas con valores elevados de *GAPT*. Esto se debe principalmente al hecho de que una parte importante de las instalaciones cruzan la

Línea del horizonte, teniendo el cielo como fondo y, el tiempo de percepción de una planta FV, como la propuesta, será mayor.

Los resultados proporcionan mapas de observabilidad precisos con los que es sencillo identificar aquellos lugares en los que la instalación de una futura planta FV tendrá un menor impacto visual para los peregrinos que recorren el Camino de Santiago. El objetivo principal es preservar las zonas que rodean y que se ven desde el Camino para que conserven su legado cultural y paisajístico, evitando la intrusión visual de este tipo de instalaciones.

En el caso de estudio que se ha presentado cada seguidor ocupa una única celda de 25 x 25 m del mapa ráster. Por lo general, las plantas fotovoltaicas proyectadas serán más grandes y necesitarán más celdas para cubrir la superficie de la instalación. Para solucionar este problema bastaría con buscar celdas contiguas en áreas con valores más bajos de *GAPT*.

---

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

---

En los trabajos de investigación que integran la presente tesis doctoral se han presentado diferentes metodologías de ayuda a la identificación y selección, de forma objetiva, de aquellas áreas geográficas donde la construcción de nuevas plantas fotovoltaicas e instalaciones asociadas (líneas eléctricas aéreas de alta tensión) causan una menor alteración del paisaje, consiguiendo que el impacto visual sea mínimo y respetando ciertos criterios de observabilidad.

Las metodologías presentadas están basadas en sistemas de información geográfica (GIS). Los sistemas GIS permiten utilizar diversas estructuras de datos georreferenciados y aprovechar las características geográficas (orografía) de una zona para evaluar la visibilidad de las infraestructuras eléctricas ya citadas. La posibilidad de poder manejar varias capas de datos geográficos permite realizar grandes volúmenes de cálculos espaciales en extensas zonas geográficas. Los resultados alcanzados, en forma de mapas, facilitan enormemente la interpretación visual de los datos obtenidos, pudiendo resolver problemas complejos en la toma de decisiones en la planificación de futuras infraestructuras eléctricas, donde pueden intervenir grupos de negociación con diferentes intereses. Un GIS hace posible encontrar soluciones satisfactorias para esos grupos.

Se ha presentado en primer lugar, una metodología para clasificar los lugares más adecuados, desde el punto de vista de la observabilidad, para la instalación de futuras plantas fotovoltaicas de tamaño medio. Esta metodología, basada en GIS, permite la presentación de los resultados en forma de mapas, facilitando la interpretación visual de los datos. Como posibles observadores se han

considerado tanto los habitantes de los núcleos urbanos de la zona estudiada, como los viajeros que se desplazan por las carreteras que la atraviesan. El efecto visual sobre los observadores se evalúa mediante una nueva variable denominada Horas Potenciales de Observación (*POH*). Esta variable depende del número de observadores estáticos (*in situ*), y en movimiento por carretera. *POH* depende también de la distancia de los puntos de observación a la planta FV, con una función que depende de su tamaño. El valor de *POH* corresponde al valor acumulado de las horas máximas de observación de todos los posibles observadores en un día medio. *POH* puede representarse gráficamente, para todas las áreas geográficas o celdas en una zona, como un conjunto de mapas que ayudan a identificar las celdas en las que la futura planta FV tendrá mayor o menor observabilidad. Dado que la observabilidad está relacionada con el impacto visual causado por la nueva planta FV, la metodología que se propone puede contribuir a acelerar su construcción como resultado de la rápida identificación de los lugares con menor impacto visual o con menor observabilidad. Bajo este criterio, el promotor de una planta FV puede identificar fácilmente los lugares óptimos, donde construir la futura planta, lo que se traduce en menor tiempo para la obtención de los permisos de las autoridades pertinentes. Además, la metodología tiene la gran ventaja de que puede ser adaptada a cualquier tipo de central eléctrica si se conocen los datos referentes a superficie ocupada, altura de la instalación, MDT de la zona, número y distribución de posibles observadores.

La metodología presentada en segundo lugar permite la selección del trazado o la ruta que debe seguir una nueva línea eléctrica aérea de alta tensión (HVOPL), logrando la definición de corredores visuales de forma objetiva. Los corredores visuales consisten en zonas geográficas que conectan el punto origen con el punto destino de la futura HVOPL. Los corredores representan áreas en las que es posible colocar todos los apoyos, que forman parte de la línea eléctrica, manteniendo el grado de observabilidad de la línea por debajo de un umbral límite definido. Aunque con otros factores de ponderación en función de la distancia (entre observador y HVOPL), la variable utilizada para evaluar la observabilidad de la línea eléctrica ha sido nuevamente *POH*, que representa el número de horas acumuladas, en un día medio, durante las cuales cualquier apoyo de la HVOPL

puede ser visto por todos los posibles observadores. En esta metodología también se han considerado dos tipos de observadores, observadores estáticos o *in situ* (habitantes de núcleos urbanos) y observadores en movimiento (viajeros por carretera). La solución adoptada para los observadores en carretera consiste en descomponer la carretera en segmentos y determinar el tiempo total durante el cual, cualquiera de los apoyos de la nueva HVOPL puede ser visto durante el recorrido realizado por dichos observadores. En el caso estudiado se han considerado todos los observadores posibles y a ambos tipos de observador (*in situ* y en carretera) se les ha dado el mismo valor para los factores de ponderación. La metodología permite asignar diferentes factores para cada tipo de observador, por ejemplo, utilizando factores de ponderación con valores más altos para los turistas (su grado de afección respecto del paisaje será mayor) y más bajos para los residentes de la zona.

La utilización de la metodología ofrece resultados objetivos en forma de mapas que permiten identificar fácilmente diferentes alternativas del trazado con mayor o menor observabilidad de los apoyos de la nueva línea eléctrica. Estos mapas sirven de gran ayuda en la negociación de los diferentes agentes implicados en la construcción de la futura HVOPL y contribuir así a reducir el rechazo y acelerar su construcción.

Finalmente se ha presentado una metodología mejorada para evaluar la observabilidad de futuras plantas FV en zonas con un especial valor paisajístico y/o cultural, donde el rechazo que pueden sufrir este tipo de instalaciones por su alteración visual de la escena puede ser importante. Como posibles observadores se han considerado los caminantes o senderistas que se desplazan por los caminos que atraviesan la zona estudiada. La percepción que los observadores tienen de este tipo de instalaciones es evaluada mediante una nueva variable denominada Tiempo de Percepción Acumulado (*APT*). Esta variable representa el valor acumulado de las posibles horas al año en las que la nueva instalación fotovoltaica puede ser vista por todos los observadores potenciales que recorren todos los puntos de observación de una determinada ruta.

Para realizar una evaluación más precisa de la percepción visual que los observadores pueden tener de este tipo de instalaciones, se han incluido dos nuevos componentes para el cálculo de  $APT$ : el factor  $fhv_{i,n}$ , que considera exclusivamente la parte visible, desde el punto de observación  $n$ , de la instalación FV situada en la celda  $i$ , y el índice *skyline*,  $Isk_{i,n}$ , que tiene en cuenta la parte de la instalación que puede ser vista sobre la línea del horizonte, desde ese nodo  $n$ . Esto permite dar mayor grado de visibilidad a aquellas instalaciones que se ven total o parcialmente por encima del horizonte.

Una vez calculados los valores de  $APT_{i,k}$  de cada ruta  $k$ , se evalúa la variable  $GAPT_i$ . Esta variable representa el valor global acumulado del número de horas al año durante las cuales, la futura planta FV situada en la zona geográfica representada por la celda  $i$ , puede ser vista por todos los observadores que se desplazan a lo largo de todas las rutas  $k$  de la zona estudiada. Es posible generar mapas que representan gráficamente el valor de la variable  $GAPT$ . Con estos mapas, los agentes involucrados en la construcción de plantas FV pueden identificar fácilmente aquellos lugares con valores de  $GAPT$  más bajos y, por tanto, más adecuados para la instalación de este tipo de plantas basándose objetivamente en su tiempo de observación.

Como caso de estudio, esta metodología se ha aplicado a una de las rutas de peregrinación más famosas. Concretamente el área de estudio corresponde a la zona que es atravesada por el Camino de Santiago a su paso por la Comunidad Autónoma de La Rioja. Los observadores que se han considerado corresponden a los peregrinos que recorren todas las rutas del Camino en esta Comunidad. El resultado obtenido es un mapa ráster que representa el valor de la variable  $GAPT$ , donde es posible identificar aquellas áreas geográficas con valores más bajos y, por tanto, más adecuadas para la instalación de la planta FV en base a su bajo tiempo de percepción, manteniendo inalterable el paisaje observado desde el Camino.

La metodología descrita es fácilmente aplicable a otras rutas, a observadores con diferentes características, a instalaciones FV con otras dimensiones, etc. En estos casos sólo es necesario introducir los valores adecuados de los factores que

intervienen en el cálculo de *GAPT*. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados por los responsables en la toma de decisiones (inversores, autoridades locales) para la construcción de nuevas plantas fotovoltaicas en zonas con especial valor cultural o paisajístico. La metodología también puede ser aplicada a otros tipos de instalaciones como, aerogeneradores, apoyos de líneas eléctricas, antenas de telecomunicaciones, edificios, etc., considerando los valores apropiados para el tamaño de celda y la altura máxima de la instalación proyectada.

En resumen, las nuevas metodologías basadas en sistemas GIS, presentadas en este trabajo, son de gran interés en procesos avanzados de planificación de futuras plantas fotovoltaicas y otras instalaciones asociadas como líneas eléctricas aéreas, obteniendo unos resultados de fácil y rápida interpretación, de gran ayuda a los diversos grupos que intervienen en tales procesos de decisión. Estas metodologías se han enfocado en un aspecto medioambiental como es el impacto visual, identificando aquellas áreas geográficas más adecuadas para la futura instalación de estas infraestructuras, donde la afectación del paisaje fuera mínima desde los lugares de observación más frecuentados. No obstante, la gran ventaja de los sistemas GIS es que es posible diseñar nuevos modelos o metodologías que incorporen nuevos objetivos, económicos, usos del suelo, etc., introduciendo los sistemas multiobjetivo en los procesos de decisión.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] G. Bachner, K. W. Steininger, K. Williges, and A. Tuerk, “The economy-wide effects of large-scale renewable electricity expansion in Europe: The role of integration costs”, *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 1369–1380, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.052.
- [2] H. Z. Al Garni and A. Awasthi, “Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia”, *Applied Energy*, vol. 206, no. September, pp. 1225–1240, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.024.
- [3] J. Arán Carrión, A. Espín Estrella, F. Aznar Dols, M. Zamorano Toro, M. Rodríguez, and A. Ramos Ridao, “Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 9, pp. 2358–2380, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.06.011.
- [4] Parlamento Europeo, “Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de marzo de 2007 por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea (Inspire)”, *D. Of. la Unión Eur.*, pp. 1–14, 2007.
- [5] L. Polidori and M. El Hage, “Digital elevation model quality assessment methods: A critical review”, *Remote Sens.*, vol. 12, no. 21, pp. 1–36, 2020, doi: 10.3390/rs12213522.
- [6] D. Moser, D. Vettorato, R. Vaccaro, M. Del Buono, and W. Sparber, “The PV potential of south Tyrol: An intelligent use of space”, *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1392–1400, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.130.
- [7] U. Munkhbat and Y. Choi, “Gis-based site suitability analysis for solar power systems in Mongolia”, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/app11093748.
- [8] F. Ribeiro, P. Ferreira, and M. Araújo, “The inclusion of social aspects in power planning”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4361–4369, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.114>.

- [9] R. Ioannidis and D. Koutsoyannis, “A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact”, *Appl. Energy*, vol. 276, no. August, p. 115367, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115367.
- [10] A. del C. Torres Sibille, V. A. Cloquell-Ballester, V. A. Cloquell-Ballester, and R. Darton, “Development and validation of a multicriteria indicator for the assessment of objective aesthetic impact of wind farms”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 1, pp. 40–66, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.05.002.
- [11] M. Rodrigues, C. Montañés, and N. Fueyo, “A method for the assessment of the visual impact caused by the large-scale deployment of renewable-energy facilities”, *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 30, no. 4, pp. 240–246, 2010, doi: 10.1016/j.eiar.2009.10.004.
- [12] C. Manchado, V. Gomez-Jauregui, P. E. Lizcano, A. Iglesias, A. Galvez, and C. Otero, “Wind farm repowering guided by visual impact criteria”, *Renew. Energy*, vol. 135, pp. 197–207, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.12.007.
- [13] I. D. Bishop, “The implications for visual simulation and analysis of temporal variation in the visibility of wind turbines”, *Landsc. Urban Plan.*, vol. 184, no. November 2018, pp. 59–68, 2019, doi: 10.1016/j.landurbplan.2018.12.004.
- [14] R. Wrózyński, M. Sojka, and K. Pyszny, “The application of GIS and 3D graphic software to visual impact assessment of wind turbines”, *Renew. Energy*, vol. 96, pp. 625–635, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.05.016.
- [15] R. G. Sullivan, L. B. Kirchler, C. McCoy, J. McCarty, K. Beckman, and P. Richmond, “Visual Impacts of Utility-scale Solar Energy Facilities on Southwestern Desert Landscapes”, *Argonne National Laboratory Report*. [Online]. Disponible: [https://blmwyomingvisual.anl.gov/docs/Solar\\_Visual\\_Impacts.pdf](https://blmwyomingvisual.anl.gov/docs/Solar_Visual_Impacts.pdf). [Consulta: 29-Jun-2021].
- [16] R. Chiabrando, E. Fabrizio, and G. Garnero, “The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: Definition of impacts and assessment of the glare risk”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.06.008.
- [17] D. E. Ogburn, “Assessing the level of visibility of cultural objects in past landscapes”, *J. Archaeol. Sci.*, vol. 33, no. 3, pp. 405–413, 2006, doi: 10.1016/j.jas.2005.08.005.
- [18] A. d C. Torres-Sibille, V. A. Cloquell-Ballester, V. A. Cloquell-Ballester, and M. A. Artacho Ramírez, “Aesthetic impact assessment of solar power plants: An objective and a subjective approach”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 5, pp. 986–999, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.03.012.
- [19] E. García-Garrido, P. Lara-Santillán, E. Zorzano-Alba, M. Mendoza-Villena, P. Zorzano-Santamaría, L.A. Fernández-Jiménez, A. Falces, “Visual impact assessment for small and medium size PV plants”, in

Proceedings of the 12<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Prague, Czech Republic, 24-26 September 2012, pp. 57–61.

- [20] P. Florio, M. C. Munari Probst, A. Schüler, C. Roecker, and J. L. Scartezzini, “Assessing visibility in multi-scale urban planning: A contribution to a method enhancing social acceptability of solar energy in cities”, *Sol. Energy*, vol. 173, no. July, pp. 97–109, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.059.
- [21] Ø. Aas, P. Devine-Wright, T. Tangeland, S. Batel, and A. Ruud, “Public beliefs about high-voltage powerlines in Norway, Sweden and the United Kingdom: A comparative survey”, *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 2, pp. 30–37, 2014, doi: 10.1016/J.ERSS.2014.04.012.
- [22] H. Thomas, A. Marian, A. Chervyakov, S. Stückrad, D. Salmieri, and C. Rubbia, “Superconducting transmission lines – Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance?”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 59–72, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.041>.
- [23] S. Harrison, “Visual Disamenity in the Queensland Wet Tropics: Estimating the Economic Impacts of Overhead Transmission Lines11This report arises out of a consultancy carried out through UniQuest at The University of Queensland for the Queensland Electricity Transmissi”, *Econ. Anal. Policy*, vol. 32, no. 2, pp. 173–188, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0313-5926\(02\)50024-2](https://doi.org/10.1016/S0313-5926(02)50024-2).
- [24] S. Navrud, R. C. Ready, K. Magnussen, and O. Bergland, “Valuing the social benefits of avoiding landscape degradation from overhead power transmission lines: Do underground cables pass the benefit–cost test?”, *Landsc. Res.*, vol. 33, no. 3, pp. 281–296, Jun. 2008, doi: 10.1080/01426390802045921.
- [25] T. Tempesta, D. Vecchiato, and P. Girardi, “The landscape benefits of the burial of high voltage power lines: A study in rural areas of Italy”, *Landsc. Urban Plan.*, vol. 126, pp. 53–64, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.03.003>.
- [26] L. Furby, P. Slovic, B. Fischhoff, and R. Gregory, “Public perceptions of electric power transmission lines”, *J. Environ. Psychol.*, vol. 8, no. 1, pp. 19–43, 1988, doi: [https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(88\)80021-5](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(88)80021-5).
- [27] L. L. Warner and R. D. Diab, “Use of geographic information systems in an environmental impact assessment of an overhead power line”, *Impact Assess. Proj. Apprais.*, vol. 20, no. 1, pp. 39–47, Mar. 2002, doi: 10.3152/147154602781766807.
- [28] Electric Power Research Institute and Georgia Transmission Corporation, “EPRI-GTC Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology”. [Online]. Disponible: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001013080&Mode=download>. [Consulta: 5 October 2017].

- [29] S. Grassi, R. Friedli, M. Grangier, and R. Martin, “A GIS-Based Process for Calculating Visibility Impact from Buildings During Transmission Line Routing”, in *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 2014, pp. 383–402.
- [30] J. Serra, C. Llinares, S. Iñarra, A. Torres, and J. Llopis, “Improvement of the integration of visually impacting architectures in historical urban scene, an application of semantic differential method”, *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 81, no. July 2019, p. 106353, 2020, doi: 10.1016/j.eiar.2019.106353.
- [31] G. B. Jerpåsen and K. C. Larsen, “Visual impact of wind farms on cultural heritage: A Norwegian case study”, *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 31, no. 3, pp. 206–215, 2011, doi: 10.1016/j.eiar.2010.12.005.
- [32] “CETS 199 - Council of Europe Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society”, 2005. [Online]. Disponible: <https://rm.coe.int/1680083746>. [Consulta: 06-Sep-2021].
- [33] N. Waters, "A Review of “Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications”, *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 102, no. 1, pp. 251-253, January 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.114>.
- [34] F. J. Doyle, “Digital Terrain Models: An Overview\* The definition, origin, acquisition, preprocessing, storage and management, applications, and future directions of DTM data are discussed”, *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 44, no. 12, pp. 1481–1485, 1978.
- [35] H. R. Schiffman, *Sensation and perception: An integrated approach*, 3rd ed. Oxford, England: John Wiley & Sons, 1990.
- [36] P. F. Fisher, “Probable and fuzzy models of the viewshed operation,” in *Innovations in GIS*, CRC Press: Boca Ratón, FL, USA 1994, pp. 161–175.
- [37] T. Higuchi, “The visual and spatial structure of landscapes”, *Landsc. J.*, vol. 4, no. 1, 1985, doi: 10.3368/lj.4.1.48a.
- [38] J. Weigel, “Kompensationsflächenberechnung für Freileitungen”, *Freileitungen Magazine*, 2007. [Online]. Disponible: <https://www.yumpu.com/de/document/read/6771445/kompensationsflachen-berechnung-fur-freileitungen>. [Consulta: 31-Aug-2021].
- [39] J. van Etten, “R package gdistance: Distances and routes on geographical grids”, *J. Stat. Softw.*, vol. 76, no. 1, 2017, doi: 10.18637/jss.v076.i13.
- [40] R Core Team (2021), “R: A Language and Environment for Statistical Computing”, *R Foundation for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, p. <https://www.R-project.org>, 2021.
- [41] A. París Roche, “Método para la Información De Excursiones. Manual de procedimientos”, 2002. [Online]. Disponible: <https://www.montanasegura.com/MIDE/manualMIDE.pdf>. [Consulta: 3-Oct-2021].
- [42] J. Márquez-Pérez, I. Vallejo-Villalta, and J. I. Álvarez-Francoso, “Estimated

- travel time for walking trails in natural areas”, *Geografisk Tidsskrift - Danish Journal of Geography*, vol. 117, no. 1, pp. 53–62, 2017, doi: 10.1080/00167223.2017.1316212.
- [43] F. Fontani, “Application of the Fisher’s ‘Horizon Viewshed’ to a proposed power transmission line in Nozzano (Italy)”, *Trans. GIS*, vol. 21, no. 4, pp. 835–843, 2017, doi: 10.1111/tgis.12260.
- [44] J. Caha and A. Rášová, “Line-of-sight derived indices: Viewing angle difference to a local horizon and the difference of viewing angle and the slope of line of sight”, *Lect. Notes Geoinf. Cartogr.*, vol. 211, pp. 61–72, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-18407-4\_6.
- [45] European Energy Agency, “Car Occupancy rates”. [Online]. Disponible: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/term29-occupancy-rates-in-passenger-transport-1>. [Consulta: 05-Oct-2017].
- [46] European Commission Directorate-General for Research and Innovation, *Preserving our heritage, improving our environment. Volume I, 20 Years of EU Research into Cultural Heritage*, M. Chapuis, Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2009. [Online]. Disponible: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/17146>. [Consulta: 3-Sept-2021].
- [47] “Informe Estadístico”, 2019. [Online]. Disponible: <http://oficinadelperegrino.com/wp-content/uploads/2016/02/peregrinaciones2019.pdf>. [Consulta: 24-Aug-2021].
- [48] “Instituto Geográfico Nacional”. [Online]. Disponible: <https://www.ign.es/web/ign/portal>. [Consulta: 04-Sep-2021].
- [49] R. Lovelace, J. Nowosad, and J. Muenchow, *Geocomputation with R*, Chapman and Hall/CRC: Boca Ratón, FL, USA, 2019.
- [50] L. A. Fernandez-Jimenez *et al.*, “Site selection for new PV power plants based on their observability”, *Renew. Energy*, vol. 78, pp. 7–15, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.12.063.

---

## APÉNDICE I

---

Site selection for new PV power plants based on their observability

---



## **REFERENCIA**

---

La referencia completa de esta publicación es:

L. Alfredo Fernández-Jiménez, Montserrat Mendoza-Villena, Pedro Zorzano-Santamaría, Eduardo García-Garrido, Pedro Lara-Santillán, Enrique Zorzano-Alba, Alberto Falces. Site selection for new PV power plants based on their observability. *Renewable Energy*, 78, pp 7-15, 2015. doi:10.1016/j.renene.2014.12.063.

## **RESUMEN**

---

En este apartado se presenta una nueva metodología para la clasificación de los lugares factibles, de una zona geográfica, para la construcción de nuevas centrales fotovoltaicas en función de su observabilidad. Esta metodología se basa en los métodos *fuzzy viewshed* y *decaimiento visual* motivado por la distancia del observador a la planta FV. Al estar integrada en un GIS permite la presentación de resultados visuales en forma de mapas que ayudan a identificar rápidamente las mejores áreas en las que la observabilidad de este tipo de instalaciones es menor. Estos mapas reproducen la variable denominada Horas Potenciales de Observación (*POH*) en cada zona geográfica. *POH* representa el valor acumulado del número máximo de horas, de un día medio, en las que la nueva planta fotovoltaica puede ser vista por cada posible observador. Esta variable está relacionada con los habitantes de los núcleos urbanos en la zona, el tamaño del objeto observado (planta FV), los posibles observadores en movimiento que recorren caminos y carreteras, y su distancia a la instalación FV.

Esta metodología ha sido implementada en un GIS y ensayada satisfactoriamente en dos zonas seleccionadas de La Rioja, concretamente las zonas correspondientes a los términos municipales de Aldeanueva de Ebro y de Arnedo. Los resultados obtenidos en forma de mapas, en formato ráster, contienen información de gran interés para los grupos involucrados en la toma de decisiones en la construcción de este tipo de plantas.



---

## APÉNDICE II

---

High voltage overhead power line routing under an  
objective observability criterion

---



Article

# High Voltage Overhead Power Line Routing under an Objective Observability Criterion

L. Alfredo Fernandez-Jimenez <sup>\*</sup>, Montserrat Mendoza-Villena, Eduardo Garcia-Garrido, Pedro M. Lara-Santillan, Pedro J. Zorzano-Santamaria, Enrique Zorzano-Alba and Alberto Falces

Department of Electrical Engineering, University of La Rioja, 26004 Logroño, Spain;  
montserrat.mendoza@unirioja.es (M.M.-V.); eduardo.garcia@unirioja.es (E.G.-G.);  
pedro.lara@unirioja.es (P.M.L.-S.); pedrojose.zorzano@unirioja.es (P.J.Z.-S.);  
enrique.zorzano@unirioja.es (E.Z.-A.); alberto.falces@unirioja.es (A.F.)

\* Correspondence: luisalfredo.fernandez@unirioja.es; Tel.: +34-941-299-473

Received: 7 September 2017; Accepted: 10 October 2017; Published: 12 October 2017

**Abstract:** The construction of new high voltage overhead power lines (HVOPLs) has become a controversial issue for electricity companies due to social opposition. Citizens are concerned about how these power lines may have an impact on their lives, basically caused by their effects on health and safety. Visual impact is one of the most easily perceived. Although there are several published works that deal with the assessment of the visual impact produced by HVOPLs, no methodology has been proposed to assess this impact from an objective perspective. This work presents an original methodology which helps to identify the optimal routes for a new HVOPL under an objective observability criterion, enabling the selection of those with the lowest visibility in a zone. The application of the proposed methodology achieves a set of routes that links new HVOPL origin and destination points creating a corridor which includes all possible routes with an observability of its towers under a threshold limit. This methodology is illustrated by a real-life use corresponding to the selection of the route with least observability for a new power line in La Rioja (Spain). The results obtained may help to achieve a consensus between key stakeholders since it is focused on the specific issues of the planned HVOPL and its observability from an objective perspective.

**Keywords:** overhead power lines; geographic information systems; technology social factors; power line routing; visual impact

---

## 1. Introduction

Electric energy is an essential component in present societies. An inexpensive and reliable electrical supply is a precondition for a competitive economy and, thus, an important basis for our technological society. In the design of new power infrastructures, it is important to consider the psychological aspects of how our culture considers and accepts its development as an integral component of the community's physical environment [1].

The construction of new high voltage overhead power lines (HVOPLs) in rural areas is the one of the most adopted solutions adopted to integrate medium and large size power plants based on renewable sources into the grids. Whereas this integration is widely accepted, the general acceptance of energy projects is higher than local acceptance [2].

The kind of impact that HVOPLs can have on population can be divided into environmental and visual. Environmental impact include life cycle impact, impact on vegetation and wildlife, and electromagnetic impact. Visual impact, which is related to visibility and aesthetic aspects, differs from one person to another, but it generally depends on the landscape, position and angle of the observer, as well as the contrast [3]. Visual impact itself constitutes one of the objections raised by communities who oppose the construction of new power lines [4]. In some works, visibility has been

used as an indicator of visual impact, but visibility and visual impact are not equivalent terms: visibility refers to the ability to discern an object from its surrounding landscape while visual impact takes into account the sociocultural attributes of the viewers resulting in the perception of visual aesthetic impact [5]. Anyway, visibility and proximity play a key role for visual impact assessments. For example, in some new HVOPL projects, the perceived health and safety effects have been considered to be more important than visual impact, but the visibility and proximity of the new HVOPL increase the sense of threat for health and safety [6].

The Landscape and Visual Impact Assessment (LVIA) technique is widely used to assess the effects of change on the landscape that can be caused by human intervention [7]. Recently, visual impacts produced by different power components have been further studied in literature, mainly those caused by power plants based on renewable energies such as wind farms [8–11], photovoltaic plants [9,10,12] and small hydro plants [9]. Even, for PV systems, objective and quantitative methods have been developed for evaluating the visual impact [13,14]. However, compared with other power infrastructures in the landscape, there has been relatively little research on the perceptions of power transmission lines [15].

The visual impact caused by new HVOPLs has been discussed by Harrison [16]. This author defines “visual disamenity cost” as a measure to assess the visual impact of an HVOPL and identifies the factors concerning tower design and location, which may affect the visual impact of these lines (tower height, tower location, colour, tower construction and extent of screening by vegetation). Some studies, such as [17], have found that the social benefits of avoiding the negative aesthetic impact on the landscape of HVOPLs in an urban setting exceed the costs of burying the line as underground cables. This is so even though in rural areas the larger costs for underground cables, with respect to those of HVOPLs, makes this strategy possible only in zones of relevant environmental interest [18]. Surveys and questionnaires have been widely used to assess the impacts, including the visual impact, on the population living in the zone where a new power line is being projected [15,18–20].

Visual impact is one of the causes that promotes local opposition to the construction of new HVOPLs. The erection of a new infrastructure perceived by population as imposed, especially if it changes the landscape, increases social opposition [21]. The construction of new projects can be blocked, or at least delayed, by the opposition of local population, causing enormous costs to the utilities [22], with discussions between local residents, network operators and other stakeholders usually taking place at an emotional level [23]. This opposition has caused network operators to opt for optimizing the existing network by renewing outdated HVOPLs rather than constructing new ones [24]. The selection of routes with the lowest visibility on a zone can contribute to reducing oppositions and accelerating the construction of new HVOPLs.

Geographic information systems (GISs), software technologies developed for spatial data analysis, are suitable tools for such selection. GISs allow the simultaneous evaluation of key technical, economic and environmental factors. GISs were identified as the ideal equipment to use quantitative methods in environmental assessment [25,26] and they have been used in visual impact assessment [27,28]. GISs handle data in digital models; raster data model is one of the most useful. Raster data model divides the geographic area into a grid of georeferenced cells. These cells can store the values of a variable of interest.

Warner [29] presents the use of a GIS in an environmental impact assessment of an HVOPL: the visual impact is included as one of the criteria, but considering only the visibility of the selected routes within a distance of 3 km from a mountain zone with scenic beauty and touristic interest. The Electric Power Research Institute and the Georgia Transmission Corporation (EPRI-GTC) developed the Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology [30] that deals with visual impact creating a “visual exposure map”, which is a grid-based map (raster map) where each cell value represents the number of times a location is seen from a set of viewer locations (mainly houses or roads). In the case of roads, each cell crossed by a road constitutes a viewer location for the visual exposure map. The values stored in this map do not take directly into account the number

of inhabitants (houses) or travellers (roads). The methodology can be used to compare alternative routes, but it does not provide the optimal route under visual impact criteria. Erdmann [23] proposes a transparent and objective method to assess the visibility of the towers of a HVOPL over predefined routes. Grassi [31] presents a new methodology followed to calculate suitable routes for new power lines. The methodology takes into account visual impacts caused by cables or masts as one of the six different criteria (topographic, terrain, linear infrastructures, danger areas, protected areas and visibility). Viewer locations are restricted to buildings. Corridors are identified in the global cost map (defined with the six criteria) as the areas covered by, at least, one of the optimal routes obtained by applying different weighting factors to each criterion.

This article presents a new methodology for objectively determining possible routes for a new HVOPL with a defined limit for the visibility or observability of its towers. This methodology is based on GIS and allows to obtain a map to identify visual corridors. This map is called the Corridor Selection Map (CSM). We define visual corridors as the areas in the CSM where the cumulative cost of the path from an origin cell to a destination cell and crossing any cell of the area lies below a certain threshold. The variable used as cost is the Global Potential Observation Hours (GPOH), which is defined in the methodology section. Visual corridors are areas that include the optimum and near optimum routes under the observability criterion; for each cell within a visual corridor a route can be traced crossing that cell and with a cumulative value for the GPOH variable under a defined limit.

The CSM with the visual corridors obtained through the application of the methodology proposed can be integrated with others obtained under other criteria (environmental, economic, etc.) and can help to achieve a consensus between key stakeholders since it is focused on the specific issues of the planned transmission line and its observability under an objective perspective.

The article is structured as follows: Section 2 presents the methodology proposed for the optimal route selection of a new HVOPL. Section 3 shows the application of this methodology to a real-life case considering a 66 kV HVOPL crossing a rural zone in La Rioja (Spain). Finally, Section 4 presents the conclusions.

## 2. Proposed Methodology

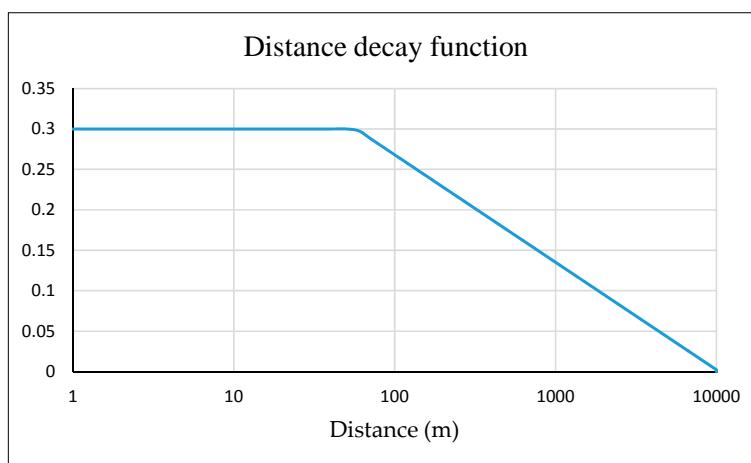
The methodology proposed creates a GIS map, the CSM, which helps to find possible paths in a zone for a new HVOPL under an objective observability criterion. The CSM is obtained from other two maps containing the Lowest Cost Paths (*LCPs*), as it is explained in Section 2.2. We define a *LCPs* map as a raster file which contains in each cell the minimum accumulated cost value following the optimal path from an origin, defined by the user, to that cell. The optimal path corresponds to the route with the minimum accumulated cost. The variable used as cost is the Global Potential Observation Hours (GPOH), which corresponds to the cumulative value of the number of hours in a mean day in which any tower of the new HVOPL can be viewed by all the possible observers. The GPOH depends on the orography of the zone where the new line is going to be built, the possible observers (inhabitants or travellers), and their position with respect to the towers of the new HVOPL. The evaluation of the GPOH variable for all raster cells allows obtaining the Global Potential Observation Hours Map (GPOHM) which represents a geographical zone where to identify the areas with higher or lower observability for the new HVOPL. The evaluation also enables to choose the route with the lowest observability and, therefore, with the lowest visual impact in the zone.

The variable GPOH corresponds to the sum of variable Potential Observations Hours (*POH*) for all the possible observer positions. We define the *POH* variable for a single observation point (village, farm, etc.) or for a single segment (of road, railway, etc.) as a numerical value that mainly takes into account the number of potential observers. Since human visual acuity diminishes with distance [32], the distance between the potential observer and the observed object acts as a weighting factor of the number of potential observers in order to calculate the *POH* value. This value also depends on the orography of the geographic area where observers and observed object are placed.

Some GIS-based methodologies have been proposed in literature to consider the distance from the observer to the observed object. The most popular is the fuzzy viewshed method proposed by Fisher [33]. The author proposes the use of fuzzy membership functions, whose values decrease with the distance. In the methodology presented in this paper we have used a similar approach using a weighting function. The parameters of this weighting function were adjusted taking into account the height of the power line towers structure and the limit of human recognition acuity. This function, whose values decline with distance, was proposed in [34] and is shown in (1):

$$\begin{cases} w = 0.3 \text{ for } d \leq 57.5 \text{ m} \\ w = \frac{-0.0638 \cdot \ln(d) + 0.59}{1.105} \text{ for } 57.5 < d < 10,000 \text{ m} \\ w = 0 \text{ for } d \geq 10,000 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

where  $w$  represents the weighting factor and  $d$  is the distance between the positions of the observer and of the observed object (power line tower). Figure 1 plots this weighting function. The orography of the terrain between the potential observers and the HVOPL plays a key role in the calculation of the *POH* values. For example, a power line tower cannot be seen from some near areas in a zone due to orographic accidents (hills, depressions, etc.). In order to take into account the orography, we use the Digital Terrain Model (DTM), that is, a raster file representing the terrain of the zone under study. The cell size is chosen according to the average span length of the electric line (one cell, one tower).



**Figure 1.** Weighting function (log scale) of an object from 1 to 10,000 m away.

## 2.1. The Global Potential Observation Hours Map (GPOHM)

The calculation of the GPOHM is done differently for observers with a static position (on-site observers) and for observers in motion (on-road observers). We consider the same height above the ground for the towers of the new HVOPL in both cases.

### 2.1.1. On-Site Observers

The process starts with the creation of a table in which all the necessary information is stored (on-site observers table). This information corresponds, for each observation point, to its geographic position, the number of potential observers and their height above the ground in that point. Depending on the characteristic of the on-site point, the number of potential observers can correspond to inhabitants (communities, isolated houses, farms, etc.), or to daily visitor (viewpoints, monuments, etc.). Suppose an observation point  $j$  and a tower of the new HVOPL placed in the area represented by cell  $i$ , the value of the *POH* variable considering only the point  $j$  and the cell  $i$ ,  $POH_{i,j}$ , is calculated as follows:

- The data corresponding to point  $j$  is read from the on-site observers table.

- The visibility of the tower placed in the area represented by cell  $i$  is determined with the application of a filter: the filter returns a value,  $f_{i,j}$ , equal to “1” if the tower is visible from the observation point  $j$  (taking into account the height of the tower and the height above the ground of the observers in point  $j$ ). The value  $f_{i,j}$  is “0” if the tower is not visible from point  $j$ . This filter is a predefined GIS function.
- The Euclidean distance,  $d_{i,j}$ , from the central point of the area represented by cell  $i$  to the point  $j$  is obtained using GIS functions.
- The weighting factor,  $w(d_{i,j})$ , corresponding to distance  $d_{i,j}$  is calculated by means of (1).
- The  $POH_{i,j}$  value is calculated as the product of the value provided by the filter ( $f_{i,j}$ ), the number of observers in point  $j$  ( $obs_j$ ), the weighting factor,  $w(d_{i,j})$ , and the number of daylight hours in a mean day ( $hmd$ ), as expressed by (2):

$$POH_{i,j} = f_{i,j} \cdot obs_j \cdot w(d_{i,j}) \cdot hmd \quad (2)$$

This procedure is followed for all the observation points and the values aggregated to obtain the On-Site Global Potential Observation Hours value for a tower placed in the area represented by cell  $i$ ,  $OSGPOH_i$ . Supposing a total of  $J$  on-site observation points, this value is calculated by means of (3), and its result stored in the cell  $i$ :

$$OSGPOH_i = \sum_{j=1}^J POH_{i,j} \quad (3)$$

### 2.1.2. On-Road Observers

For on-road observers, they are travelling along a road, what makes different the calculation process. The number of possible observers is evaluated using the average daily traffic (ADT), which corresponds to the average number of vehicles per day. The ADT values can be obtained from local authorities which can provide a different ADT value for each road stretch. A road stretch is limited by two bifurcations or crosses. We divide the road stretches into road segments which are the portions of a road stretch with the same average speed for the vehicles.

A new table, the on-road observers table, is created to store the necessary information. This table contains, for each road segment, the ADT value, its length, the average speed and the average height above the ground of travellers in a vehicle. The tower height is the same that the used for on-site observers.

In order to identify observation points from a road segment, we divide it into evenly separated nodes. The length between consecutive nodes divided by the average speed represents the observation time,  $t_n$ , in a node (the faster speed, the lower watching time). Suppose a road segment  $k$  and a tower of the new HVOPL placed in the area represented by cell  $i$ , the value of the  $POH$  variable considering only the road segment  $k$  and the cell  $i$ ,  $POH_{i,k}$ , is calculated as follows:

- The data corresponding to road segment  $k$  is read from the on-road observers table. The road segment is divided into nodes.
- For each node,  $n$ , in road segment  $k$ :
  - A filter is applied: the filters returns a value,  $f_{i,n}$ , equal to “1” if the tower placed in the area represented by cell  $i$  can be seen from the geographic position corresponding to the node  $n$ , otherwise it returns a value “0”. The height of the HVOPL tower and the average height above the ground of travellers are taken into account in the application of this filter.
  - The Euclidean distance,  $d_{i,n}$ , between the node  $n$  and the central point of the area represented by cell  $i$  is obtained using GIS functions.
  - The weighting factor corresponding to distance  $d_{i,n}$  is calculated by means of (1).

4. The product of the value obtained with the filter,  $f_{i,n}$ , the weighting factor,  $w(d_{i,n})$ , and the observation time in node  $n$ ,  $t_n$ , is accumulated in cell  $i$ .
- After processing all the nodes of road segment  $k$ ,  $N_k$ , the value accumulated in cell  $i$  is converted to  $POH_{i,k}$  value multiplying it by the ADT of road segment  $k$ ,  $ADT_k$ , and the average number of persons per vehicle in that road segment,  $obs_k$ , as expressed in (4):

$$POH_{i,k} = ADT_k \cdot obs_k \cdot \sum_{n=1}^{N_k} f_{i,n} \cdot w(d_{i,n}) \cdot t_n \quad (4)$$

The procedure is repeated for all the road segments in the zone under study, a total of  $K$  road segments. The aggregation of the  $POH_{i,k}$  values obtained for each road segment, as expressed in (5), allow us to calculate the On-Road Global Potential Observation Hours value,  $ORGPOH_i$ , which represents the aggregated number of hours in a mean day in which the HVOPL tower placed in the area represented by cell  $i$  can be seen by on-road observers.

$$ORGPOH_i = \sum_{k=1}^K POH_{i,k} \quad (5)$$

Although we have presented the procedure to take into account travellers in a vehicle, it can be easily modified to study other kind of travellers (in train, pedestrians, in bicycle, etc.). All it needs is to include new rows reflecting the data information for these new kind of travellers.

#### 2.1.3. Global Potential Observability Hours Map (GPOHM)

Finally, the Global Potential Observability Hours (GPOH) value for each cell  $i$  can be calculated by aggregating the values of the  $OSGPOH_i$  and  $ORGPOH_i$ . In this aggregation two factors,  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ , can be considered in order to assign different importance for on-site or on-road observers (6).

$$GPOH_i = \lambda_1 \cdot OSGPOH_i + \lambda_2 \cdot ORGPOH_i \quad (6)$$

After obtaining  $GPOH_i$  values for all the cells, they can be represented in a map, the GPOHM. Figure 2 shows an example of a GPOHM section.



**Figure 2.** Example of a Global Potential Observability Hours Map (GPOHM) section.

## 2.2. HVOPL Routing under the Observability Criterion

### 2.2.1. Lowest Cost Paths (LCPs)

Our starting point is the GPOHM previously obtained. The selection of the neighbouring cells linking an origin and a destination point constitutes the base of line routing in a GIS raster file. The optimal path between two cells, representing different geographical positions in the map, is the set of cells optimally linked to their neighbouring cells in a sequential manner along the route.

The calculation is based on the application of the package gdistance [35], implanted in the R software [36], which provides functions to calculate various distance measures and routes in heterogeneous geographic spaces represented as grids or raster files.

The GPOHM is a map which represents a two-dimensional space  $\Omega = \{(x, y) : x = 0, \dots, X; y = 0, \dots, Y\}$ , where the elementary  $(x, y)$  cell is a geographic location where a HVOPL tower can be erected. The set  $P = \{p_0, \dots, p_k, \dots, p_K\} = \{(x_0, y_0), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_K, y_K)\} = \text{segments}\{s_1, \dots, s_k, \dots, s_K\}$  is the route composed of  $K + 1$  cells (and towers). Line segments  $s_k$  are the links between cells  $p_{k-1}$  and  $p_k$ . A segment can only link neighbouring cells in space  $\Omega$ , that is, from one cell to one of the eight neighbouring cells  $\Omega(p_k) \in \{1\dots8\}$ .

A transition value is associated with each segment linking two neighbouring cells  $p_{k-1}$  and  $p_k$ . This value is independent of the direction followed by the segment, that is, in our study the transition value is just the GPOH value stored in cell  $p_k$ , as expressed in (7):

$$f(s_k) = \text{GPOH}_{p_k} \quad (7)$$

The optimal route from the origin cell to any destination cell is the set  $P$  (set of segments) which correspond to the lowest accumulated transition values. LCPs map corresponds to the raster file where the lowest accumulated transition values from the origin cell are stored in each cell. In order to take into account the value of GPOH variable in the origin cell (first tower of the HVOPL), that value is added to all the cells in that map, obtaining the LCPs map. Figure 3 shows a section of a LCPs map obtained taking the cell in dark green as origin cell and using the GPOHM represented in Figure 2. The value contained in each cell of the map in Figure 3 corresponds to the accumulated value of the GPOH following the optimal route from the origin. The arrows indicate the selected links between neighbouring cells in the computation process.

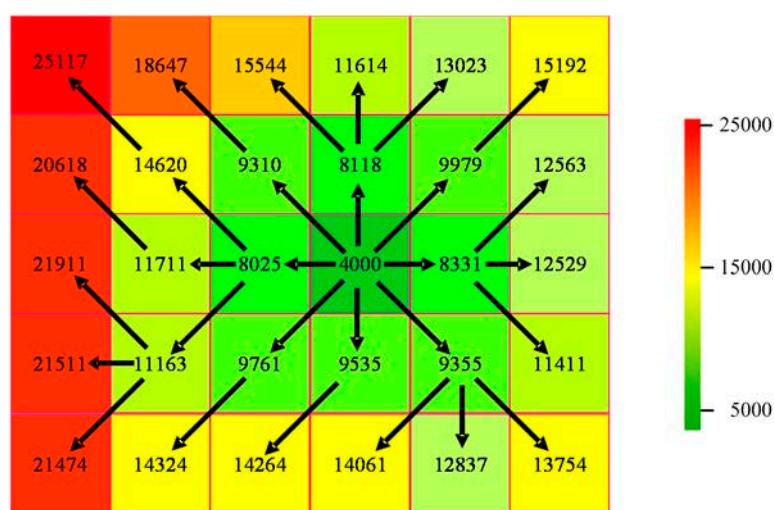


Figure 3. Example of a Lowest Cost Paths (LCPs) map section.

## 2.2.2. Corridor Selection Map (CSM)

The CSM is obtained by computing two *LCPs* maps previously: the first one is obtained by taking the origin of the HVOPL as the origin cell (cell *A*), and the second one is obtained by taking the destination of the HVOPL as the origin cell (cell *B*). By adding the value of the two *LCPs* maps in each cell together and subtracting the value of the *GOPHM*, we obtain the CSM value for each cell, as indicated in (8):

$$CSM_{p_k} = LCPs_{A,p_k} + LCPs_{B,p_k} - GOPH_{p_k} \quad (8)$$

Since value  $LCPs_{A,p_k}$  corresponds to the cost (in *GPOH*) of the optimal path from origin *A* to the area represented by cell  $p_k$ , and  $LCPs_{B,p_k}$  corresponds to the cost of the optimal path from destination *B* to the area represented by cell  $p_k$ , then the addition of the two values together, for each cell, gives the cost of the optimal path that links the origin and destination crossing that cell. We need to subtract the *GPOH* value, as it is computed in both *LCPs* maps.

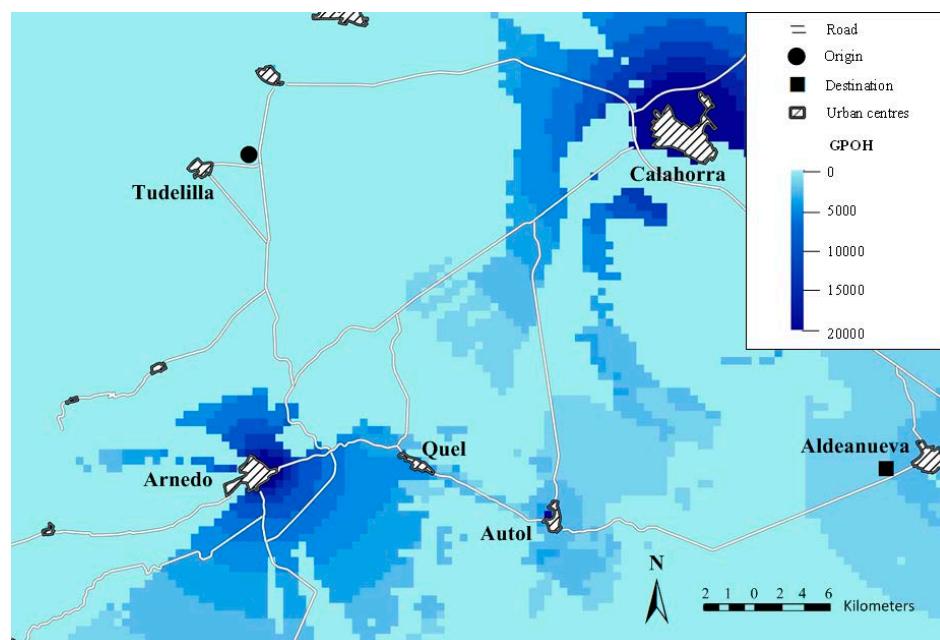
Visual corridors are defined within boundary regions in the CSM, as the set of cells with a value,  $CSM_{p_k}$ , lower than a threshold value ( $h_{\max}$ ) defined by the user:

$$p_k \in \Omega : CSM_{p_k} \leq h_{\max} \quad (9)$$

The optimal path is composed by all the cells containing the minimum value,  $h_{\min}$ . On the other hand, the cells containing the threshold value,  $h_{\max}$ , belong to the bounds of the corridor. Therefore, visual corridors are areas inclosing optimum or near optimum paths under the observability criterion. The visual corridor bounds are composed by the cells which value corresponds to the threshold selected by user.

## 3. Case Study

We present a case study for a zone located at the southeast of La Rioja (Spain). In the case we study the installation of a new 66 kV HVOPL from an origin location (near the town centre of Tudelilla) to a destination location (near the town centre of Aldeanueva) in La Rioja, a wine region that it is promoting the tourism industry with its vineyards landscape as a claim. The relative positions of the origin and destination points of the planned HVOPL are presented in Figure 4.



**Figure 4.** Selected region with locations, roads and *GPOHM* (in hours) for the studied region.

The proposed methodology was applied to the zone under study. This zone includes 22 on-site observation points (urban centres, villages and hamlets) and 53 road stretches. Since the urban centres in the geographic zone of this case study are relatively small, for each urban centre we considered the number of observers equal to its number of inhabitants and we placed the observation point in its centroid. Moreover, most of the road stretches have only one speed limit for vehicles which is related to the road type (highway, local or national road), we considered that the number of road segments was 53. The distance between consecutive nodes in the road segments was fixed in 1 m. The traffic measurement stations were considered to obtain the ADT value for daylight hours.

The main communities in the area under study are the towns of Arnedo (14,551 inhabitants), Quel (2027 inhabitants) and Autol (4367 inhabitants), all of them located in the centre of the area, and the town of Calahorra (24,202 inhabitants), northwards. The roads linking the town centres are coloured in white in the map of Figure 4.

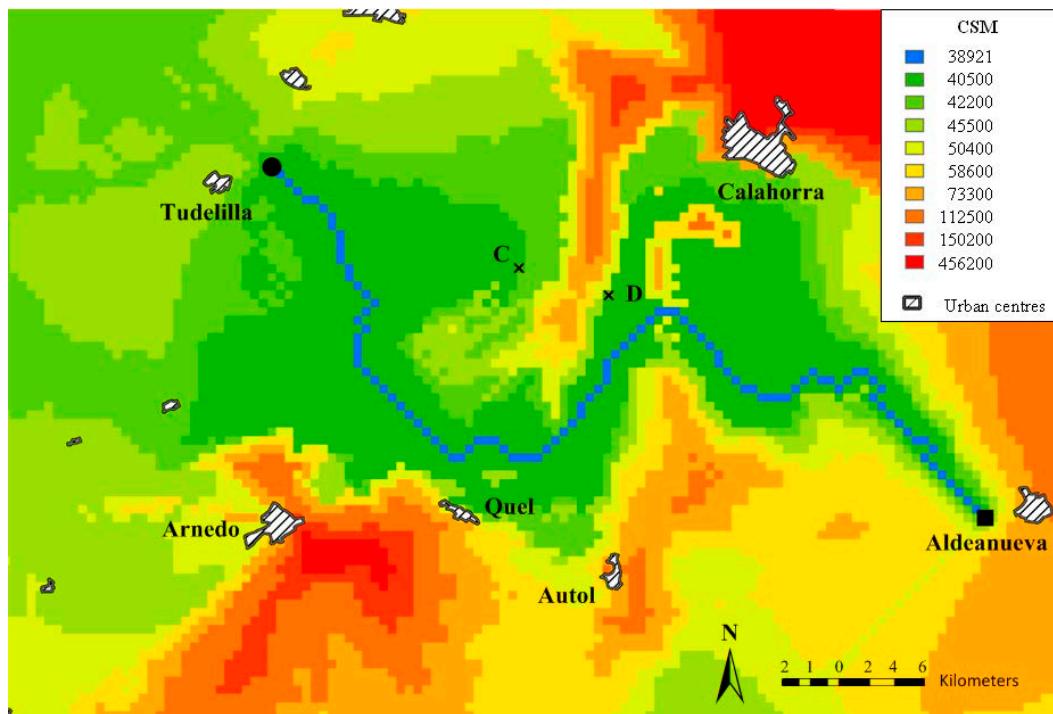
The computational process was carried out to identify the visual corridors, following the observability criterion, corresponding to the construction of the new HVOPL. The planned HVOPL is expected to have towers of 25 m high spanned every 200–300 m long. A GIS cell size of  $200 \times 200$  m was selected so that each cell represents a potential area for the erection of one of the towers. The DTM with the desired resolution and the geographic information data related to the roads in the zone under study, were downloaded from the geographic data server of the Ministry of Public Works and Transport of Spain [37]. We used a value of 1.72 for the average number of persons per vehicle in all the road segments in the zone under study, according to the latest available statistical data referred to Spain [38]. We used  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$  for the two factors in (6), that is, we assigned the same importance to both type of observers (on-site and on-road).

The methodology described in Section 2 was implemented to obtain the GPOHM for the area under study. Figure 4 shows the GPOHM obtained, where the contribution of on-site observers can be identified as larger than that of on-road observers (dark colours, corresponding to higher values of GPOH, near centres with more inhabitants). The light colours represent the cells with low values of GPOH. As it is shown, areas surrounding the main town centres present the highest values of GPOH, although there are near areas with low values because they cannot be seen due to orographic obstacles. It is important to notice the effect of these obstacles on GPOH near Arnedo and Calahorra (e.g., the zone to the south of Calahorra cannot be seen by its inhabitants because it is on a plateau higher than the town centre). In Figure 4, dark colours represent the higher values which correspond to areas that can be seen by most of the potential observers.

LCPs maps from the origin and destination of the planned HVOPL were calculated, as described in Section 2.2, and the CSM was obtained according to (8). The value in each cell of this map (whose values are hours) represents the minimum accumulated observability hours for a HVOPL, with the previously defined characteristics, passing through such cell and linking origin and destination. Figure 5 shows the calculated CSM. The optimal path for the HVOPL (minimum observability of its towers) that links the origin and destination is formed by the cells of that map coloured in blue colour, which have the same and minimum value in this map ( $h_{\min} = 38,921$  h). This value represents an objective quantity of the observability of the proposed 66 kV HVOPL. The value in the rest of the cells of this map is greater than  $h_{\min}$  and its difference with respect to  $h_{\min}$  represents the “distance” in terms of visibility between the optimal path that passes through that cell and the optimal path between origin and destination without the restriction of passing through such a cell.

We define different threshold values ( $h_{\max} = 40,500, 42,200, 45,500, 50,400, 58,600, 73,300, 112,500, 150,200$  and  $456,200$  h) in the CSM to obtain different visual corridors. These threshold values were selected as an illustrative example. Inside each corridor several different routes can be selected with a value of accumulated observability hours lower than the  $h_{\max}$  value, which defines the bounds of such corridor. Furthermore, visual corridors in Figure 5 can help to identify the areas (cells) where is preferable to transform the planned HVOPL into an underground one under the observability criterion if burying all the power line cannot be considered. For example, if the section of the planned power

line between points *C* and *D* is constructed as a buried power line (crossing areas with high values of GPOH, but with null observability since it is underground), and the sections between origin and *C* and between *D* and destination as an overhead power line, the observability of the whole line would be below the 40,500 h.



**Figure 5.** CSM, optimal path and visual corridors for a new 66 kV HVOPL between origin and destination points.

The observability criterion used in the proposed methodology can be included as an additional criterion in multi-criteria HVOPL routing systems which include other economic, environmental, or social criteria, enabling to obtain suitable solutions to the automatic selection of line routing with the minimum public opposition.

#### 4. Conclusions

The construction of new HVOPLs is essential to be provided with a reliable electric power supply and facilitate the integration of power plants based on renewable energies. However, this construction is not exempt from social opposition, mainly from inhabitants in the zone where the new line is going to be erected. One of the arguments most used by opponents to the construction of the new HVOPL is visual impact. Since visual impact is subjective, many HVOPL projects try to assess it by means of surveys and questionnaires filled by selected groups of the local population, although this solution does not eradicate the opposition.

This article presents a useful methodology, based on GIS, which allows the selection of the route for a new HVOPL with the lowest visibility in a zone. The methodology achieves the identification of visual corridors in an objective manner. Visual corridors consist of geographical zones that connect the origin and the destination and represent areas where all the towers of the power line can be erected so that the observability of all the line is under a defined threshold limit. The variable used to assess the observability of the HVOPL is the Global Potential Observation Hours, that is, the aggregated number of hours in a mean day in which any tower of a HVOPL can be viewed by all possible observers. All kind of observers, inhabitants and travellers, are taken into account via a quantitative approach.

The original solution adopted for on-road observers consists of decomposing the road into segments and determining, with great accuracy, the total amount of time during which any of the towers of the new line can be seen as they travel.

Although in the case study we have considered all the possible observers, all with the same affection level with respect to the landscape (for the objective approach), the proposed methodology could be used assigning different factors to each type of observers according to these levels. For example, it would be possible to change the number of observers in each observation point or road segment, using higher factors for tourists than for local residents.

The use of the proposed methodology offers objective results. All the data needed are the digital terrain model of the zone where the line is going to be erected, the position of the observation points (villages, hamlets, viewpoints, roads, etc.), the number of observers and those related to their motion. The results, in the form of maps, allow the easy identification of different alternatives for the route with greater or lower observability for the towers of the power line. These maps can lead to a consensus among the agents (utilities, local authorities and inhabitants) involved in the construction of the new HVOPL and thus contribute to reducing opposition and accelerating its construction.

**Acknowledgments:** The authors would like to thank the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness for supporting this research under the Project ENE2013-48517-C2-2-R and the ERDF funds of the European Union.

**Author Contributions:** All the authors contributed equally to this work.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Gillespie, J.A.T.; Van Pelt, J. Aesthetic and Environmental Aspects of Compact Lines. In *EPRI Transmission Line Reference Book—115–345 kV Compact Line Design*; Electric Power Research Institute: Palo Alto, CA, USA, 2008.
2. Aas, Ø.; Devine-Wright, P.; Tangeland, T.; Batel, S.; Ruud, A. Public beliefs about high-voltage powerlines in Norway, Sweden and the United Kingdom: A comparative survey. *Energy Res. Soc. Sci.* **2014**, *2*, 30–37. [[CrossRef](#)]
3. Sumper, A.; Boix-Aragonès, O.; Villafáfila-Robles, R.; Bergas-Jané, J.; Ramírez-Pisco, R. Methodology for the assessment of the impact of existing high voltage lines in urban areas. *Energy Policy* **2010**, *38*, 6036–6044. [[CrossRef](#)]
4. Thomas, H.; Marian, A.; Chervyakov, A.; Stückrad, S.; Salmieri, D.; Rubbia, C. Superconducting transmission lines—Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance? *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *55*, 59–72. [[CrossRef](#)]
5. Knoepfel, I.H. A framework for environmental impact assessment of long-distance energy transport systems. *Energy* **1996**, *21*, 693–702. [[CrossRef](#)]
6. López-Rodríguez, A.; Escribano-Bombín, R. Visual significance as a factor influencing perceived risks: Cost-effectiveness analysis for overhead high-voltage power-line redesign. *Impact Assess. Proj. Apprais.* **2013**, *31*, 291–304. [[CrossRef](#)]
7. The Landscape Institute and Institute of Environmental Management and Assessment. *Guidelines for Landscape and Visual Impact Assessment*, 3rd ed.; Routledge: New York, NY, USA, 2013.
8. Molina-Ruiz, J.; Martínez-Sánchez, M.J.; Pérez-Sirvent, C.; Tudela-Serrano, M.L.; García Lorenzo, M.L. Developing and applying a GIS-assisted approach to evaluate visual impact in wind farms. *Renew. Energy* **2011**, *36*, 1125–1132. [[CrossRef](#)]
9. Kaldellis, J.K.; Kapsali, M.; Kaldelli, E.; Katsanou, E. Comparing recent views of public attitude on wind energy, photovoltaic and small hydro applications. *Renew. Energy* **2013**, *52*, 197–208. [[CrossRef](#)]
10. Minelli, A.; Marchesini, I.; Taylor, F.E.; De Rosa, P.; Casagrande, L.; Cenci, M. An open source GIS tool to quantify the visual impact of wind turbines and photovoltaic panels. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2014**, *49*, 70–78. [[CrossRef](#)]
11. Betakova, V.; Vojar, J.; Sklenicka, P. Wind turbines location: How many and how far? *Appl. Energy* **2015**, *151*, 23–31. [[CrossRef](#)]

12. Tsoutsos, T.; Frantzeskaki, N.; Gekas, V. Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy* **2005**, *33*, 289–296. [[CrossRef](#)]
13. Fernandez-Jimenez, L.A.; Mendoza-Villena, M.; Zorzano-Santamaria, P.; Garcia-Garrido, E.; Lara-Santillan, P.; Zorzano-Alba, E.; Falces, A. Site selection for new PV power plants based on their observability. *Renew. Energy* **2015**, *78*, 7–15. [[CrossRef](#)]
14. Xu, R.; Wittkopf, S.; Roeske, C. Quantitative Evaluation of BIPV Visual Impact in Building Retrofits Using Saliency Models. *Energies* **2017**, *10*, 668. [[CrossRef](#)]
15. Soini, K.; Pouta, E.; Salmiovirta, M.; Uusitalo, M.; Kivinen, T. Local residents' perceptions of energy landscape: The case of transmission lines. *Land Use Policy* **2011**, *28*, 294–305. [[CrossRef](#)]
16. Harrison, S. Visual disamenity in the Queensland wet tropics: Estimating the economic impacts of overhead transmission lines. *Econ. Anal. Policy* **2002**, *32*, 173–188. [[CrossRef](#)]
17. Navrud, S.; Ready, R.C.; Magnussen, K.; Bergland, O. Valuing the social benefits of avoiding landscape degradation from overhead power transmission lines: Do underground cables pass the benefit-cost test? *Landsc. Res.* **2008**, *33*, 281–296. [[CrossRef](#)]
18. Tempesta, T.; Vecchiato, D.; Girardi, P. The landscape benefits of the burial of high voltage power lines: A study in rural areas of Italy. *Landsc. Urban Plan.* **2014**, *126*, 53–64. [[CrossRef](#)]
19. Priestley, T.; Evans, G.W. Resident perceptions of a nearby electric transmission line. *J. Environ. Psychol.* **1996**, *16*, 65–74. [[CrossRef](#)]
20. Cotton, M.; Devine-Wright, P. Putting pylons into place: A UK case study of public perspectives on the impacts of high voltage overhead transmission lines. *J. Environ. Plan. Manag.* **2013**, *56*, 1225–1245. [[CrossRef](#)]
21. Zewe, R.; Koglin, H.-J. A method for the visual assessment of overhead lines. *Comput. Graph.* **1995**, *19*, 97–108. [[CrossRef](#)]
22. Furby, L.; Slovic, P.; Fischhoff, B.; Gregory, R. Public perceptions of electric power transmission lines. *J. Environ. Psychol.* **1998**, *8*, 19–43. [[CrossRef](#)]
23. Erdmann, N.; Schegner, P. Visual approach to assess the environmental impact of overhead transmission lines. In Proceedings of the 5th International Youth Conference on Energy (IYCE), Pisa, Italy, 27–30 May 2015; pp. 1–6. [[CrossRef](#)]
24. Lienert, P.; Suetterlin, B.; Siegrist, M. Public acceptance of the expansion and modification of high-voltage power lines in the context of the energy transition. *Energy Policy* **2015**, *87*, 573–583. [[CrossRef](#)]
25. Eedy, W. The use of GIS in environmental assessment. *Impact Assess.* **1995**, *13*, 199–206. [[CrossRef](#)]
26. João, E.; Fonseca, A. The role of GIS in improving environmental assessment effectiveness: Theory vs. practice. *Impact Assess.* **1996**, *14*, 371–387. [[CrossRef](#)]
27. Danese, M.; Nolè, G.; Murgante, B. Visual impact assessment in urban planning. *Stud. Comput. Intell.* **2009**, *176*, 133–146. [[CrossRef](#)]
28. Atkinson, S.F.; Canter, L.W. Assessing the cumulative effects of projects using geographic information systems. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2011**, *31*, 457–464. [[CrossRef](#)]
29. Warner, L.L.; Diab, R.D. Use of geographic information systems in an environmental impact assessment of an overhead power line. *Impact Assess. Proj. Apprais.* **2002**, *20*, 39–47. [[CrossRef](#)]
30. Electric Power Research Institute and Georgia Transmission Corporation. EPRI-GTC Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology. Available online: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001013080&Mode=download> (accessed on 5 October 2017).
31. Grassi, S.; Friedli, R.; Grangier, M.; Raubal, M. A GIS-based process for calculating visibility impact from buildings during transmission line routing. In *Connecting a Digital Europe through Location and Place*; Huerta, J., Schade, S., Granell, C., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2014; pp. 383–402.
32. Schiffman, H.R. *Sensation and Perception. An Integrated Approach*, 5th ed.; Wiley: New York, NY, USA, 2001.
33. Fisher, P.F. Probable and fuzzy models of the viewshed operation. In *Innovations in GIS 1*; Worboys, M.F., Ed.; Taylor: London, UK, 1994; pp. 161–175.
34. Weigel, J. Kompensationsflächenberechnung für Freileitungen. Unpublished. Available online: <http://www.ecogis.de/Kompensationsfl%E4chenberechnung.pdf> (accessed on 5 October 2017).
35. Van Etten, J. R package gdistance: Distances and routes on geographical grids. *J. Stat. Softw.* **2014**, *76*. [[CrossRef](#)]

36. R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, A Language and Environment for Statistical Computing. Available online: <http://www.R-project.org> (accessed on 5 October 2017).
37. Centro Nacional de Información Geográfica. Ministry of Public Works and Transport of Spain. Available online: [http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/locale?request\\_locale=en](http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/locale?request_locale=en) (accessed on 5 October 2017).
38. European Energy Agency. Car Occupancy Rates. Available online: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/term29-occupancy-rates-in-passenger-transport-1> (accessed on 5 October 2017).



© 2017 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



---

## APÉNDICE III

---

### Visibility assessment of new photovoltaic power plants in areas with special landscape value

---



Article

# Visibility Assessment of New Photovoltaic Power Plants in Areas with Special Landscape Value

Enrique Zorzano-Alba , Luis Alfredo Fernandez-Jimenez \*, Eduardo Garcia-Garrido, Pedro M. Lara-Santillan, Alberto Falces, Pedro J. Zorzano-Santamaria, Candido Capellan-Villacian and Montserrat Mendoza-Villena 

Department of Electrical Engineering, University of La Rioja, 26004 Logroño, Spain;  
enrique.zorzano@unirioja.es (E.Z.-A.); eduardo.garcia@unirioja.es (E.G.-G.); pedro.lara@unirioja.es (P.M.L.-S.);  
alberto.falces@unirioja.es (A.F.); pedrojose.zorzano@unirioja.es (P.J.Z.-S.); candido.capellan@unirioja.es (C.C.-V.);  
montserrat.mendoza@unirioja.es (M.M.-V.)

\* Correspondence: luisalfredo.fernandez@unirioja.es

**Abstract:** Power plants based on renewable sources offer environmental, technical and economic advantages. Of particular importance is the reduction in greenhouse gas emissions compared to conventional power plants. Despite the advantages, people are often opposed to the construction of these facilities due to their high visual impact, particularly if they are close to places with a great cultural and/or landscape value. This paper proposes a new methodology for identifying the most suitable geographical areas for the construction of new photovoltaic (PV) power plants in zones of special scenic or cultural interest, helping to keep the environment free from the visual intrusions caused by these facilities. From several repeated analyses, the degree of visibility of the new PV plant, the potential observation time of passing visitors, considering the route they follow and their speed, and the increase in visibility of the plants when seen totally or partially with the sky as background, are determined. The result obtained is a map showing the ranking of the geographical areas based on a variable calculated in such analyses: the Global Accumulated Perception Time (GAPT). The application of this methodology can help the different agents involved in the decision-making process for the installation of new PV plant by providing them with an objective visibility criterion.

**Keywords:** visual impact; landscape heritage; photovoltaic plants; geographical information systems; perception time; viewshed analysis



**Citation:** Zorzano-Alba, E.; Fernandez-Jimenez, L.A.; Garcia-Garrido, E.; Lara-Santillan, P.M.; Falces, A.; Zorzano-Santamaria, P.J.; Capellan-Villacian, C.; Mendoza-Villena, M. Visibility Assessment of New Photovoltaic Power Plants in Areas with Special Landscape Value. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 703. <https://doi.org/10.3390/app12020703>

Academic Editor: Yannis Maniatis

Received: 17 September 2021

Accepted: 10 January 2022

Published: 11 January 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

The integration of power plants based on renewable energies into the electrical grids has accelerated in recent years, primarily for environmental reasons, such as the effort to reduce greenhouse gas emissions from fossil fuels. Economic support from government authorities for these facilities, which are mainly wind and photovoltaic (PV) power generation plants, have led to their expansion throughout Europe [1]. For this expansion, finding the land available for building a new facility is the initial requirement. In the case of new wind farms or PV power plants, there are many factors involved in the decision to select the right location (wind or solar resources, distances to roads, distances to power lines, terrain orography, proximity to urban centres, visual impact, etc.) [2–5].

In areas where tourism is an important component of the local economy or in areas with a high landscape or cultural value, one of the most important factors in people accepting the installation of new power facilities is the visual impact. It is in the interest of local authorities and economic entities related to tourism that visitors or tourists perceive the landscape in its natural or original state [6] and as free from visual intrusions as possible. This dimension can cause projects to be suspended as a result of social rejection to the alteration or modification of the landscape [7]. In the field of power plants based on renewable energies, wind energy has the greatest negative impact on landscapes per unit of energy generation, followed by PV solar energy [8]. This has meant that the visual impact

assessment of wind farms is more developed, although some of the proposed solutions can be applied to PV plants.

Cohen et al. in [9] seek to develop a conceptual definition of social acceptance, identifying and synthesizing the factors of discontent at play in the acceptance of wind farms, transmission lines and pumping groups for energy storage. In wind farm projects, the assessment of visual impact acquires great importance because of their lack of aesthetic integration into the landscape [10]: the authors assess the magnitude of the aesthetic impact on the landscape by means of a proposed indicator. Measurements of visibility, colour, fractality and continuity are taken from photographs and combined with each other. The results of the indicator are contrasted with the impact perceived by a sample of the local population. This perceived impact is found through surveys. In [11], the variables that can affect the visual impact are analysed, such as the visual magnitude and the overall colour difference, according to the author. From the analysis of images of the wind farm under study, parameters such as the difference in clarity, the difference in colour saturation and the difference in hue are obtained, which factor into the calculation of the overall difference in the colour represented by the visibility of the wind farm. The author analysed images of the wind farm at different times of the day and, using atmospheric visibility data, determined the temporal distribution of visual impacts in the area being studied. Other works use a method that quantifies the degree of visibility of an offshore wind farm from various observation points along the coast [12]. In this assessment of the degree of visibility, the authors introduce three indicators: the horizon occupation indicator (surface occupied by the wind farm on the horizon and defined by the area delimited by the convex envelope joining the turbine hubs), the distinguishable turbine indicator (defined as the relationship between the number of distinguishable turbines and the total number of turbines), and the aesthetic indicator (based on the alignment of the turbines).

PV power plants can bring about the transformation of a large area (land-use change, earthworks, vegetation removal), producing a significant alteration to the landscape. For assessing the aesthetic impact of PV plants, an indicator based on four parameters is proposed in [13], similar to the indicator presented in [10] for wind farms. In addition, in PV plants, there is a risk of glare from the reflection of sunlight on the surface of the PV modules, which makes them visible from great distances, producing a landscape alteration and negative visual impact on the environment [14].

Geographic information systems (GIS) are tools that make it possible to organize, analyse and model large amounts of spatial data, which facilitates the creation of maps for decision making in various types of projects. The scientific and technical literature includes many applications of GIS. Among other applications, they can be used to help in the assessment of renewable energy resources. For solar energy resources, Moser et al. [15] assess the PV potential in southern Tyrol, northern Italy, taking into account PV facilities on roofs and non-conventional surfaces. In a GIS, it is possible to perform a spatial analysis of the solar resource data together with other data from the area under survey, such as orography and distances to roads and power lines, or even take climatic data into consideration, which can help to locate the best sites for building PV plants [16]. A GIS system is also a good tool for visual impact assessment: it is possible to generate maps of the region under study that show those areas where the installation of PV power plants would have less impact, or areas where the installation of these facilities would not be suitable due to their high visual impact on the environment. Rodrigues et al. [17] address visual impact from spatial and perceptual points of view. From the spatial point of view, the result is a visibility map in which each cell (geographic position) has a Boolean value indicating whether an installation built in that position is seen from the observer's location, and from the perceptual point of view, a visual perception map is obtained in which each cell is assigned the affected angle of vision. The parameters required by the model are the dimensions of the facility (height and width), the visual threshold (maximum distance from which a facility can be recognized), and the height of the observer's position.

Manchado et al. [18] present a study that takes into account criteria of visibility and visual impact in the design stage of wind farms. The proposed methodology is based on two indices that describe the conditions of visual intrusion. The first index, called Magnitude of the Visual Effect (MVE), is the product of three visual indicators (visually affected area, visually affected population and visual exposure in linear sections), and the second one is an improved version of the Spanish Method index (SPM) proposed in [19]. Other authors take into account the visual capacity of the observer for visual impact assessment, using GIS tools to generate 3D maps [20]. For the assessment of the visual impact of wind turbines, other methods take into account the height of the visible part of the wind turbine and what percentage of it occupies the scene, for which GIS software together with 3D graphics generation software have been used [21]. Assessing the visual impact of PV plants using GIS-based tools helps to select geographic locations where the visual impact is lower. In [22], a relative visual impact index is defined, taking into account aspects such as the number of inhabitants in the surrounding area, the orography of the terrain and the height of the PV plants. From this index, visual impact maps are generated for two types of PV power facilities (with fixed panels or with trackers). Most of the GIS software have tools that make it possible to determine the visible geographic area (viewshed) from one or several observation points. Reference [23] proposes a methodology based on the fuzzy viewshed and the distance decay methods, which enables the calculation of the maximum number of hours in an average day in which a new PV plant can be seen by every possible observer. It takes into account all possible observers in motion (by roads) or in situ (urban centres), the orography of the terrain, the height of the observer and the size of the PV plant (height of panels, surface occupied). In urban areas, there is an increase in the use of solar PV technologies, which are mainly attached to building envelopes (roofs and facades). Florio et al. presents in [24] a methodology for assessing the visibility of building envelope surfaces exposed to solar radiation, which could host solar modules (thermal or photovoltaic) in urban areas and where public perception of this type of facility is not affected. The viewshed is determined on the cumulative viewing time from observation points, equidistantly arranged along urban roads, taking into account the height of the observer. The maximum visibility distance limit for calculations is 500 m, imposed by computational constraints.

As a consequence of population growth and industrial and socio-economic development, the need to build new infrastructure arises, which may have a direct impact on cultural and landscape heritage, the components of which may be seriously affected [25]. Therefore, the conflict between development policies and heritage conservation policies makes it necessary to propose and make use of tools that evaluate the effects produced by such infrastructures on cultural and landscape heritage, in order to maintain a balance between the two conflicting interests [26]. The methodology proposed in this work can help the agents involved to make decisions regarding the most suitable sites for the installation of new PV plants under an objective visibility criterion, keeping landscapes of special interest or unique cultural sites safe from the intrusion of these facilities, which could create a significant visual impact. The methodology helps to identify the most suitable sites for the construction of new PV plants using GIS tools on a digital surface model (DSM) and taking into account the possible observers who move through the paths of geographical areas that are especially protected by interest in their cultural and landscape value. These tools are integrated in the open-source software QGIS [27]. The proposed method considers the global visibility of future PV power plant elements, that is, the method evaluates what portion of the elements can be seen by the observers and also what part of the elements can be seen above the skyline. Facilities with the sky in the background have higher colour contrast and therefore greater visibility than facilities with the terrain in the background [28]. Variations in the visibility of PV facilities, caused by changes in colour contrasts during the day or by the weather, have not been considered in this work.

In the scientific literature, the issue of visual impact caused by PV facilities has generally been approached under subjective criteria, evaluating the visual perception people

have of these types of facilities by means of surveys, photographs, 3D computer simulations, etc. To our knowledge, no published work proposes an objective method, based on visibility (total or partial), to identify locations where the construction of new PV facilities would produce a lower visual impact than elsewhere. Furthermore, there are not any published works related to site selection for new facilities in areas of special landscape and cultural protection, where the potential observers are visitors or tourists travelling in such environment. The methodology proposed in this paper aims to fill these gaps.

We define a variable called Global Accumulated Perception Time (*GAPT*), for the evaluation of the visibility of new PV facilities. This variable, which will be defined in detail in Section 2, is related to the cumulative total hours in a year in which a proposed PV plant can be seen by observers moving along the roads or paths in the area under study. The assessment of the *GAPT* variable in a geographical area makes it possible to obtain a set of GIS maps that help to visually identify the most suitable locations for the installation of new PV power plants in terms of their visibility.

In summary, the main objective of this work is the development of a new methodology based on GIS to determine, in an objective way, the places where future PV facilities will have a greater or lesser visibility for a set of potential observers in movement, and its application to places or geographical areas with special landscape or cultural protection.

The novel aspects covered in this work are:

- Assessment of the degree of visibility (total or partial) of the new PV plants;
- Assessment of the possible observation time of visitors or tourists, taking into account the route they follow and their speed;
- The proposed visibility enhancement factor for PV plants that may be fully or partially visible with the sky in the background.

The article is structured as follows: Section 2 presents the methodology used for the evaluation of the *GAPT* variable for all the areas surrounding the paths followed by the observers; Section 3 presents a case study with the application of the proposed methodology for the selection of suitable sites for the installation of two-axis PV trackers with an installed power capacity of 10 kW (the area under study corresponds to the area crossed by the Way of St. James in the region of La Rioja, Spain, declared a World Heritage Site by UNESCO) [29]; the results of the case study are shown and discussed in Section 4; finally, Section 5 presents the conclusions.

## 2. Methodology

The data on which a GIS runs are structured in layers containing information in vector or raster formats. Vector data represent geographic objects or entities such as points, nodes, lines or polygons. The values of the features of interest of such geographic objects are stored in the attribute table of the vector layer. Raster data are stored in an array of cells or pixels (each one representing an elementary geographic area) organized into rows and columns. The spatial resolution of a raster dataset determines the level of detail represented and depends on the size of the cell or geographic area it depicts. Both types of data are referenced to a geographic coordinate system.

In the proposed methodology, the main objective is to obtain a set of GIS maps that facilitate the identification of those places where the perception time of new PV power plants would be more reduced. The observers considered are visitors or tourists travelling on roads, paths or trails (we will refer to them as routes throughout the article) of the geographical area studied. GIS tools enable the creation of such maps working with data in raster format. These maps represent, for each geographic area or cell, the values of the variable called Global Accumulated Perception Time (*GAPT*). This variable corresponds to the accumulated value of the number of hours per year that a proposed PV plant can be seen by all possible observers in motion, considering all the observation points in the area under study. That is, the *GAPT* variable is the sum of the values of another variable, the Accumulated Perception Time (*APT*), for all the possible observation points. Considering a single observation point, the value of the variable *APT* in any cell represents the cumulative

value of the possible hours per year in which the proposed PV plant, located in such a cell, can be seen by all observers passing through the observation point. It should be noted that, throughout this article, when we say that a PV plant is located in a particular cell, it really means that the PV plant is located in the elementary geographic area represented by that cell in a GIS.

## 2.1. Accumulated Perception Time

### 2.1.1. Required Data

The calculation of the hours per year, represented by the *APT* variable, takes into account increasing or decreasing factors. These factors include the distance between the observation point and the cell in which the proposed PV plant is located, the fraction of the PV plant that can be seen from the observation point, and the fraction that can be seen above the skyline. For the evaluation of the *APT* variable, it is necessary to consider aspects such as:

- Orography: Hills and depressions ensure that PV power plants remain hidden from the eyes of observers. In other areas, PV power plants can be fully or partially visible and some of their elements can be seen above the skyline, which increases their visibility. The orography is considered in a GIS using the digital elevation model (DEM) of the study area. The DEM is the digital representation of the elevation of the earth's surface with respect to a reference. Specifically, DEMs are a set that include digital terrain models (DTMs) and digital surface models (DSMs). DTMs represent the elevation of bare ground, while DSMs represent the elevation of the land surface, including obstacles not exclusively associated with terrain orography such as trees, vegetation, buildings, and other natural or artificial objects [30]. In this work, in order to consider visual obstacles on the ground, we have used a DSM of the analysed area. Different DSMs could also be used, as the density of vegetation can change over the seasons;
- Observation points: These represent the places where potential observers in motion can be located at a given time. These points are represented in a vector layer and have an associated attribute table containing the following data: geographic coordinates, height of the observer's eyes above the ground, height of the observed object above the ground, observation point elevation (*z*-coordinate), slope of the terrain in the direction of travel, and travel speed of the observers. From the speed value, it is possible to calculate the average observation time of the observers, as will be discussed in detail later in this section;
- Average annual number of observers travelling along the observation points of a given route;
- Colour contrast of the observed object with respect to the background. According to [31], objects with a higher colour contrast will have greater visibility than objects with a low contrast, therefore it is necessary to introduce a weighting factor as a function of this colour contrast of the facility;
- Distance between the observer and the observed object (proposed PV plant). According to [32], the visual acuity of the human being decreases with distance, therefore it is necessary to enter a weighting factor as a function of this distance.

Some works published in the scientific and technical literature consider this distance in models of viewshed analysis. Fisher in [33] proposes the use of fuzzy functions, the values of which decrease with the distance between observer and observed object. In the methodology used in this work, we have taken a similar approach, but we use a weighting function, shown in (1), with factors that have been adjusted taking into account both the height of the observed object and the loss of human visual acuity with distance, using logarithmic functions. This weighting function was used by Weigel in 2007 [34], improving

the proposal of Paul in 2004 [35]. The weighting factors are limited by distance in three different perception zones as:

$$\begin{cases} w = 0.3 \text{ for } d \leq 57.5 \\ w = \frac{-0.0638 \cdot \ln(d) + 0.59}{1.105} \text{ for } 57.5 < d < 10,000 \\ w = 0 \text{ for } d \geq 10,000 \end{cases} \quad (1)$$

where  $w$  represents the weighting factor, which can take values between 0 and 0.3, and  $d$  represents the distance, in meters, between the observer and the observed object.

In this work, we have assumed that the potential observers are moving at the average speed of a walking human being. However, the methodology is also applicable to other types of observers who travel by other means of locomotion (land vehicles, horseback, etc.). It is just a case of using the appropriate values of average speed and height of the observer's eyes above the ground when the observer is using these means of locomotion. The number of potential observers ( $NOY$ ) corresponds to the annual number of walkers moving along a route (road, path or trail).  $NOY$  values can be obtained from local authorities, who can provide them for all of the routes included in the area studied.

### 2.1.2. Calculation Process

Suppose that along a given route,  $k$ , there are  $n$  nodes or arranged observation points. The value  $APT_{i,k}$  corresponds to the sum of the values of the  $APT$  variable for all the  $n$  observation points of route  $k$ , considering a new PV plant placed in cell  $i$ . The stages that define the process of assessing the value of the  $APT_{i,k}$  variable are described below:

1. Generation of the set of positions of observation points. The positions of the observation points are generated by taking equidistant nodes along the route at a distance equal to the size of the cell selected to represent the values of the  $APT$  variable. The nodes, stored in a vector layer, have an associated attribute table containing the information required for each point: the geographical coordinates, the height of the eyes of the observer above the ground, the height of the observed object above the ground, the elevation of the observation point ( $z$ -coordinate), the slope of the terrain in the direction of travel, the average speed of the observer as he/she moves from one node to the next one, and the average observation time in each node. These last values are calculated in the next two stages;
2. Evaluation of the walking speed of the observer. An observer walking along delimited routes over different types of terrain does not have a constant speed, as may occur when walking on flat terrain clear of obstacles. The observer's speed will generally be slower when walking over rough terrain with steep slopes. In order to take into account the difficulty of walking routes in rough terrain, the Modified Tobler's Function proposed by Márquez et al. in [36] has been used. It consists of an exponential function that provides the walking speed depending on the slope of the route section by which the potential observer is walking. This function is shown in (2), where  $ws_n$  is the walking speed (km/h) in node  $n$  and  $\delta_n$  is the angle of the terrain slope, in degrees, in the usual direction of the hiker, in that node.

$$ws_n = 4.8 \cdot e^{-5.3 |0.7 \tan \delta_n + 0.03|} \quad (\text{km/h}) \quad (2)$$

To determine the angles of the terrain slopes  $\delta_n$  in the direction of travel associated with each node, the following steps are performed:

- To each node the value that collects the DTM cell with the same coordinates is assigned. Let us call this value the  $z$ -coordinate of the node, which is stored in the attribute table;
- Knowing the difference between the values of the  $z$ -coordinate of nodes  $n$  and  $n + 1$  and the distance  $d_n$  between them, it is easy to obtain the angle of the slope  $\delta_n$ , when the observer moves from node  $n$  to  $n + 1$ . If  $\delta_n$  has a positive value, it

is an upward slope, while if it is negative, it is a downward slope. The value obtained is stored in the register corresponding to node  $n$  in the attribute table;

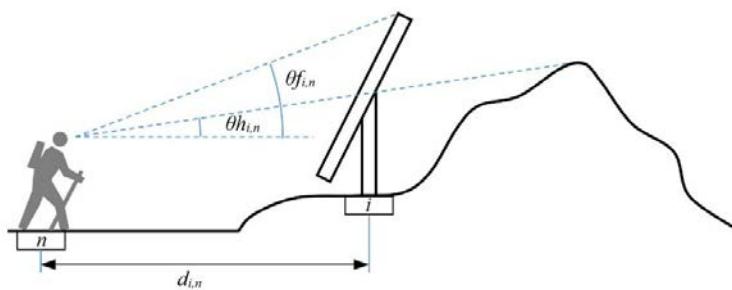
- All the nodes of route  $k$  are analysed in the direction of travel, obtaining the values  $\delta_n$  of each node;
  - The value of the real distance ( $D_n$ ) separating nodes  $n$  and  $n + 1$  is determined. The value of the distance  $d_n$  corresponds to the projection on the horizontal plane of the real distance  $D_n$ ;
  - Then, applying the hiking function (2), the values of the observer's velocity  $ws_n$  at each node  $n$  are obtained and stored in the attribute table.
3. Calculation of the average observation time  $t_n$  in node  $n$ . This corresponds to the travel time used by the walker to travel from node  $n$  to node  $n + 1$  along the route  $k$ . The time  $t_n$  is calculated as the distance between consecutive nodes  $D_n$  divided by the velocity of observer  $ws_n$  assigned to node  $n$ ;  $t_n = D_n/ws_n$ . The value of  $t_n$  obtained for each node  $n$  is stored in the attribute table;
  4. Determination of the distance between the new PV plant and the observation point. By using GIS tools, it is possible to determine the Euclidean distance  $d_{i,n}$  between the area represented by cell  $i$  and the observation point represented by node  $n$  of route  $k$ . Subsequently, the weighting factor  $w_{i,n}$  is obtained for each cell  $i$ , as a function of the distance  $d_{i,n}$ , using the expression previously shown in (1);
  5. Determination of the visible height factor ( $fhv_{i,n}$ ). This represents the visible part (in terms of height) of the future PV plant, placed in the cell  $i$ , when the observer is in the observation point represented by node  $n$ . Previously, the maximum height ( $H_{pv}$ ) of the PV plant was divided into segments of equal length ( $h_{seg}$ ). To determine  $fhv_{i,n}$ , for each node  $n$ , several repeated analyses are performed, following the steps outlined below:
    - To carry out a correct "visibility analysis" with a DSM, a new DSM must be generated in which the elevation of the observer in node  $n$  and of the PV plant placed in the cell  $i$  must correspond to the elevation values for bare ground in that position or cell, collected from the DTM;
    - Let  $h$  be the analysed height of the PV plant. In each analysis,  $h$  is increased by one segment of length  $h_{seg}$ , i.e.,  $h$  ranges  $h_{seg}$  to the total height  $H_{pv}$  of the PV facility;
    - Using GIS tools, visibility analyses are performed to evaluate the visibility factor ( $fv_{i,n}^h$ ) of the PV plant with a height  $h$ , placed in the cell  $i$ , when the observer is in node  $n$ . The result obtained for  $fv_{i,n}^h$  will take the value 0, if from node  $n$  it is not possible to see the PV plant in cell  $i$ . On the contrary,  $fv_{i,n}^h$  will take the value 1, if from node  $n$  it is possible to see the PV facility with a height of  $h$  meters. The results, after applying the analysis to all the cells in the study area, are collected in a binary raster, which only stores ones and zeros;
    - The value of  $h$  is increased by one segment and the visibility analysis is subsequently repeated from the same node  $n$ . The last analysis will be when  $h$  reaches the value of  $H_{pv}$ . As a result of each analysis for each value of  $h$ , a binary raster dataset of  $fv_{i,n}^h$  is obtained;
    - The values of  $fv_{i,n}^h$  obtained for each value of  $h$  are then summed. The result corresponds to the portion in meters of the PV plant height placed in the area represented by cell  $i$  that can be seen by the observer in node  $n$ . Finally, it is multiplied by the term  $h_{seg}/H_{pv}$ , as shown in expression (3), obtaining the visible height factor  $fhv_{i,n}$ , which represents the value per unit of the height  $H_{pv}$  seen from the observation point  $n$ .

$$fhv_{i,n} = \frac{h_{seg}}{H_{pv}} \sum_{h=h_{seg}}^{H_{pv}} fv_{i,n}^h \quad \text{for } H_{pv} > 0 \quad (3)$$

6. Evaluation of the skyline index. Generally, facilities above the skyline (with the sky in the background) will have a higher colour contrast and, therefore, higher visibility than facilities below the skyline (with the terrain in the background) [37]. In order to take this aspect into account, a skyline index ( $Isk$ ) is calculated. Considering a PV facility in cell  $i$  and an observer in node  $n$ , with the  $Isk_{i,n}$  index it is possible to give more weight to the visibility of the facility which is seen partially or completely above the horizon. Therefore, it is necessary to determine what fraction, in terms of height, of the PV facility is visible from node  $n$  above the horizon line. This index is calculated using the expression shown in (4), where only positive values are considered:

$$\begin{cases} Isk_{i,n} = \frac{d_{i,n}(\tan \theta f_{i,n} - \tan \theta h_{i,n})}{H_{pv}} & \text{for } \theta f_{i,n} > \theta h_{i,n} \\ Isk_{i,n} = 0 & \text{for } \theta f_{i,n} \leq \theta h_{i,n} \end{cases} \quad (4)$$

where  $\theta f_{i,n}$  is the angle of elevation of the line of sight [38] between the observation point represented by node  $n$  and the maximum height  $H_{pv}$  of the PV facility placed in the cell  $i$ , and  $\theta h_{i,n}$  corresponds to the angle of elevation of the line of sight connecting the position of the observer's eyes in node  $n$  to the global horizon beyond cell  $i$ , as shown in Figure 1.



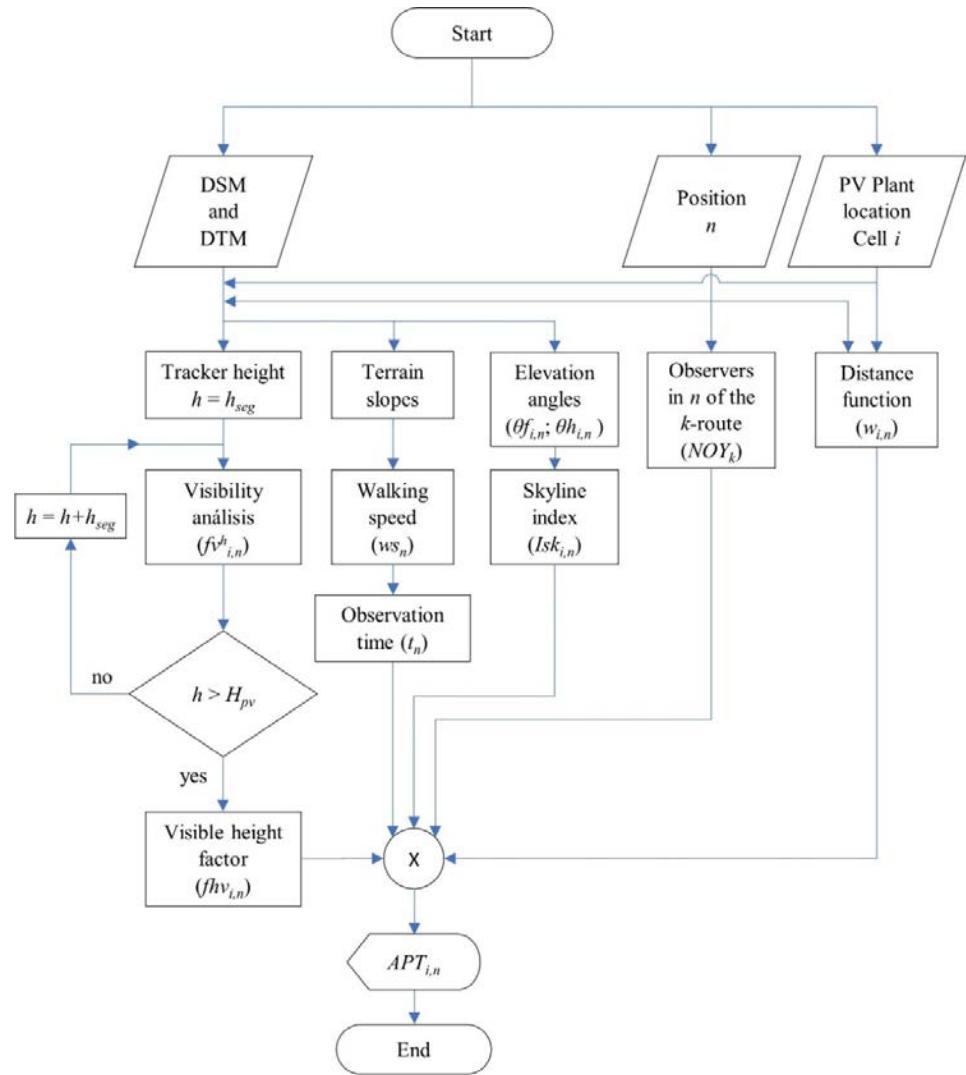
**Figure 1.** Lines of sight connecting the observer, in node  $n$ , to the PV facility and to the horizon.

The  $Isk_{i,n}$  index can take values between 0 and 1, and represents the value per unit of the height  $H_{pv}$  above the skyline, as seen by an observer located at node  $n$ . When the whole facility (in terms of height) is below the skyline  $Isk_{i,n}$  takes a value of 0, on the other hand, when the entire facility is above the skyline  $Isk_{i,n}$  takes a value of 1. To evaluate  $Isk_{i,n}$  it is necessary to determine the elevation angles  $\theta h_{i,n}$  and  $\theta f_{i,n}$  beforehand, as follows:

- First, we assume that observers can look in any direction, so it is necessary to determine the horizon line around each observation point or node  $n$ , whose geographical coordinates are known. That is, the horizon height  $\theta h_{i,n}$  must be evaluated for observer azimuth values from 0 to 360 sexagesimal degrees. The observer's azimuth refers to the angle, measured on the horizontal plane, formed by the direction in which the observer is looking with respect to a reference direction. In our work, the azimuth value was 0 degrees when the observer was facing east and 90 degrees when facing north. After applying GIS tools, the result obtained, for each node  $n$ , is a raster dataset in which each cell  $i$  contains the value of the elevation angle  $\theta h_{i,n}$  of the line of sight connecting the observer's eyes in node  $n$  to the global horizon beyond the area represented by the cell  $i$ . Consequently, all cells with the same azimuth value, will also take the same value of  $\theta h_{i,n}$ ;
- To obtain the elevation angle  $\theta f_{i,n}$ , visibility analysis GIS tools are applied at each node  $n$ . As result, a raster dataset is obtained in which each cell  $i$  contains the value of the elevation angle  $\theta f_{i,n}$  of the line of sight connecting the observer's eyes in node  $n$  with the highest part of the possible PV facility placed in the cell  $i$ ;
- Subsequently, by means of raster data layer processing techniques (map algebra) the  $Isk_{i,n}$  index is determined using the expression (4).

For a single observer in node  $n$ , the value of  $APT_{i,n}$  in cell  $i$  will take the value resulting from the product of the visibility height factor  $fhv_{i,n}$ , the weighting factor  $w_{i,n}$  as a function

of distance  $d_{i,n}$ , the average observation time  $t_n$ , and the term  $(1 + Isk_{i,n})$ . This last term has been introduced in order to give a higher degree of visibility to facilities that can be seen above the skyline. We have applied this methodology to routes that are mainly taken by walkers in periods of good weather with clear skies and high colour contrast (spring, summer and autumn seasons). Therefore, the visibility of the fraction of the PV plant that can be seen above the horizon line has received twice as much weight as the rest of the facility. The  $APT_{i,n}$  calculation process is shown in Figure 2.



**Figure 2.**  $APT_{i,n}$  calculation flow-chart for PV plant placed in the area represented by cell  $i$ , and observers in the position represented by node  $n$ .

Taking into account the average annual number of observers that can circulate through node  $n$  of route  $k$  ( $NOY_k$ ), the cumulative value of  $APT_{i,n}$  will be given by the expression (5).

$$APT_{i,n} = NOY_k \cdot fhv_{i,n} \cdot w_{i,n} \cdot t_n \cdot (1 + Isk_{i,n}) \quad (\text{hours/year}) \quad (5)$$

## 2.2. Global Accumulated Perception Time

Finally, taking into account all the observation points or nodes  $n$  of route  $k$  and the number of observers  $NOY_k$  travelling through each route, the cumulative value of  $APT_{i,k}$  in cell  $i$ , will be given by the expression (6),

$$APT_{i,k} = NOY_k \sum_{n=1}^{N_n} (fhv_{i,n} \cdot w_{i,n} \cdot t_n) (1 + Isk_{i,n}) \quad (\text{hours/year}) \quad (6)$$

where  $N_n$  represents the total number of nodes or observation points on route  $k$ .

This process is repeated sequentially, analysing all possible routes (roads, path or trails used by the potential observers) in the area under study, so that for each cell  $i$ , the result of adding the  $APT_{i,k}$  values of each route  $k$  is the global value of the accumulated perception time ( $GAPT_i$ ), as shown in (7),

$$GAPT_i = \sum_{k=1}^{N_k} APT_{i,k} \quad (\text{hours/year}) \quad (7)$$

where  $N_k$  represents the total number of routes in the study area.

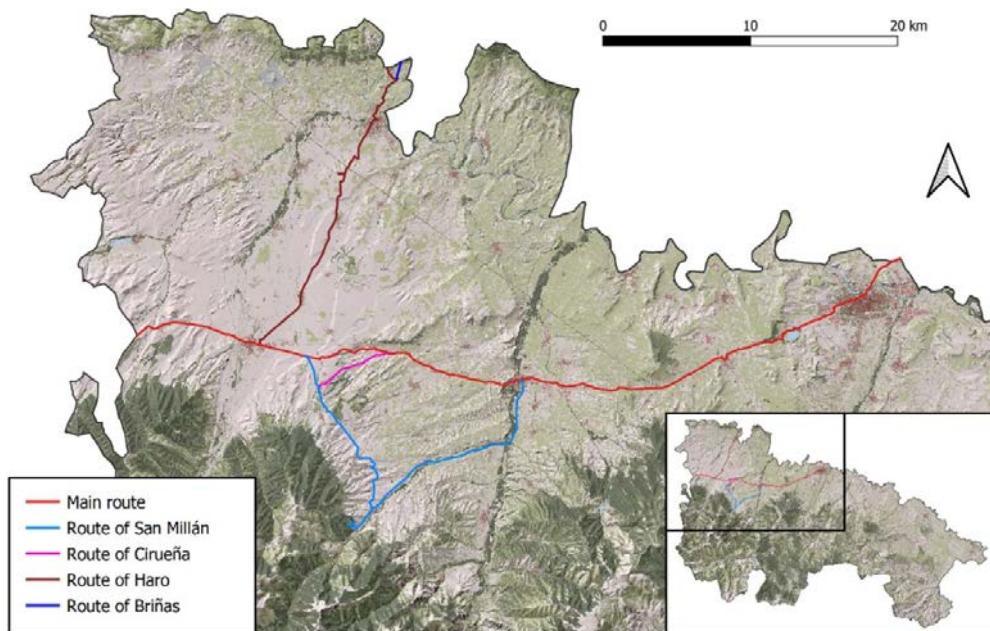
The  $GAPT_i$  values in each of the cells in the studied area are collected in a raster dataset, which can be visually analysed in the form of a map. In this way, it is possible to easily visualize those areas with a lower  $GAPT$  value which are therefore candidates for the installation of PV plants under an objective visibility criterion. Note that the purpose of the proposed methodology is to be able to choose the place within the study area where a new PV plant with certain characteristics can be built with the least observability by visitors who move along the routes in that area.

This methodology can be applied to tourist areas or areas with unique qualities where, due to their location or their relationship with the landscape, it is necessary to determine those sites where the presence of new PV plants would be less harmful in terms of the visual impact. A similar case is its application to areas close to historical sites and landmarks, since PV facilities visible from these locations can have a negative impact on the perception of their cultural value [39]. The visual impact in places with a great cultural heritage has become a controversial topic [40] and, in general, the methodology proposed in this work can be used for evaluating the construction of new PV plants in locations that, due to their cultural heritage and their cultural, historical or landscape value, have to be preserved [41].

## 3. Case Study

We have applied the proposed methodology to the region of La Rioja in northern Spain. Specifically, the selected area of study corresponds to the area crossed by the Way of St. James. Figure 3 shows, in the bottom right corner, the region of La Rioja, and the studied area. The Way of Saint James is a world-renowned pilgrimage route that runs through northern Spain, from the western range of the Pyrenees to the city of Santiago de Compostela, in the northwest of the country. In 1993 it was declared a World Heritage Site by UNESCO, forming part of the cultural legacy of Europe, one of the most varied in the world [42].

In the studied area, the Way of St. James does not have a single route, rather it has different variants or branches that run through different towns and places with great cultural richness close to the main route and where it is possible to visit sanctuaries, temples and other monuments that are part of the cultural heritage of the region. The main route crossing La Rioja was established at the beginning of the 11th century. In addition to the historical and cultural interest of the Way, the different routes in La Rioja cross through vineyards that constitute an environment of special landscape beauty. The five routes of the Way in La Rioja are shown in Figure 3 and these are: main route, route of San Millán, route of Cirueña, route of Haro, and route of Briñas.



**Figure 3.** Way of Saint James through La Rioja (Spain).

In this work, the possible potential observers correspond to pilgrims walking along each of the five routes, while the inhabitants of the urban centres, included in the study area, have not been considered. Data related to pilgrimages have been taken from periodic statistical reports published by the Pilgrim's Office in the city of Santiago de Compostela. For this work, data referring to pilgrimages during the year 2019 have been used [43]. In that year, about 190,000 pilgrims walked these routes of the Way.

A PV system with a two-axis tracker has been selected for the construction of new PV plants in this case study. Each system can support up to 10 kW of power, depending on the type of PV module installed. The height of such a tracker is not constant throughout the day and its value varies depending on the elevation angle of the sun (angle between the sun's rays and the horizontal plane). The maximum height  $H_{pv}$  that can be reached by this facility is 6 m above the ground, mainly in the early and late hours of the day. This height was selected for this study because it is the most unfavourable value from the visibility criterion. The area occupied by a single tracker is approximately  $625 \text{ m}^2$ , including the terrain corresponding to transit areas.

In the GIS tool the main input data are the DSM and the DTM of the area of study. According to data from the National Geographic Institute of Spain [44], the DSM was obtained from flights made during the summer of 2016. This geographic data is composed of a set of square cells with an initial size of  $2.5 \times 2.5 \text{ m}$ . Using resampling techniques, the original DSM was converted to a DSM with a cell size of  $25 \times 25 \text{ m}$ . We used the nearest neighbour interpolation as the resampling method, which is one of the fastest interpolation methods. With this method, each cell or pixel of the resampled raster data acquires the same value as its nearest neighbour in the original raster. Originally, the DTM had a cell size of  $25 \times 25 \text{ m}$ ; therefore, it was not necessary to apply sampling techniques. The final cell size was chosen according to the size occupied by a two-axis solar tracker with a capacity of 10 kW. In other words, each solar tracker would occupy the geographic area represented by a single cell in GIS.

#### 4. Results and Discussion

In order to evaluate the values of the GAPT variable in the region under study, the stages described above in Section 2 have been followed:

1. Using a GIS tool and considering the cell size of the DSM, equidistant nodes were generated every 25 m ( $d_n = 25 \text{ m}$ ) along each route of the Way of St. James. The points

- corresponding to each of the five routes were collected in different vector data layers, in whose attribute tables, each node had associated data such as the average height above the ground of the observer's eyes (1.61 m in this study), and the maximum height  $H_{pv}$  above the ground of the PV facility ( $H_{pv} = 6$  m);
2. GIS tools were used to obtain the value of the pilgrim's walking speed  $ws_n$  associated with each node  $n$ . This value was obtained applying expression (2). The value of walking speed was calculated for all the nodes of the five routes in the studied area;
  3. The average observation time,  $t_n$ , was calculated for each node, dividing the real distance between consecutive nodes  $D_n$  by the value of the observer's walking speed  $ws_n$  at that node;
  4. With the suitable GIS tool, a Euclidean distance raster map was generated for each node  $n$ , what allows to generate a new raster dataset containing the weight factor  $w_{i,n}$ ;
  5. Several repeated visibility analyses were performed to calculate the visible height factor  $fhv_{i,n}$  of the future PV plant placed in the cell  $i$ , following the methodology described in Section 2. Note that the length of the segment used in this case study was 1 m ( $h_{seg} = 1$  m) and, therefore, a set of six binary raster maps was obtained. Afterwards, using map algebra GIS tools, expression (3) was applied, obtaining a raster map with the values of the  $fhv_{i,n}$  factor as a result, which represents the fraction of the PV facility located in the cell  $i$ , that can be seen from node  $n$ ;
  6. The skyline index  $Isk_{i,n}$  was evaluated using the expression (4). For each node  $n$ , two raster maps were obtained, each one storing the values of  $\theta h_{i,n}$  and  $\theta f_{i,n}$ , respectively, in cell  $i$ . Then, using map algebra techniques, the  $Isk_{i,n}$  index was determined, which made it possible to give more weight to the visibility of future PV plants that could be seen above the skyline.

Next, taking into account the annual number of walkers traveling all the nodes of each of the five routes,  $NOY_k$ , the expression (6) was applied, obtaining a raster map in which each cell  $i$  represented the value of the accumulated perception time  $APT_{i,k}$ , achieved by the PV plant placed in that cell.

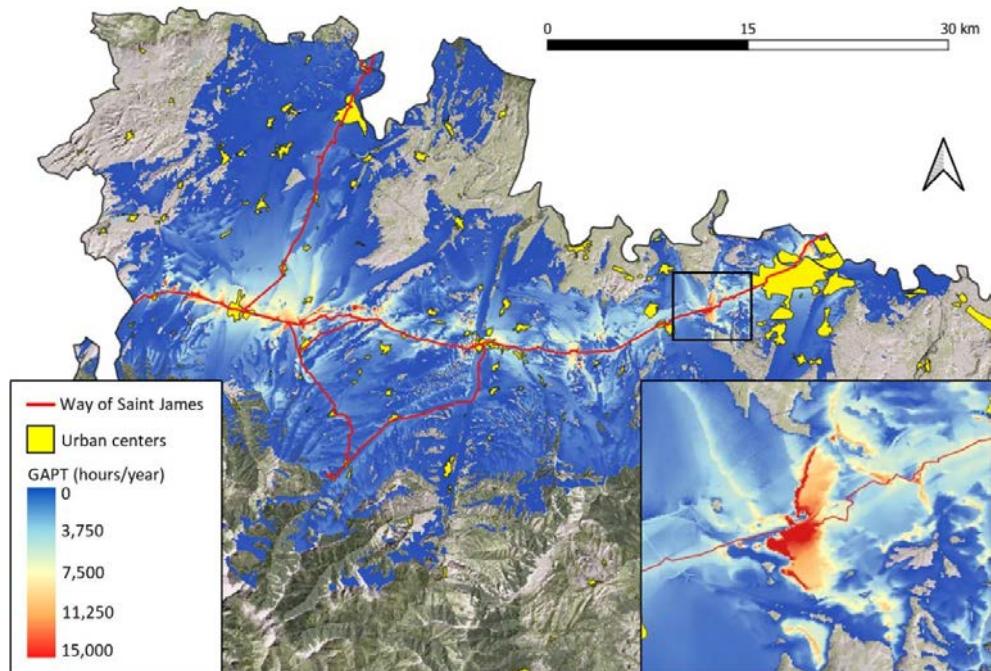
The volume of data in the raster format obtained in the calculation process was so high that R functions [45] were used to speed up this process and to automate access to the geo-algorithms integrated in QGIS from outside QGIS [46].

Finally, the expression (7) was applied to obtain the global value of accumulated perception time in each cell  $i$  ( $GAPT_i$ ). Applying the described methodology to the selected study area, the  $GAPT$  map shown in Figure 4 was obtained.

In the area of study, the urban centres are represented by yellow polygons and the different routes of the Way of St James are represented by red lines. The cells that show the DEM as background (green and grey cells at the top and bottom of Figure 4) represent the areas that have a zero  $GAPT$  value and correspond to sites where the PV facilities are not visible from the routes, or to sites that are at a greater distance than the established limit of vision (10 km in our case study). These cells will be the best areas for the location of this type of solar facilities, from the point of view of their low observability from the routes of the Way of Saint James. The blue cells represent the lowest non-zero  $GAPT$  values, while the red cells represent the zones with the highest  $GAPT$  values and are therefore zones that should be avoided when it comes to the installation of PV plants. We can observe that the cells with higher  $GAPT$  values are relatively near the main route (route 1). The main reason is that it corresponds to the route most used by pilgrims traveling to Santiago de Compostela. The routes that generally cross geographic areas with gentle depressions and elevations do not have too many natural obstacles and PV plants in such areas can reach significant values of cumulative perception time.

The lower right corner of Figure 4 shows a zoom of the area marked by a black rectangle. It is an area with gentle mountains and low vegetation, therefore, there is a greater number of cells with high  $GAPT$  values. This is mainly due to the fact that a significant part of the facilities can be seen crossing the horizon line and having the sky

as a background in these locations. Therefore, the observability of a PV plant such as the proposed one will be higher.



**Figure 4.** GAPT map, in hours/year, of the study area.

The results obtained provide accurate visibility maps with which it is easy to identify the locations where the installation of a future PV plant will have less visual impact for pilgrims walking along the Way of Saint James. The fundamental idea is to preserve the areas that surround and, above all, can be seen from the Way, so that they preserve its cultural legacy and previously held image.

In this case study, we have only analysed a 10 kW PV plant (each tracker occupies one cell of the map). Generally, the projected facilities will be much larger, and more cells will be required to cover the entire area occupied by the future facility. The solution to this problem is to select zones containing contiguous cells with low GAPT values.

## 5. Conclusions

The construction of new PV plants contributes to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions but does not have the support of all the parties involved. In areas that have a high landscape value or in tourist areas, this type of facility can be opposed by the population due to its visual impact. This work has presented a methodology, based on GIS, to determine the places where future PV facilities will have a greater or lesser visibility for a set of potential observers in movement, and its application to geographical areas with special landscape or cultural protection. The methodology is based on an objective measure: the accumulated perception time for all the potential observers.

The perception that observers have of this type of facility is estimated by means of a variable called Accumulated Perception Time,  $APT_{i,k}$ . This variable represents the cumulative value of the possible hours per year in which the proposed PV plant, located in cell  $i$ , can be seen by observers travelling along all the observation points of route  $k$ . In order to make a more appropriate assessment of observability, two factors have been included in the calculation of  $APT_{i,k}$ : the factor  $f_{hv_{i,n}}$ , which considers the visible part of the PV facility placed in the cell  $i$ , from observation point  $n$ , and the skyline index,  $Isk_{i,n}$ , which takes into account the part of the facility that can be seen above the horizon. This makes it possible to present a greater degree of visibility to facilities that can be seen partially or totally above the horizon.

By calculating the values obtained for the  $APT_{i,k}$  variables of each route  $k$  in the area studied, the  $GAPT_i$  variable is evaluated. This variable represents the global cumulative value of hours per year in which the future PV plant, placed in the cell  $i$ , can be seen by all observers travelling along all routes  $k$  in the area under study. It is possible to generate maps that graphically represent the value of the  $GAPT$  variable, by means of the use of GIS tools. With these maps, the agents involved in the construction of PV plants can easily identify those locations in the study area with lower  $GAPT$  values and which will therefore be more suitable for the installation of PV plants, based objectively on their observability.

As a case study, we have applied this methodology to one of the most famous pilgrimage routes. Specifically, the study area is the section of the Way of Saint James that crosses the region of La Rioja in northern Spain. The observers that have been considered correspond to the pilgrims that walk along all routes of the Way in this region. The result is a raster dataset that represents the value of the  $GAPT$  variable, in which it is possible to identify those places which have lower values and which, therefore, will be more suitable for the installation of PV plants based on their low observability from the Way of Saint James.

Some of the limitations of the proposed methodology, that will be addressed in future works, focus on the following issues:

- A high computational effort is required to achieve detailed results. Each visibility analysis for different heights of the PV facility produces a raster map.
- All the nodes of the routes have been considered as waypoints for the observers. In a more detailed analysis, a special treatment could be considered for some of these nodes corresponding to places on the Way of St. James where pilgrims usually stop on their way: viewpoints, fountains or rest areas. The  $APT_{i,n}$  value for these nodes should be proportional to the average stopping time of pilgrims at such locations.
- The visual impact caused by glares from PV panels has not been taken into account.

The methodology described here is easily applicable to different routes, observers with different characteristics, and photovoltaic facilities with different dimensions, etc. In such cases, it would suffice to introduce the appropriate values of the factors that intervene in the calculation of the  $GAPT$  variable. The results obtained are easily interpretable and can be used by decision-makers (investors and local authorities) to plan new PV plants in areas with special cultural, historical or landscape value. The methodology can also be applied to other types of facilities (wind turbines, electricity pylons, communications antennas and buildings), taking appropriate values for the cell size and the maximum height of the projected facility.

**Author Contributions:** Conceptualization, L.A.F.-J. and E.Z.-A.; methodology, L.A.F.-J. and E.Z.-A.; software, E.Z.-A., P.J.Z.-S., M.M.-V., E.G.-G. and C.C.-V.; validation, P.J.Z.-S., M.M.-V., P.M.L.-S. and C.C.-V.; formal analysis, E.Z.-A., M.M.-V. and A.F.; investigation, P.J.Z.-S., P.M.L.-S., E.G.-G. and C.C.-V.; resources, P.M.L.-S., E.G.-G., A.F. and C.C.-V.; data curation, P.J.Z.-S., M.M.-V., P.M.L.-S., A.F. and C.C.-V.; writing—original draft preparation, E.Z.-A.; writing—review and editing, L.A.F.-J. and E.Z.-A.; visualization, L.A.F.-J., P.J.Z.-S., M.M.-V., P.M.L.-S., E.G.-G. and A.F.; supervision, L.A.F.-J.; project administration, L.A.F.-J.; funding acquisition, L.A.F.-J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by University of La Rioja and Banco Santander (REGI2020-28).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Not applicable.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Abbreviations

DEM	Digital Elevation Model
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
GIS	Geographic Information System
PV	Photovoltaic
$APT_{i,n}$	Accumulated perception time in cell $i$ , with the observers located at node $n$ (h/y)
$APT_{i,k}$	Accumulated perception time in cell $i$ by all observers moving along route $k$ (h/y)
$d_n$	Distance in the horizontal plane between nodes $n$ and $n + 1$ (meters)
$D_n$	True distance between nodes $n$ and $n + 1$ (meters)
$d_{i,n}$	Euclidean distance between cell $i$ and node $n$ (meters)
$fhv_{i,n}$	Visible height factor of a PV plant placed in cell $i$ and viewed from node $n$
$fv_{i,n}^h$	Visibility factor of a PV plant of height $h$ , placed in cell $i$ and viewed from node $n$
$GAPT_i$	Global Accumulated Perception Time in cell $i$
$h$	Analysed height of the PV plant (meters)
$H_{pv}$	Maximum height of the PV plant (meters)
$h_{seg}$	Segment length by which the height of the PV plant is increased in the visibility analysis
$i$	Geographic elemental area or cell with the possibility of housing a PV plant
$Isk_{i,n}$	Skyline index for a PV plant placed in cell $i$ and viewed from node $n$
$k$	Any route considered in the study area
$n$	Observation point or node contained in route $k$
$N_k$	Total number of routes in the study area
$N_n$	Total number of nodes on route $k$
$NOY_k$	Annual number of potential observers moving along the route $k$
$t_n$	Average observation time when the observer moves from node $n$ to node $n + 1$ (hours)
$w_{i,n}$	Weighting factor calculated as a function of distance $d_{i,n}$
$ws_n$	Walking speed of the observer at node $n$ (km/h)
$\delta_n$	Angle of the terrain slope in the direction of travel of the observer
$\theta f_{i,n}$	Elevation angle of the line of sight between node $n$ and the top of the PV plant in cell $i$
$\theta h_{i,n}$	Elevation angle of the line of sight connecting the observer's eyes at $n$ with the horizon, beyond cell $i$

## References

- Bachner, G.; Steininger, K.W.; Williges, K.; Tuerk, A. The economy-wide effects of large-scale renewable electricity expansion in Europe: The role of integration costs. *Renew. Energy* **2019**, *134*, 1369–1380. [[CrossRef](#)]
- Al Garni, H.Z.; Awasthi, A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Appl. Energy* **2017**, *206*, 1225–1240. [[CrossRef](#)]
- Carrión, J.A.; Estrella, A.E.; Dols, F.A.; Toro, M.Z.; Rodríguez, M.; Ridao, A.R. Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2008**, *12*, 2358–2380. [[CrossRef](#)]
- Xu, Y.; Li, Y.; Zheng, L.; Cui, L.; Li, S.; Li, W.; Cai, Y. Site selection of wind farms using GIS and multi-criteria decision making method in Wafangdian, China. *Energy* **2020**, *207*, 118222. [[CrossRef](#)]
- Eroğlu, H. Multi-criteria decision analysis for wind power plant location selection based on fuzzy AHP and geographic information systems. *Environ. Dev. Sustain.* **2021**, *23*, 18278–18310. [[CrossRef](#)]
- Terkenli, T.; Skowronek, E.; Georgoula, V. Landscape and Tourism: European Expert Views on an Intricate Relationship. *Land* **2021**, *10*, 327. [[CrossRef](#)]
- Mouflis, G.D.; Gitas, I.Z.; Iliadou, S.; Mitri, G.H. Assessment of the visual impact of marble quarry expansion (1984–2000) on the landscape of Thasos island, NE Greece. *Landsc. Urban Plan.* **2008**, *86*, 92–102. [[CrossRef](#)]
- Ioannidis, R.; Koutsoyiannis, D. A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact. *Appl. Energy* **2020**, *276*, 115367. [[CrossRef](#)]
- Cohen, J.J.; Reichl, J.; Schmidthaler, M. Re-focussing research efforts on the public acceptance of energy infrastructure: A critical review. *Energy* **2014**, *76*, 4–9. [[CrossRef](#)]
- Sibille, A.D.C.T.; Cloquell-Ballester, V.-A.; Cloquell-Ballester, V.-A.; Darton, R. Development and validation of a multicriteria indicator for the assessment of objective aesthetic impact of wind farms. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13*, 40–66. [[CrossRef](#)]
- Bishop, I.D. The implications for visual simulation and analysis of temporal variation in the visibility of wind turbines. *Landsc. Urban Plan.* **2019**, *184*, 59–68. [[CrossRef](#)]

12. Maslow, N.; Claramunt, C.; Wang, T.; Tang, T. Method to estimate the visual impact of an offshore wind farm. *Appl. Energy* **2017**, *204*, 1422–1430. [[CrossRef](#)]
13. Torres-Sibile, A.d.C.; Cloquell-Ballester, V.A.; Cloquell-Ballester, V.A.; Artacho Ramírez, M.Á. Aesthetic impact assessment of solar power plants: An objective and a subjective approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13*, 986–999. [[CrossRef](#)]
14. Chiabrandi, R.; Fabrizio, E.; Garnero, G. The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: Definition of impacts and assessment of the glare risk. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13*, 2441–2451. [[CrossRef](#)]
15. Moser, D.; Vettorato, D.; Vaccaro, R.; Del Buono, M.; Sparber, W. The PV Potential of South Tyrol: An Intelligent Use of Space. *Energy Procedia* **2014**, *57*, 1392–1400. [[CrossRef](#)]
16. Munkhbat, U.; Choi, Y. GIS-Based Site Suitability Analysis for Solar Power Systems in Mongolia. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 3748. [[CrossRef](#)]
17. Rodrigues, M.; Montañés, C.; Fueyo, N. A method for the assessment of the visual impact caused by the large-scale deployment of renewable-energy facilities. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2010**, *30*, 240–246. [[CrossRef](#)]
18. Manchado, C.; Gomez-Jauregui, V.; Lizcano, P.E.; Iglesias, A.; Galvez, A.; Otero, C. Wind farm repowering guided by visual impact criteria. *Renew. Energy* **2019**, *135*, 197–207. [[CrossRef](#)]
19. Hurtado, J.; Fernández, J.; Parrondo, J.L.; Blanco, E. Spanish method of visual impact evaluation in wind farms. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2004**, *8*, 483–491. [[CrossRef](#)]
20. Molina-Ruiz, J.; Sánchez, M.J.M.; Pérez-Sirvent, C.; Serrano, M.L.T.; Lorenzo, M.L.G. Developing and applying a GIS-assisted approach to evaluate visual impact in wind farms. *Renew. Energy* **2011**, *36*, 1125–1132. [[CrossRef](#)]
21. Wróżyński, R.; Sojka, M.; Pyszny, K. The application of GIS and 3D graphic software to visual impact assessment of wind turbines. *Renew. Energy* **2016**, *96*, 625–635. [[CrossRef](#)]
22. Garcia-Garrido, E.; Lara-Santillan, P.; Zorzano-Alba, E.; Mendoza-Villena, M.; Zorzano-Santamaria, P.; Fernandez-Jimenez, L.A.; Falces, A. Visual impact assessment for small and medium size PV plants. In Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Prague, Czech Republic, 24–26 September 2012; pp. 57–61.
23. Fernandez-Jimenez, L.A.; Mendoza-Villena, M.; Zorzano-Santamaria, P.; Garcia-Garrido, E.; Lara-Santillan, P.; Zorzano-Alba, E.; Falces, A. Site selection for new PV power plants based on their observability. *Renew. Energy* **2015**, *78*, 7–15. [[CrossRef](#)]
24. Florio, P.; Probst, M.C.M.; Schüler, A.; Roecker, C.; Scartezzini, J.-L. Assessing visibility in multi-scale urban planning: A contribution to a method enhancing social acceptability of solar energy in cities. *Sol. Energy* **2018**, *173*, 97–109. [[CrossRef](#)]
25. Pham, V.-M.; Van Nghiêm, S.; Van Pham, C.; Luu, M.P.T.; Bui, Q.-T. Urbanization impact on landscape patterns in cultural heritage preservation sites: A case study of the complex of Hué Monuments, Vietnam. *Landsc. Ecol.* **2021**, *36*, 1–26. [[CrossRef](#)]
26. Ashrafi, B.; Kloos, M.; Neugebauer, C. Heritage Impact Assessment, beyond an Assessment Tool: A comparative analysis of urban development impact on visual integrity in four UNESCO World Heritage Properties. *J. Cult. Herit.* **2021**, *47*, 199–207. [[CrossRef](#)]
27. QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System. Available online: <https://www.qgis.org/en/site/> (accessed on 28 January 2021).
28. Fisher, P.F. Extending the applicability of viewsheds in landscape planning. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **1996**, *62*, 1297–1302.
29. UNESCO. Routes of Santiago de Compostela: Camino Francés and Routes of Northern Spain. Available online: <https://whc.unesco.org/en/list/669> (accessed on 10 September 2021).
30. Polidori, L.; El Hage, M. Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote. Sens.* **2020**, *12*, 3522. [[CrossRef](#)]
31. Bishop, I. Testing perceived landscape colour difference using the Internet. *Landsc. Urban Plan.* **1997**, *37*, 187–196. [[CrossRef](#)]
32. Ogburn, D.E. Assessing the level of visibility of cultural objects in past landscapes. *J. Archaeol. Sci.* **2006**, *33*, 405–413. [[CrossRef](#)]
33. Fisher, P.F. Probable and fuzzy models of the viewshed operation. In *Innovations in GIS*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1994; pp. 161–175.
34. Weigel, J. Kompensationsflächenberechnung für Freileitungen. Available online: <https://www.yumpu.com/de/document/read/6771445/kompensationsflächenberechnung-für-freileitungen> (accessed on 31 August 2021).
35. Paul, H.-U.; Uther, D.; Neuhoff, M.; Winkler-Hartenstein, K.; Schmidkunz, H.; Grossnick, J. GIS-gestütztes Verfahren zur Bewertung visueller Eingriffe durch Hochspannungsfreileitungen. *Nat. Und Landschaftsplan. Z. Für Angew. Okol.* **2004**, *36*, 139–144.
36. Pérez, J.M.; Vallejo, I.; Álvarez-Francoso, J.I. Estimated travel time for walking trails in natural areas. *Geogr. Tidsskr.-Danish J. Geogr.* **2017**, *117*, 53–62. [[CrossRef](#)]
37. Fontani, F. Application of the Fisher's "Horizon Viewshed" to a proposed power transmission line in Nozzano (Italy). *Trans. GIS* **2016**, *21*, 835–843. [[CrossRef](#)]
38. Caha, J.; Rášová, A. Line-of-Sight Derived Indices: Viewing Angle Difference to a Local Horizon and the Difference of Viewing Angle and the Slope of Line of Sight. *Lect. Notes Geoinf. Cartogr.* **2015**, *211*, 61–72. [[CrossRef](#)]
39. Serra, J.; Llinares, C.; Iñarra, S.; Torres, A.; Llopis, J. Improvement of the integration of visually impacting architectures in historical urban scene, an application of semantic differential method. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2019**, *81*, 106353. [[CrossRef](#)]
40. Jerpåsen, G.B.; Larsen, K.C. Visual impact of wind farms on cultural heritage: A Norwegian case study. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2011**, *31*, 206–215. [[CrossRef](#)]

41. CETS 199—Council of Europe Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society. Available online: <https://rm.coe.int/1680083746> (accessed on 6 September 2021).
42. European Commission Directorate-General for Research and Innovation. *Preserving our Heritage, Improving our Environment. Volume I, 20 Years of EU Research into Cultural Heritage*; Chapuis, M., Ed.; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2009. Available online: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/17146> (accessed on 3 September 2021).
43. Informe Estadístico. 2019. Available online: <http://oficinadelperegrino.com/wp-content/uploads/2016/02/peregrinaciones2019.pdf> (accessed on 24 August 2021).
44. Instituto Geográfico Nacional. Available online: <https://www.ign.es/web/ign/portal> (accessed on 4 September 2021).
45. R Development Core Team. The R project for statistical computing, R version 3.5.2. 2018. Available online: <https://www.r-project.org> (accessed on 2 September 2021).
46. Lovelace, R.; Nowosad, J.; Muenchow, J. *Geocomputation with R*; Chapman and Hall/CRC: Boca Raton, FL, USA, 2019.











UNIVERSIDAD  
DE LA RIOJA