

# Análisis de impacto ambiental de parques solares fotovoltaicos en zonas protegidas de Cataluña mediante SIG y modelos predictivos



Universitat Oberta  
de Catalunya

---

**Antonio Fernández Silbereis**

Servicios basados en localización y espacio inteligente

Grado en Ing. de Tecnol. y Servicios de Telecomunicación

Nombre del tutor/a de TF:  
**Anna Muñoz Bolas**

Nombre del/de la PRA:  
Antoni Pérez-Navarro

3 de junio de 2025



Esta obra esta sujeta a una licencia de Reconocimiento

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/es/>

## Ficha Del Trabajo Final

<b>Título del trabajo:</b>	Análisis de impacto ambiental de parques solares fotovoltaicos en zonas protegidas de Cataluña mediante SIG y modelos predictivos
<b>Nombre del autor/a:</b>	Antonio Fernández Silbereis
<b>Nombre del tutor/a de TF:</b>	Anna Muñoz Bolas
<b>Nombre del/de la PRA:</b>	Antoni Pérez-Navarro
<b>Fecha de entrega:</b>	3 de junio de 2025
<b>Titulación o programa:</b>	Grado en Ing. de Tecnol. y Servicios de Telecomunicación
<b>Área del trabajo final:</b>	Servicios basados en localización y espacio inteligente
<b>Idioma del trabajo:</b>	Castellano
<b>Palabras clave:</b>	impacto ambiental, SIG, parques solares, Cataluña, modelos predictivos, zonas protegidas, sostenibilidad, fragmentación de hábitats, análisis espacial

### Resumen del trabajo

El crecimiento de las energías renovables es fundamental para alcanzar los objetivos de sostenibilidad, sin embargo, la instalación de parques solares fotovoltaicos en zonas cercanas a áreas protegidas puede generar un impacto ambiental significativo. Este proyecto se centra en evaluar el impacto de estos parques solares en la fragmentación de hábitats y la biodiversidad en Cataluña mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos predictivos.

A través del análisis espacial con QGIS y el tratamiento de datos geoespaciales en Python, se ha llevado a cabo un estudio detallado para identificar la proximidad de infraestructuras solares a zonas protegidas, evaluar la conectividad ecológica y analizar los posibles efectos adversos sobre los ecosistemas locales. Además, se explorarán modelos predictivos sencillos, como regresiones y clasificadores, para estimar el impacto ambiental a largo plazo.

El resultado esperado es proporcionar una visión clara y fundamentada del impacto ambiental asociado a las infraestructuras solares, ofreciendo una herramienta valiosa para la toma de decisiones en el desarrollo de futuros proyectos energéticos en Cataluña. Con ello, se pretende contribuir al equilibrio entre la promoción de energías limpias y la conservación de la biodiversidad, garantizando un desarrollo más sostenible y respetuoso con el entorno natural.

**Abstract**

The growth of renewable energies is essential to achieve sustainability goals; however, the installation of photovoltaic solar parks near protected areas can have a significant environmental impact. This project focuses on evaluating the impact of these solar parks on habitat fragmentation and biodiversity in Catalonia through the use of Geographic Information Systems (GIS) and predictive models.

Using spatial analysis with QGIS and geospatial data processing in Python, a detailed study was conducted to identify the proximity of solar infrastructures to protected areas, assess ecological connectivity, and analyze potential adverse effects on local ecosystems. Additionally, simple predictive models such as regressions and classifiers will be explored to estimate the long-term environmental impact.

The expected outcome is to provide a clear and well-supported vision of the environmental impact associated with solar infrastructures, offering a valuable tool for decision-making in the development of future energy projects in Catalonia. This project aims to contribute to balancing the promotion of clean energy with biodiversity conservation, ensuring more sustainable and environmentally friendly development.

# Agradecimientos

Este trabajo marca el final de una aventura de más de 4 años desde que inicié el Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, pero también la finalización de un sueño de 25 años. Ha sido un camino lleno de retos, de días mejores y peores, de muchas noches y fines de semana de dedicación exclusiva. Pero ha sido un camino lleno de aprendizaje inimaginable al comenzar, pero sin embargo, sabiendo cada día que el propósito valía la pena.

Por ello, también quisiera agradecer a todas esas personas que han estado acompañándome en este viaje:

- A Ania y Alan, los "feitos", por su gran tolerancia e infinita paciencia estos últimos años.
- A Carmen y Antonio, mis padres, y Roberto, mi hermano. Ellos bien saben lo que esto significa para mí.
- A Jonatan, que creía más en mí de lo que yo mismo creía.
- A Anna Muñoz, sin cuyo inmenso conocimiento y gran guía este trabajo no hubiera sido posible.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
1.1. Contexto y justificación del trabajo	11
1.2. Motivación	13
1.3. Objetivos del trabajo	14
1.3.1. Objetivos generales	14
1.3.2. Objetivos específicos	14
1.4. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	16
1.4.1. Inclusión de la perspectiva de género	16
1.4.2. Identificación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	16
1.5. Enfoque y método seguido	17
1.5.1. Estrategia general del proyecto	17
1.5.2. Metodología de gestión del proyecto	18
1.6. Planificación del trabajo	19
1.6.1. Descripción de tareas	19
1.6.2. Diagrama de Gantt	22
1.6.3. Descripción de recursos	23
1.7. Breve resumen de productos obtenidos	24
<b>2. Estado del arte</b>	<b>25</b>
2.1. Investigaciones previas sobre el análisis de impacto ambiental mediante SIG	25
2.2. Análisis de estudios que utilicen modelos predictivos en contextos ambientales	28
2.3. Evaluación de metodologías aplicadas en otros proyectos para adaptar las mejores prácticas	29
2.4. Selección de herramientas, librerías y datasets	32
2.4.1. Herramientas SIG	32
2.4.2. Herramientas de visualización y dashboards existentes	32
2.4.3. Librerías y lenguajes de análisis	32
2.4.4. Fuentes y tipos de datos	33
2.5. Ajuste de objetivos y metodología según el estado del arte	34
2.6. Actualización de la memoria del proyecto	36
<b>3. Diseño e implementación</b>	<b>37</b>
3.1. Preparar el entorno de trabajo con QGIS, PostgreSQL/PostGIS, Python y Visual Studio Code	37
3.1.1. QGIS	37

3.1.2.	Python . . . . .	37
3.1.3.	Visual Studio Code . . . . .	38
3.2.	Obtener y preprocesar los datos geoespaciales necesarios (zonas protegidas, parques solares, datos ambientales) . . . . .	39
3.2.1.	Zonas protegidas . . . . .	39
3.2.2.	Instalaciones solares fotovoltaicas . . . . .	42
3.2.3.	Cobertura del suelo . . . . .	43
3.2.4.	Elevación del suelo . . . . .	44
3.2.5.	Capa de conectividad ecológica . . . . .	45
3.2.6.	Revisión de indicadores según el modelo estatal . . . . .	46
3.3.	Realizar el análisis SIG para evaluar la proximidad de parques solares a zonas protegidas . . . . .	47
3.3.1.	Objetivo del análisis . . . . .	47
3.3.2.	Datos utilizados . . . . .	47
3.3.3.	Análisis de proximidad a zonas protegidas . . . . .	47
3.3.4.	Marco metodológico y buenas prácticas ambientales del MITECO . . . . .	49
3.4.	Implementar modelos predictivos para analizar la fragmentación de hábitats . . . . .	53
3.4.1.	Unidad de análisis . . . . .	55
3.4.2.	Variables del modelo . . . . .	59
3.4.3.	Modelos a aplicar . . . . .	59
3.4.4.	Conclusión . . . . .	60
3.5.	Evaluar el rendimiento de los modelos (métricas de clasificación/regresión) . . . . .	61
3.5.1.	Evaluación del modelo de regresión . . . . .	62
3.5.2.	Evaluación del modelo de clasificación . . . . .	64
3.6.	Generar mapas temáticos y gráficos que visualicen los resultados obtenidos . . . . .	65
3.6.1.	Visualización del modelo de regresión . . . . .	65
3.6.2.	Visualización del modelo de clasificación . . . . .	66
<b>4.</b>	<b>Entrega Final (Memoria y Producto)</b>	<b>67</b>
4.1.	Conclusiones finales . . . . .	67
4.2.	Líneas futuras y mejoras del modelo . . . . .	68
4.3.	Revisar la perspectiva de género y alineamiento con los ODS . . . . .	69
4.4.	Producto obtenido: publicación del código y datos en un repositorio de GitHub . . . . .	70
<b>5.</b>	<b>Glosario</b>	<b>71</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>



# Índice de figuras

1.1. Diagrama de Gantt del proyecto . . . . .	22
2.1. Potencial de instalación de parques solares según (D) <i>land sparing</i> y (E) <i>land sharing</i> . Adaptado de Ascensao et al. (2023) [1]. . . . .	26
3.1. Visualización de la capa <b>ESPAISNATURALS_ENPE</b> (Espais Naturals de Protecció Especial) cargada en QGIS. Fuente: elaboración propia. . . . .	40
3.2. Visualización de la capa <b>ESPAISNATURALS_PEIN</b> (Pla d’Espais d’Interès Natural) cargada en QGIS. Elaboración propia. . . . .	41
3.3. Visualización de las cuatro capas de zonas protegidas cargadas y superpuestas en QGIS. Fuente: elaboración propia. . . . .	42
3.4. Visualización de la capa topografía territorial con todos sus elementos activos. Fuente: ICGC [2] mostrado a través de QGIS. . . . .	43
3.5. Visualización de la capa cobertura de usos del suelo con todos sus clases visibles. Fuente: ICGC [3] . . . . .	44
3.6. Visualización de la capa conectividad con simbología original. Fuente: ICGC[4] . . . . .	45
3.7. Visualización de diferentes parques solares marcados en rojo y su distancia más corta a zonas protegidas en el este de Cataluña marcadas en violeta. Fuente: Elaboración propia a través de QGIS. . . . .	48
3.8. Visualización de los dos parques solares Ramon Escriche. Véase como uno de ellos linda directamente con el límite de la zona protegida de las <i>Riberes i Illes de l'Ebre</i> . Fuente: elaboración propia a través de QGIS. . . . .	50
3.9. Visualización del dataset <i>Critical Habitats</i> obtenido de la plataforma Kaggle y representado sobre el mapa del estado de Connecticut (EE. UU.) mediante QGIS. La imagen muestra polígonos correspondientes a áreas naturales clasificadas como hábitats críticos por su valor ecológico. . . . .	53
3.10. Superposición del bosque previsto para 2030 con la cobertura de suelo clasificada de 2006 (bosque y áreas urbanas). Fuente: estudio de fragmentación en el área metropolitana de Twin Cities. [5] . . . . .	54
3.11. Visualización de las zonas protegidas de Catalunya sobre una rejilla cuadrangular de 1 km <sup>2</sup> . Elaboración propia a través de QGIS. . . . .	55
3.12. Visualización de una línea por cada celda (rejilla) de 1 km <sup>2</sup> , que va desde el centroide de esa celda hasta el parque solar más cercano. Fuente: elaboración propia a través de QGIS. . . . .	56

3.13. Visualización de la tabla de atributos con las variables necesarias para la elaboración de nuestro dataset. Fuente: elaboración propia a través de QGIS. . . . .	61
3.14. Script en Python para cargar el dataset. Elaboración propia. . . . .	62
3.15. Script en Python del modelo de regresión lineal. Elaboración propia. . . . .	63
3.16. Relación entre los valores reales y predichos del modelo de regresión lineal. Elaboración propia mediante Python. . . . .	65
3.17. Curva ROC del modelo de clasificación simple (distancia como única variable predictora). Elaboración propia. . . . .	66

# Índice de cuadros

2.1. Comparativa de metodologías aplicadas en la evaluación del impacto ambiental de parques solares. Elaboración propia. . . . .	31
3.1. Distancia mínima desde cada planta solar a la Red Natura 2000 más cercana. Fuente: elaboración propia mediante análisis en QGIS. . . . .	52

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto y justificación del trabajo

En un contexto global en el que la transición hacia energías renovables es una prioridad para mitigar el cambio climático, la instalación de parques solares fotovoltaicos se ha convertido en una solución clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la expansión de estas infraestructuras debe equilibrarse con la conservación del medio ambiente, especialmente cuando se encuentran cerca de zonas protegidas. En Cataluña, como en otras regiones, existe una creciente preocupación sobre cómo estos desarrollos pueden afectar la biodiversidad y la integridad de los hábitats naturales.

Las áreas protegidas, como los Parques Naturales, las reservas de la Red Natura 2000 o las zonas del PEIN (Plan de Espacios de Interés Natural), desempeñan un papel fundamental en la preservación de ecosistemas sensibles. La proximidad de infraestructuras solares a estos espacios podría provocar la fragmentación de hábitats, alterar la fauna y flora locales y comprometer la conectividad ecológica.

Aunque inicialmente no existía una prohibición explícita en la normativa vigente para la instalación de parques solares dentro de estas zonas, leyes como la Ley 12/1985, de Espacios Naturales en Cataluña [6] y la Ley 42/2007, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad [7] establecían principalmente la necesidad de realizar evaluaciones ambientales rigurosas y limitaban actividades que pudieran transformar sensiblemente el entorno natural. Sin embargo, la aceleración del despliegue de las energías renovables distribuidas y participadas, junto con la urgencia de adoptar medidas frente a la emergencia climática, promovió un cambio en la normativa vigente para regular la implantación de plantas solares fotovoltaicas. Así, es el **artículo 9 del Decreto Ley 16/2019**, de 26 de noviembre (modificado por el artículo 133 de la Ley 5/2020, de 29 de abril, y posteriormente por el Decreto Ley 5/2022) el que establece las zonas no compatibles con la instalación de plantas solares fotovoltaicas en Cataluña [8].

Además de la evolución normativa, es crucial destacar que el presente proyecto no solo pretende evaluar el impacto ambiental de las infraestructuras solares en las zonas protegidas de Cataluña, sino también generar un marco metodológico replicable en otros contextos. La combinación de herramientas de **Sistemas de Información Geográfica (SIG)** y **modelos**

**predictivos** permitirá no solo un análisis espacial detallado, sino también prever posibles impactos a largo plazo mediante técnicas de regresión y clasificación.

Esta aproximación ayudará a identificar patrones y factores críticos que influyen en la fragmentación de hábitats y en la conectividad ecológica. De este modo, se podrá ofrecer una visión más amplia y objetiva a las autoridades competentes, contribuyendo a una mejor planificación y gestión territorial que armonice la expansión de las energías renovables con la preservación del medio ambiente.

El proyecto se alinea con los objetivos de la **estrategia sobre la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transportes** del MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico) [9]. En el contexto de los parques solares fotovoltaicos, esta estrategia promueve la planificación de estas infraestructuras de manera que se minimice su impacto en corredores ecológicos y se prioricen zonas ya degradadas o de bajo valor ecológico para su instalación.

Además, el proyecto refuerza el compromiso de Cataluña y España con las metas ambientales de la Unión Europea para 2030 [10], que establece la necesidad de garantizar que el desarrollo de energías renovables, incluidas las plantas solares, se realice de forma compatible con la protección de la biodiversidad. Esto implica evaluar cuidadosamente los proyectos fotovoltaicos en zonas cercanas a áreas protegidas y adoptar medidas de mitigación, como la restauración de hábitats y la creación de zonas de amortiguación que reduzcan la fragmentación de ecosistemas.

Estas acciones contribuyen a un modelo de desarrollo energético sostenible que no solo impulsa la transición energética, sino que también protege los ecosistemas sensibles.

## 1.2. Motivación

Mi motivación para desarrollar este proyecto nace, principalmente, de una combinación de intereses personales y profesionales. Desde siempre, he sido un apasionado de la naturaleza y los mapas, lo cual se traduce en mi afición por el senderismo y las rutas al aire libre, donde combino la geolocalización con mapas físicos y herramientas digitales como un reloj inteligente con GPS. Esta conexión personal con el entorno natural me ha llevado a reflexionar sobre cómo las infraestructuras, incluidas las energías renovables, pueden influir en los ecosistemas sensibles.

Además, mi experiencia académica y profesional ha reforzado este interés. A lo largo de mis estudios, he tenido la oportunidad de trabajar con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y bases de datos espaciales, descubriendo su potencial para analizar el impacto ambiental y apoyar la toma de decisiones basadas en datos. La posibilidad de combinar estos conocimientos con modelos predictivos me resulta especialmente atractiva, ya que no solo permite evaluar el estado actual del entorno, sino también anticipar posibles consecuencias a largo plazo.

El enfoque en parques solares en zonas protegidas de Cataluña también responde a una preocupación real y actual. La transición energética es fundamental para luchar contra el cambio climático, pero debe hacerse de manera equilibrada y respetuosa con la biodiversidad. Con este proyecto, no solo busco desarrollar mis habilidades técnicas, sino también contribuir con un estudio que pueda ser útil para las administraciones locales y las políticas de sostenibilidad.

Finalmente, alinear mi proyecto con las estrategias medioambientales del MITECO y la Unión Europea me motiva aún más, ya que aporta un marco práctico y relevante para aplicar mis conocimientos en un contexto real y aportar mi granito de arena hacia un desarrollo más sostenible.

## 1.3. Objetivos del trabajo

El presente proyecto tiene como objetivo principal evaluar el impacto ambiental de los parques solares fotovoltaicos en zonas protegidas de Cataluña mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos predictivos. Se pretende identificar cómo estas infraestructuras pueden afectar a la fragmentación de hábitats y comprometer la conectividad ecológica, proporcionando así una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el ámbito de la sostenibilidad y la conservación de la biodiversidad.

Para alcanzar este objetivo general, se han definido una serie de objetivos que se estructuran en dos bloques: los objetivos generales orientados al proceso académico y metodológico, y los objetivos específicos técnicos, más centrados en las tareas concretas del proyecto.

### 1.3.1. Objetivos generales

1. Planificar y desarrollar un proyecto SIG para el análisis del impacto ambiental de infraestructuras solares.
2. Investigar el estado del arte sobre el impacto de parques solares en ecosistemas sensibles y la aplicación de modelos predictivos en estudios ambientales.
3. Identificar y recopilar fuentes de datos geoespaciales y ambientales, tanto de acceso público como a través de bases de datos especializadas.
4. Desarrollar una memoria documentada del proyecto, detallando la metodología, los resultados y las conclusiones.
5. Realizar una presentación del proyecto que resuma los principales puntos y resultados.
6. Defender el proyecto ante un tribunal, destacando la aportación metodológica y práctica del estudio.

### 1.3.2. Objetivos específicos

1. Obtener y procesar los datos geoespaciales relevantes, incluidas las capas de parques solares existentes y las zonas protegidas de Cataluña.
2. Realizar un análisis geoespacial detallado utilizando herramientas SIG para evaluar la proximidad de infraestructuras solares a áreas protegidas.
3. Implementar modelos predictivos (regresiones o clasificadores) para evaluar el posible impacto a largo plazo de los parques solares en la fragmentación de hábitats.
4. Analizar estadísticamente los resultados obtenidos para identificar patrones significativos en la interacción entre parques solares y ecosistemas.
5. Generar mapas temáticos e informes visuales que faciliten la interpretación de los resultados y apoyen la toma de decisiones.

6. Proponer recomendaciones basadas en los resultados del análisis, orientadas a minimizar el impacto ambiental de futuras infraestructuras solares.
7. Alinear los resultados con las estrategias medioambientales vigentes, como la de los ecosistemas y conectividad del MITECO y las metas de la Unión Europea en biodiversidad y sostenibilidad.



## 1.4. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

### 1.4.1. Inclusión de la perspectiva de género

En el desarrollo del presente proyecto se ha tenido en cuenta la perspectiva de género de manera transversal. En primer lugar, se utilizará un lenguaje inclusivo y no sexista en toda la documentación, presentaciones y comunicaciones relacionadas con el proyecto. Esto se realizará siguiendo las recomendaciones de la guía de Vicenç Vives para una docencia universitaria con perspectiva de género [11].

Además, en los casos en los que se requiera la evaluación o interpretación de los resultados (por ejemplo, en la validación de los mapas temáticos y en las recomendaciones finales), se considerarán opiniones y perspectivas de personas de diferentes géneros, asegurando que las conclusiones del proyecto sean inclusivas y representativas de la diversidad de la sociedad, evitando de esta manera sesgos que puedan derivar en desigualdades indirectas.

### 1.4.2. Identificación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El proyecto se alinea con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas [12]. En particular, contribuye a los siguientes ODS:

1. **ODS 5:** Igualdad de género. Mediante la inclusión de la perspectiva de género y asegurando que las decisiones y recomendaciones ambientales no generen desigualdades indirectas.
2. **ODS 7:** Energía asequible y no contaminante. Al evaluar el impacto ambiental de los parques solares, el proyecto apoya un desarrollo de infraestructuras renovables más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.
3. **ODS 11:** Ciudades y comunidades sostenibles. Promoviendo la conservación de los ecosistemas cercanos a infraestructuras solares, se favorece un entorno natural saludable para las comunidades locales.
4. **ODS 13:** Acción por el clima. El proyecto contribuye a la mitigación del cambio climático al permitir un mejor diseño y evaluación de proyectos de energía renovable.
5. **ODS 15:** Vida de ecosistemas terrestres. Ayudando a proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y la biodiversidad, el proyecto se alinea directamente con los objetivos de este ODS.

## 1.5. Enfoque y método seguido

Para garantizar el éxito del proyecto, se ha diseñado una metodología de trabajo estructurada que permite alcanzar los objetivos definidos mediante un enfoque riguroso y replicable. La metodología propuesta se basa en la metodología de trabajo en cascada, dado que las tareas del proyecto están claramente delimitadas y el desarrollo es realizado por una sola persona. Esta elección permite un avance secuencial y facilita el control del progreso, asegurando que cada fase se complete correctamente antes de pasar a la siguiente.

### 1.5.1. Estrategia general del proyecto

El proyecto se estructurará en las siguientes fases:

1. **Investigación del estado del arte:** Se realizará una revisión exhaustiva de estudios previos que analicen el impacto ambiental de parques solares fotovoltaicos mediante SIG y modelos predictivos. Esta fase permitirá identificar metodologías y herramientas previamente utilizadas y ayudará a definir el enfoque más adecuado para este proyecto. Se consultarán fuentes académicas, artículos científicos y proyectos similares publicados por instituciones relevantes como el MITECO y la Unión Europea.
2. **Obtención de datos geoespaciales y ambientales:** Se recopilarán datos de acceso abierto desde fuentes oficiales, como el Referencial Topográfico Territorial (RTT) del ICGC, el Hipermapa de Catalunya y las capas de zonas protegidas disponibles a través del MITECO.
3. **Preprocesamiento de datos:** Para asegurar la calidad de los datos recopilados, se realizará un proceso de limpieza y transformación. Este proceso incluirá:
  - a) Verificación de la consistencia de las capas geoespaciales.
  - b) Estandarización de los formatos de los datos.
  - c) Eliminación de valores nulos o atípicos.
  - d) Generación de nuevas variables necesarias para el análisis.
4. **Análisis geoespacial con SIG:** Se utilizarán herramientas SIG como QGIS para realizar análisis espaciales que permitan:
  - a) Evaluar la proximidad de infraestructuras solares a las zonas protegidas.
  - b) Analizar la fragmentación de hábitats mediante métricas espaciales.
  - c) Generar mapas temáticos que visualicen el impacto potencial en la biodiversidad.
5. **Implementación de modelos predictivos:** Se desarrollarán modelos predictivos basados en técnicas de regresión o clasificación para estimar el impacto ambiental a largo plazo. Estos modelos permitirán:
  - a) Identificar patrones de fragmentación de hábitats.
  - b) Predecir posibles riesgos para la conectividad ecológica.

- c) Proponer medidas de mitigación basadas en los resultados del modelo.
6. **Validación y análisis de resultados:** Los resultados obtenidos se contrastarán con estudios previos y se validarán mediante análisis estadísticos y visualización de los datos en mapas temáticos. Se evaluará la precisión de los modelos predictivos y se determinará su aplicabilidad en la toma de decisiones ambientales.
7. **Documentación y presentación de resultados:** Se generará una memoria detallada del proyecto, se elaborará una presentación para defender los resultados ante el tribunal evaluador y se preparará un informe con recomendaciones prácticas para las administraciones locales.

### 1.5.2. Metodología de gestión del proyecto

Aunque se ha optado por la metodología en cascada para el desarrollo técnico del proyecto, se aplicarán algunos principios de las metodologías ágiles, como la revisión continua de los avances y la adaptación flexible ante posibles dificultades técnicas. Se planificarán revisiones periódicas de las tareas, lo cual permitirá realizar ajustes tempranos y minimizar los riesgos del proyecto.

Se utilizará la herramienta de gestión Gantt Project de código abierto para mantener un control detallado de las tareas, asignar tiempos y asegurar el cumplimiento de los hitos del diagrama de Gantt definido en el Plan de Trabajo.

## 1.6. Planificación del trabajo

La planificación del Trabajo Final se estructura en seis fases, coincidiendo con las Pruebas de Evaluación Continua (PEC) definidas en el curso. A continuación, se describen las tareas específicas de cada fase, alineadas con los objetivos generales y específicos del proyecto.

- **PEC1 - Plan de Trabajo.** Definir la temática del trabajo, establecer la planificación y sentar las bases metodológicas y conceptuales del proyecto.
- **PEC2 - Estado del Arte.** Realizar una revisión exhaustiva de investigaciones previas y definir el enfoque metodológico a seguir.
- **PEC3 - Diseño e Implementación.** Desarrollar el análisis de impacto ambiental, implementar los modelos predictivos y realizar el análisis SIG.
- **PEC4 - Entrega Final (Memoria y Producto).** Finalizar la memoria del TFG y preparar todos los materiales necesarios para la entrega.
- **PEC5 - Presentación del Proyecto.** Elaborar y grabar una presentación en vídeo del Trabajo Final.
- **PEC6 - Defensa Pública.** Defender el Trabajo Final ante el tribunal evaluador, respondiendo a las preguntas formuladas.

### 1.6.1. Descripción de tareas

#### PEC1 - Plan de Trabajo (19/2 al 4/3)

- **T1.1** Definir el título y las palabras clave del proyecto.
- **T1.2** Redactar el resumen del proyecto (abstract).
- **T1.3** Contextualizar y justificar la relevancia del trabajo.
- **T1.4** Explicar la motivación personal detrás del proyecto.
- **T1.5** Establecer los objetivos generales y específicos.
- **T1.6** Determinar la metodología de investigación y trabajo.
- **T1.7** Identificar la perspectiva de género aplicable al proyecto.
- **T1.8** Asociar el proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relevantes.
- **T1.9** Planificar las tareas del proyecto con su temporización (diagrama de Gantt).
- **T1.10** Recopilar la bibliografía inicial.

## PEC2 - Estado del Arte (5/3 al 1/4)

- **T2.1** Investigar proyectos previos relacionados con el análisis de impacto ambiental mediante SIG.
- **T2.2** Analizar estudios que utilicen modelos predictivos (regresiones y clasificadores) en contextos ambientales.
- **T2.3** Evaluar metodologías aplicadas en otros proyectos para adaptar las mejores prácticas.
- **T2.4** Seleccionar las herramientas, librerías y datasets a utilizar.
- **T2.5** Refinar los objetivos específicos y la metodología en función del estado del arte encontrado.
- **T2.6** Actualizar la memoria del TFG con la información recabada.

## PEC3 - Diseño e Implementación (2/4 al 6/5)

- **T3.1** Preparar el entorno de trabajo con QGIS, PostgreSQL/PostGIS y Python.
- **T3.2** Obtener y preprocesar los datos geospaciales necesarios (zonas protegidas, parques solares, datos ambientales).
- **T3.3** Realizar el análisis SIG para evaluar la proximidad de parques solares a zonas protegidas.
- **T3.4** Implementar modelos predictivos para analizar la fragmentación de hábitats.
- **T3.5** Evaluar el rendimiento de los modelos (métricas de clasificación/regresión).
- **T3.6** Generar mapas temáticos y gráficos que visualicen los resultados obtenidos.
- **T3.7** Documentar cada proceso y actualizar la memoria del proyecto.

## PEC4 - Entrega Final (Memoria y Producto) (7/5 al 3/6)

- **T4.1** Conclusiones finales.
- **T4.2** Líneas futuras y mejoras del modelo.
- **T4.3** Revisar la perspectiva de género y el alineamiento con los ODS.
- **T4.4** Producto obtenido: publicación del código y datos en un repositorio de GitHub.

**PEC5 - Presentación del Proyecto (4/6 al 10/6)**

- **T5.1** Identificar los puntos clave del proyecto para la presentación.
- **T5.2** Preparar una presentación clara en PowerPoint.
- **T5.3** Practicar la presentación para garantizar la claridad y coherencia del mensaje.
- **T5.4** Grabar la presentación en vídeo.
- **T5.5** Subir el vídeo al campus para su evaluación.

**PEC6 - Defensa Pública (17/6 al 29/6)**

- **T6.1** Preparar la defensa del proyecto, incluyendo posibles preguntas y respuestas.
- **T6.2** Participar en la defensa pública.

### 1.6.2. Diagrama de Gantt

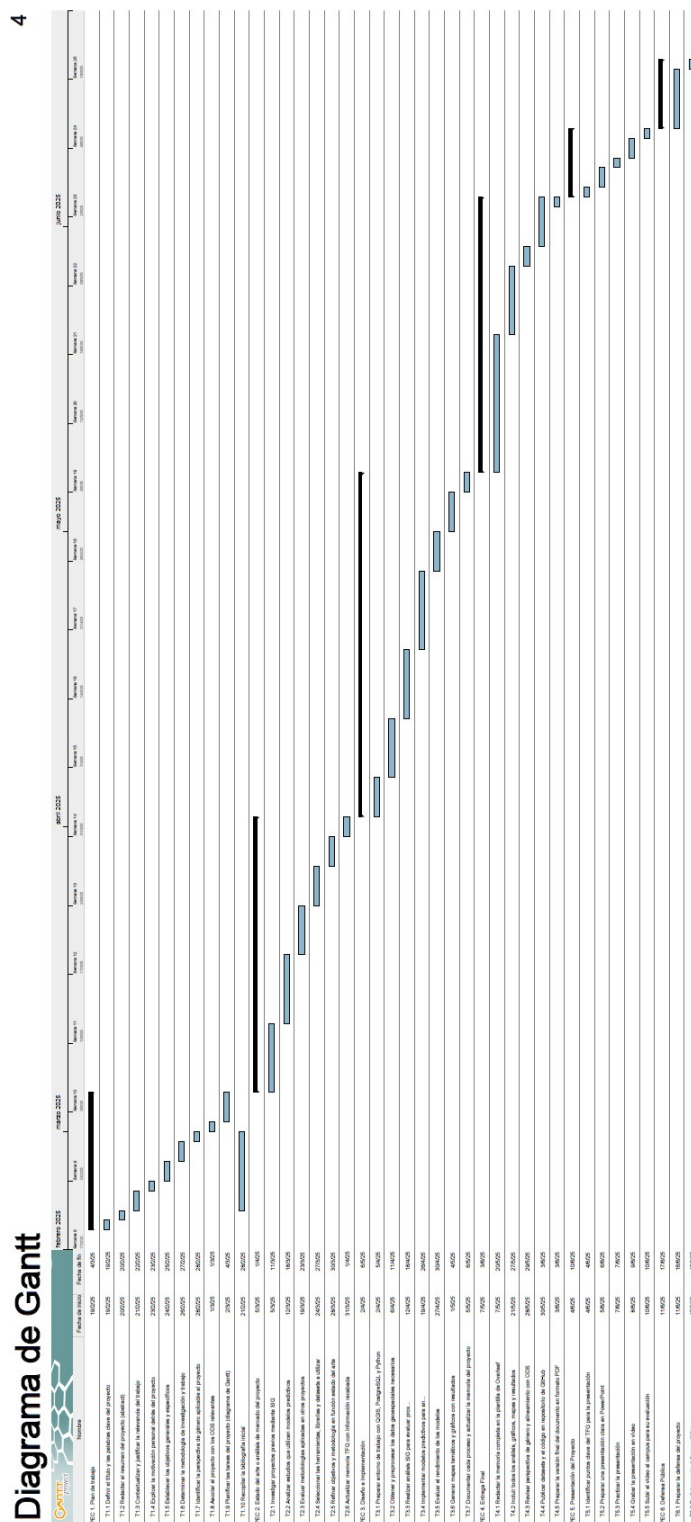


Figura 1.1: Diagrama de Gantt del proyecto

### 1.6.3. Descripción de recursos

Para llevar a cabo el proyecto se requerirán diferentes recursos tanto de *software* como de *hardware*, asegurando así una correcta ejecución de las tareas planificadas.

#### Recursos *software*:

- **QGIS**: Herramienta **SIG** para el análisis geoespacial y la generación de mapas temáticos.
- **Python**: Implementación de **modelos predictivos** y análisis estadísticos.
- **Librerías de Python**: Uso de librerías como **pandas**, y **scikit-learn** para el análisis de datos.
- **Overleaf**: Editor de **LaTeX** basado en la nube para la elaboración de la memoria del proyecto.
- **Gantt Project**: Aplicación de código abierto para la creación del **diagrama de Gantt** y la gestión de tareas del proyecto.
- **PowerPoint**: Preparación de la presentación final del proyecto.
- **Git y GitHub**: Sistema de **control de versiones** y repositorio para almacenar los **datasets** y **códigos** generados.
- **Google Chrome**: Navegador web para acceder a las fuentes de datos abiertas y bibliografía.

#### Recursos *hardware*:

- **Portátil de desarrollo**: Intel Core i5-8265U @1.60GHz (1.80GHz), 8 GB RAM, Windows 11 Home (versión 23H2), sistema operativo de 64 bits.



## 1.7. Breve resumen de productos obtenidos

El producto se centrará principalmente en la documentación del proyecto y en los productos generados a partir del análisis con SIG y modelos predictivos. Esto incluye:

1. Un **repositorio en GitHub** con su correspondiente URL, que incluirá los datasets utilizados en el proyecto, los códigos desarrollados para el análisis geoespacial en QGIS y para la implementación de los modelos predictivos, la documentación técnica y los mapas generados en el proyecto.
2. **Mapas** que muestren la proximidad de parques solares fotovoltaicos a las zonas protegidas, la fragmentación de hábitats y los resultados del análisis predictivo.
3. **Informes** con el análisis de los datos, conclusiones y recomendaciones.

## Capítulo 2

### Estado del arte

El análisis del estado del arte permite contextualizar el trabajo dentro de la investigación existente y fundamentar las decisiones metodológicas del estudio. En este apartado se revisan investigaciones previas sobre la evaluación del impacto ambiental en parques solares, poniendo especial énfasis en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos predictivos aplicados a la sostenibilidad ambiental. Además, se analizan diferentes metodologías utilizadas en proyectos similares para identificar enfoques que permitan optimizar el análisis del impacto de infraestructuras fotovoltaicas en zonas protegidas. La información recopilada servirá de base para la selección de herramientas y datos específicos, así como para la definición detallada de la metodología del presente estudio.

#### 2.1. Investigaciones previas sobre el análisis de impacto ambiental mediante SIG

El uso de los **Sistemas de Información Geográfica (SIG)** en la evaluación del impacto ambiental ha cobrado una gran relevancia en los últimos años, especialmente en el ámbito de las energías renovables y, en particular, en la instalación de parques solares fotovoltaicos. Diversos estudios han empleado herramientas SIG para analizar el impacto de estas infraestructuras sobre el medio ambiente, considerando aspectos como la fragmentación del hábitat, la conectividad ecológica y la alteración de los ecosistemas naturales [13] [14].

Uno de los enfoques más comunes en la literatura es la evaluación del impacto ambiental de los parques solares a través del análisis espacial combinado con **metodologías multicriterio**. Por ejemplo, en un estudio aplicado en Andalucía, se empleó una combinación de herramientas GIS y el método **AHP (Analytic Hierarchy Process)** o **proceso analítico jerárquico** para minimizar los impactos ambientales y sociales en la selección de ubicaciones óptimas para plantas fotovoltaicas, demostrando la utilidad de integrar datos territoriales con análisis jerárquico para una mejor planificación [15].

También se han desarrollado metodologías multicriterio con SIG para determinar zonas aptas para parques solares, como en el caso de Malasia, donde se combinó información climática, geográfica y normativa a través de métodos **MCDM (Multi-Criteria Decision Making)** o

**modelo de decisión multicriterio** y datos satelitales de la NASA para seleccionar localizaciones adecuadas con mínimo impacto [16].

Otro enfoque destacado es el uso de herramientas SIG para cartografiar e identificar el conflicto potencial entre la instalación de parques solares y las áreas de conservación de la biodiversidad. En un estudio desarrollado en España y Portugal, se analizaron los conflictos territoriales mediante la superposición de capas de sensibilidad ecológica con datos de proyectos solares existentes y planeados [1].

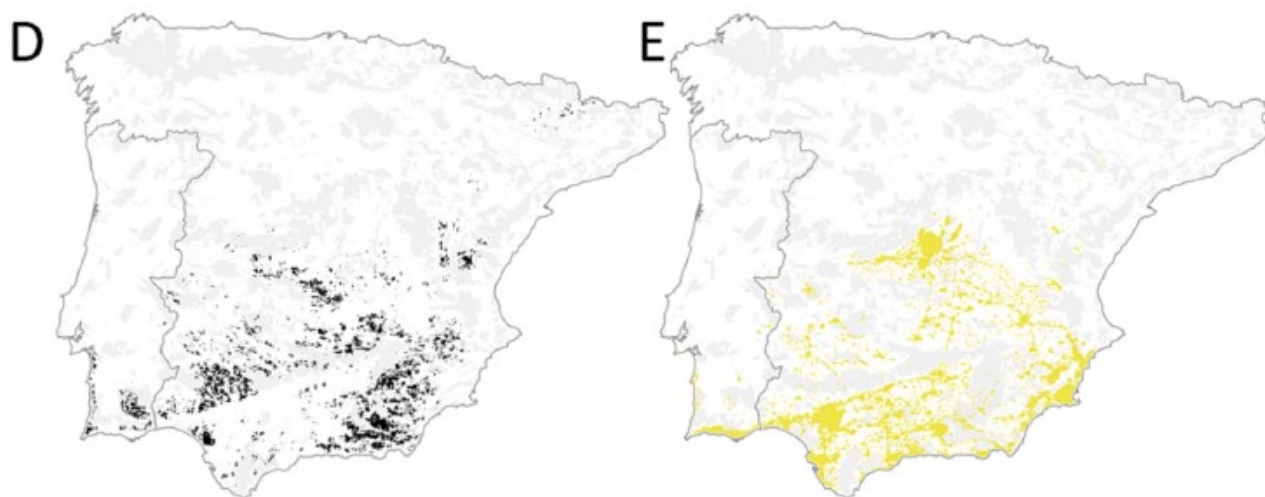


Figura 2.1: Potencial de instalación de parques solares según (D) *land sparing* y (E) *land sharing*. Adaptado de Ascensao et al. (2023) [1].

La Figura 2.1 muestra el análisis del potencial de instalación de parques solares en función de dos enfoques territoriales alternativos. En el mapa de la izquierda (D), correspondiente al enfoque *land sparing*, se prioriza la concentración de instalaciones en zonas específicas para preservar intactas otras áreas de alto valor ecológico. Por el contrario, el mapa de la derecha (E), basado en el enfoque *land sharing*, propone una integración del desarrollo energético con la conservación del paisaje, permitiendo cierta coexistencia espacial entre ambas funciones. Las zonas grises indican áreas oficialmente protegidas.

A nivel más técnico, también se han empleado imágenes Sentinel-2 y Landsat, así como sensores remotos para mapear estaciones fotovoltaicas ya instaladas y evaluar su impacto sobre el entorno inmediato. En el caso de Massachusetts, EE. UU., se integraron múltiples fuentes de datos (incluyendo imágenes multiespectrales) con herramientas SIG para evaluar la afectación del paisaje y la cobertura del suelo [17].

Además, existen estudios con enfoques más aplicados, como los realizados a nivel local en España, donde se evalúa el impacto ambiental concreto de una futura planta solar mediante herramientas SIG, inventarios ecológicos y análisis de superficie, para identificar efectos sobre

especies y hábitats del entorno y proponer medidas compensatorias antes de su construcción. [18].

Por otro lado, a nivel bibliométrico, se han desarrollado análisis del crecimiento y evolución del campo científico que estudia el impacto ecológico de las instalaciones solares. Este tipo de estudios permite conocer las tendencias temáticas, regiones de mayor investigación y enfoques metodológicos predominantes en la evaluación ambiental de proyectos fotovoltaicos [13].

En resumen, la revisión de la literatura muestra una evolución metodológica hacia la integración de técnicas SIG con modelos de decisión, datos de teledetección y análisis multicriterio. Estas herramientas han sido clave para anticipar, cuantificar y mitigar los efectos de los parques solares en entornos naturales y proporcionan una base sólida para el desarrollo del presente trabajo.

## 2.2. Análisis de estudios que utilicen modelos predictivos en contextos ambientales

Los **modelos predictivos** y las herramientas de análisis espacial se han consolidado como recursos clave para estimar impactos ambientales derivados del cambio de uso del suelo. En contextos urbanos, la combinación de imágenes de alta resolución, clasificación automatizada y modelado SIG ha demostrado ser eficaz para evaluar efectos como la calidad del aire o la retención de carbono [19].

Los **métodos de regresión** se han aplicado ampliamente para analizar el impacto de las inversiones ambientales sobre la calidad del entorno. Kovshun et al. (2024) utilizaron regresión polinómica de tercer grado, entre otros modelos, para estudiar la efectividad de inversiones ambientales sobre la reducción de contaminantes en Ucrania. El estudio identificó la inversión en tecnologías limpias y el tratamiento de aguas residuales como variables clave, demostrando el potencial de los modelos predictivos para llevar a cabo decisiones estratégicas [20].

De forma complementaria, se han aplicado modelos de regresión lineal y análisis fractal para estudiar la fragmentación del hábitat y el efecto de borde en ecosistemas naturales. Por ejemplo, un estudio en el sureste de Brasil utilizó imágenes satelitales Landsat y herramientas SIG para cartografiar el uso del suelo y modelar la relación entre área, forma y dispersión de los fragmentos de vegetación, identificando patrones espaciales que reflejan procesos de degradación ecológica [21].

A pesar de sus ventajas, estos modelos presentan limitaciones y desafíos importantes. Kovshun et al. señalan que ciertos resultados del modelo pueden ser difíciles de interpretar si se utilizan únicamente datos agregados, y destacan la necesidad de incorporar indicadores relativos, como los niveles de contaminación o de gasto ambiental por unidad de PIB, población o superficie. Esta mejora permitiría aumentar la fiabilidad de las predicciones y adaptar los modelos a contextos complejos mediante un diseño estadístico más afinado [20].

En España, un estudio desarrollado por Izquierdo Osado (2015) aplicó un modelo multicriterio de evaluación territorial basado en técnicas AHP para analizar la viabilidad de cultivos energéticos en Navalmoral de la Mata, Extremadura, combinando datos ecológicos, económicos y sociales en un entorno SIG. Aunque aplicado a biomasa forestal en vez de energía solar, el estudio ilustra la utilidad de los modelos de decisión multicriterio para seleccionar zonas óptimas para infraestructuras energéticas en función de variables territoriales [22].

En conclusión, los modelos de regresión se han mostrado como herramientas útiles para prever y analizar el impacto ambiental de parques solares. Estos enfoques permiten anticipar escenarios de riesgo, optimizar el emplazamiento de instalaciones y proponer medidas de mitigación basadas en evidencia cuantitativa. Sin embargo, su efectividad sigue ligada a la calidad de los datos y a la correcta interpretación de los modelos, lo que exige un enfoque metodológico riguroso.

## 2.3. Evaluación de metodologías aplicadas en otros proyectos para adaptar las mejores prácticas

La evaluación del impacto ambiental de parques solares ha sido abordada mediante diversas metodologías, muchas de las cuales combinan herramientas de análisis geoespacial, indicadores ambientales y enfoques multicriterio para mejorar la toma de decisiones. Este apartado revisa las metodologías más utilizadas en la literatura reciente con el objetivo de identificar las mejores prácticas aplicables al presente estudio.

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha demostrado ser una herramienta clave en la evaluación de la fragmentación del paisaje y su impacto en los ecosistemas. Estudios previos han empleado indicadores espaciales para analizar la pérdida de **conectividad ecológica** en territorios afectados por transformaciones del uso del suelo, utilizando métricas como la densidad de fragmentos, su tamaño promedio o la distancia entre hábitats naturales [23]. A partir de este enfoque, es posible estimar el nivel de fragmentación del paisaje y proponer alternativas para mitigar sus efectos, como la incorporación de corredores ecológicos diseñados a partir de modelos de conectividad funcional [24].

Los métodos de decisión multicriterio (MCDM) han sido ampliamente utilizados para integrar múltiples variables ambientales y sociales en la evaluación del impacto de infraestructuras energéticas. La técnica de Proceso Analítico Jerárquico (AHP), por ejemplo, ha sido aplicada en la selección de ubicaciones óptimas en proyectos de energía solar a gran escala en Brasil, facilitando la comparación entre alternativas y la selección de medidas de mitigación más eficaces [25].

Asimismo, enfoques híbridos que combinan MCDM con herramientas SIG han demostrado ser especialmente útiles para la planificación territorial de instalaciones renovables, al permitir la integración espacial de criterios y la generación de escenarios de decisión más robustos [26].

Los modelos de predicción y simulación de impactos han sido empleados para anticipar la evolución del impacto ambiental en función del crecimiento urbano y la transformación del paisaje. Por ejemplo, en el área metropolitana de Twin Cities (Minnesota, EE. UU.), se implementó un modelo de fragmentación del paisaje basado en SIG para proyectar escenarios futuros y evaluar estrategias de mitigación [5].

Además, enfoques basados en análisis multitemporal y categorización espacial han permitido analizar cambios en el uso del suelo y su efecto en la conectividad ecológica y la biodiversidad a lo largo del tiempo en el distrito de Shopian (Cachemira, India) [27].

La integración de herramientas SIG con modelos de evaluación multicriterio ha sido identificada como una estrategia efectiva para mejorar la planificación ambiental de proyectos de energía renovable. Estudios recientes en Sudáfrica han utilizado **Sistema de Soporte a la Decisión (DSS)** basada en SIG para comparar ubicaciones potenciales desde el punto de vista ambiental y técnico [28].

Por su parte, la incorporación de modelos de decisión multicriterio como el **Fuzzy-AHP** ha demostrado ser útil para seleccionar emplazamientos con menor impacto ambiental en proyectos fotovoltaicos en Irán, integrando criterios técnicos, sociales y ecológicos [29].

En conclusión, las metodologías revisadas en este apartado ofrecen un marco sólido para evaluar el impacto ambiental de parques solares. La integración de SIG, análisis multicriterio y modelado predictivo proporciona herramientas avanzadas para la toma de decisiones informadas, asegurando una planificación más sostenible. Estas mejores prácticas serán consideradas en la implementación del presente estudio, adaptando los enfoques más relevantes a las particularidades del área de estudio.

Metodología	Tipo	Aplicación principal	Ventajas	Biblio.
Métricas del paisaje + teledetección	SIG	Evaluación de la fragmentación del hábitat por actividades humanas	Detecta cambios espaciales y temporales en el paisaje con alta precisión	[21]
Métricas de fragmentación del paisaje	SIG	Evaluación de la pérdida de conectividad ecológica	Cuantifica la alteración espacial de hábitats	[23]
Modelo de conectividad ecológica	SIG	Análisis de corredores y conectividad territorial	Apoya planificación conservacionista	[24]
AHP (Analytic Hierarchy Process)	MCDM	Selección de ubicaciones óptimas para parques solares	Jerárquico, estructurado y fácil de aplicar	[25]
Modelo multicriterio + SIG	MCDM + SIG	Planificación de energías renovables con múltiples criterios	Integra sostenibilidad y múltiples criterios	[26]
Modelado espacial	SIG + predicción	Simulación de escenarios futuros de fragmentación	Permite prever impactos a largo plazo	[5]
Análisis de cambios de uso del suelo	SIG + simulación	Evaluación de dinámica paisajística y biodiversidad	Integra dimensión temporal y ecológica	[27]
Sistema de ayuda a la decisión (DSS)	SIG + DSS	Integración de datos para decisiones espaciales	Herramienta adaptable con múltiples fuentes	[28]
Fuzzy AHP	MCDM (difuso)	Selección de emplazamientos bajo incertidumbre	Maneja valoraciones imprecisas	[29]

Cuadro 2.1: Comparativa de metodologías aplicadas en la evaluación del impacto ambiental de parques solares. Elaboración propia.



## 2.4. Selección de herramientas, librerías y datasets

La implementación del presente trabajo requerirá el uso de herramientas SIG, librerías de análisis estadístico y una variedad de fuentes de datos geoespaciales. Dado que el diseño metodológico aún está en fase de desarrollo, la selección definitiva de estos elementos se irá refinando a medida que avance el proyecto. Sin embargo, a partir de la revisión del estado del arte y las recomendaciones recibidas, se han identificado una serie de herramientas y datasets clave que se prevé utilizar.

### 2.4.1. Herramientas SIG

Se contempla el uso de **QGIS** como herramienta principal de análisis espacial, debido a su carácter de software libre, su amplia documentación y su compatibilidad con servicios de descarga de datos (como WFS o WMS), lo que facilitará la integración de capas desde portales como el HIPERMAPA de Catalunya.

### 2.4.2. Herramientas de visualización y dashboards existentes

Además de las herramientas de análisis espacial y modelado, el estado del arte incluye el uso creciente de plataformas de visualización interactiva aplicadas a la planificación energética.

Por ejemplo, el visor desarrollado por *Glint Solar* [30] permite explorar el potencial solar de distintas zonas mediante una interfaz basada en mapas, capas superpuestas y filtros dinámicos.

Por su parte, *ESRI* [31] ofrece dashboards específicos para energías renovables que combinan indicadores geográficos, gráficos en tiempo real y análisis de cobertura del terreno.

También destaca el *Global Solar Atlas* [32] desarrollado por el Banco Mundial y ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program), que ofrece mapas interactivos del potencial solar y permite realizar análisis técnicos preliminares mediante herramientas de estimación rápida.

Estas soluciones permiten una comunicación más clara de los resultados y facilitan la toma de decisiones en entornos participativos o institucionales. Aunque el presente trabajo no contempla el desarrollo de un visor propio, sí se tendrán en cuenta buenas prácticas de visualización para la representación final de los resultados.

### 2.4.3. Librerías y lenguajes de análisis

Para el análisis predictivo se prevé el uso del lenguaje **Python**, por su ecosistema geoespacial y científico. Las librerías inicialmente consideradas son:

- **geopandas**, para el tratamiento de datos vectoriales y ráster.
- **scikit-learn**, para la implementación de modelos de regresión y clasificación.

#### 2.4.4. Fuentes y tipos de datos

A nivel de datos, el proyecto se basa en la recopilación de información geoespacial de acceso abierto, especialmente centrada en la comunidad autónoma de Catalunya. Actualmente se han identificado las siguientes capas de interés:

- **Localización de parques solares fotovoltaicos**, desde el Referencial Topográfico Territorial (RTT) del ICGC (Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña).
- **Zonas protegidas** (PEIN, ENPE, Red Natura 2000 y RAMSAR), disponibles a través del **HIPERMAPA de la Generalitat de Catalunya**.
- **Cobertura del suelo**, procedentes de la capa “*Classificació d’usos i cobertes del sòl 2017*” publicada por el ICGC.
- **Conectividad ecológica**: obtenida a partir de la capa de conectividad ecológica isponibles a través del HIPERMAPA de la Generalitat de Catalunya.

Estas capas permitirán realizar análisis espaciales (como la superposición entre parques solares y zonas sensibles), así como alimentar modelos de regresión para estudiar el efecto de las instalaciones solares sobre la fragmentación del hábitat.

## 2.5. Ajuste de objetivos y metodología según el estado del arte

El análisis del estado del arte ha permitido identificar las principales metodologías, herramientas y enfoques empleados en la evaluación del impacto ambiental de parques solares, especialmente en relación con la fragmentación de hábitats y el uso de técnicas geoespaciales. Esta revisión ha resultado fundamental para ajustar los objetivos iniciales del TFG y definir una estrategia metodológica realista, sólida y contextualizada en el caso catalán.

En primer lugar, los estudios revisados han confirmado la utilidad de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta clave para evaluar impactos territoriales derivados de infraestructuras energéticas. Metodologías basadas en análisis espacial, índices de fragmentación y superposición de capas han sido ampliamente utilizadas en contextos diversos, lo que justifica su aplicación en este trabajo. Asimismo, se ha constatado que QGIS representa una solución robusta y accesible para este tipo de análisis.

En segundo lugar, los modelos predictivos, particularmente las regresiones polinómicas, lineales y logísticas, han demostrado ser adecuados para estimar la evolución de indicadores ecológicos frente al desarrollo de parques solares. Este enfoque será adaptado a la realidad geográfica de Cataluña, utilizando capas geoespaciales abiertas y datos ambientales disponibles en portales oficiales como el ICGC, el HIPERMAPA y el MITECO. Se opta, por tanto, por aplicar regresiones como técnica principal de análisis predictivo por razones de simplicidad y disponibilidad de datos.

En relación con los objetivos del proyecto, se decide centrar el análisis exclusivamente en parques solares fotovoltaicos. Asimismo, se redefine el objetivo vinculado a la obtención de datos, incorporando una etapa específica de búsqueda, depuración y validación de capas relevantes para el análisis.

Por último, el estudio de metodologías aplicadas en proyectos anteriores ha permitido identificar buenas prácticas replicables en el caso catalán, como el uso de criterios de exclusión ambiental para seleccionar áreas vulnerables o la integración de análisis multicriterio en entornos SIG. Estas aproximaciones se integrarán progresivamente en el desarrollo del proyecto, conforme se avance en la implementación técnica y el tratamiento de datos.

En resumen, el análisis del estado del arte ha proporcionado un marco sólido para orientar la metodología del TFG, justificar el uso de herramientas y técnicas específicas, y ajustar los objetivos a un enfoque riguroso, viable y alineado con las prioridades de conservación ambiental y planificación energética en Cataluña.

Además, el planteamiento metodológico del presente trabajo se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por Naciones Unidas, en particular con el **ODS 7** (Energía asequible y no contaminante), el **ODS 11** (Ciudades y comunidades sostenibles), el **ODS 13** (Acción por el clima) y el **ODS 15** (Vida de ecosistemas terrestres), además

del **ODS 5** (Igualdad de género). La evaluación del impacto ambiental de parques solares mediante herramientas SIG y modelos predictivos contribuye a una planificación energética más respetuosa con el medio natural, fomentando el desarrollo de infraestructuras limpias sin comprometer la conservación de la biodiversidad.

## 2.6. Actualización de la memoria del proyecto

Como resultado del análisis realizado en los apartados anteriores, se han revisado y ajustado los objetivos específicos y la metodología propuesta inicialmente en el TFG. La incorporación de herramientas SIG, modelos predictivos y fuentes de datos adecuadas ha sido fundamentada a partir de la revisión bibliográfica y de estudios previos similares.

Entre los principales cambios destaca la priorización del análisis de fragmentación del hábitat en zonas protegidas, la aplicación de modelos de regresión como enfoque predictivo, y la decisión de trabajar con datos abiertos procedentes de organismos oficiales.

Estas decisiones afectan directamente a la planificación técnica y temporal del proyecto, ya que implican fases específicas de validación de datos, construcción del modelo y evaluación de resultados. También orientan la selección de herramientas de análisis y los criterios de calidad que se aplicarán a lo largo del desarrollo.

En conjunto, esta actualización garantiza un enfoque metodológico más sólido y alineado con los objetivos del TFG, y quedará reflejada en la hoja de ruta de las próximas entregas.

## Capítulo 3

# Diseño e implementación

Este capítulo describe el proceso de diseño e implementación del estudio, siguiendo la planificación definida en las fases anteriores del proyecto. A partir de los resultados obtenidos en el estado del arte, se ha procedido a desarrollar el entorno técnico necesario, recopilar, procesar y limpiar los datos relevantes, ejecutar los análisis SIG, implementar los modelos predictivos, evaluar los resultados y proceder a su visualización.

El objetivo principal de esta fase es transformar las hipótesis y objetivos definidos en acciones concretas mediante el uso de herramientas SIG y técnicas de modelado. Para ello, se ha trabajado con software especializado como QGIS, PostgreSQL/PostGIS, Python y Visual Studio Code, integrando librerías y extensiones orientadas al análisis espacial.

### 3.1. Preparar el entorno de trabajo con QGIS, PostgreSQL/PostGIS, Python y Visual Studio Code

#### 3.1.1. QGIS

Para el análisis SIG se ha utilizado el software libre QGIS en su versión LTR (Long Term Release), que garantiza estabilidad y compatibilidad con múltiples extensiones geoespaciales.

- Versión instalada: QGIS 3.40.5 'Bratislava' (LTR)
- Fuente oficial: <https://qgis.org>
- Sistema operativo: Windows 10 (64 bits)
- Tipo de instalación: Instalador offline (standalone)
- Verificación: El programa se ejecutó correctamente tras la instalación, accediendo a la pantalla principal sin errores.

#### 3.1.2. Python

Para la implementación de modelos predictivos y el procesamiento de datos geoespaciales se ha instalado el lenguaje de programación Python, ampliamente utilizado en ciencia de datos, análisis espacial y aprendizaje automático.

- Versión instalada: Python 3.11.9 (64 bits)
- Fuente oficial: <https://www.python.org/downloads/release/python-3119/>
- Instalación: Instalador oficial para Windows con la opción `Add Python to PATH` activada
- Verificación: Se comprobó el correcto funcionamiento desde la terminal con el comando `python --version`

Para aislar y gestionar las dependencias del proyecto se creó un entorno virtual (**venv**) en el directorio del proyecto, activado mediante PowerShell con el comando `.\venv\Scripts\Activate.ps1`.

### 3.1.3. Visual Studio Code

Para el desarrollo de scripts en Python y la gestión del entorno virtual se ha utilizado el editor de código Visual Studio Code, ampliamente adoptado por la comunidad de análisis de datos y SIG.

- Versión instalada: Visual Studio Code 1.99.3 (15 de abril de 2025)
- Fuente oficial: <https://code.visualstudio.com/>
- Extensión instalada: Python (Microsoft)
- Verificación: El programa reconoce la instalación de Python 3.11.9 desde la terminal integrada

Visual Studio Code permitirá editar y ejecutar scripts relacionados con el preprocesamiento de datos, el análisis SIG y la implementación de modelos predictivos.

## 3.2. Obtener y preprocesar los datos geospaciales necesarios (zonas protegidas, parques solares, datos ambientales)

En esta sección se describe el proceso de recopilación y preparación de los datos geospaciales necesarios para el análisis, correspondientes a tres categorías principales: zonas protegidas, localización de parques solares existentes y variables ambientales complementarias.

La obtención de estos datos se ha realizado principalmente a través de fuentes públicas oficiales, destacando el visor cartográfico HIPERMAPA de la Generalitat de Catalunya, que proporciona acceso a la mayoría de las capas necesarias para este estudio. Las descargas se realizaron manualmente en formatos compatibles con QGIS, como `.gpkg`, `.shp` o `.tif`, según la naturaleza vectorial o ráster de cada capa.

Además, durante esta fase de preprocesamiento, se han realizado las siguientes acciones:

- Verificación del sistema de referencia espacial (CRS), asegurando que todas las capas estén en **ETRS89 / UTM zona 31N (EPSG:25831)** para garantizar su compatibilidad espacial.
- Revisión de atributos disponibles en las tablas de atributos de cada capa, seleccionando aquellos de interés para el análisis posterior.

### 3.2.1. Zonas protegidas

Los datos utilizados para las **zonas protegidas** corresponden a las siguientes capas, las cuales se descargaron mediante el protocolo WFS (Web Feature Service) que ofrece acceso a datos vectoriales editables en formato `.shp`:

- **ENPE:** Espais Naturals de Protecció Especial [33]
- **PEIN:** Pla d’Espais d’Interès Natural [34]
- **Xarxa Natura 2000:** Red europea de espacios protegidos [35]
- **RAMSAR:** Humedales de importancia internacional [36]



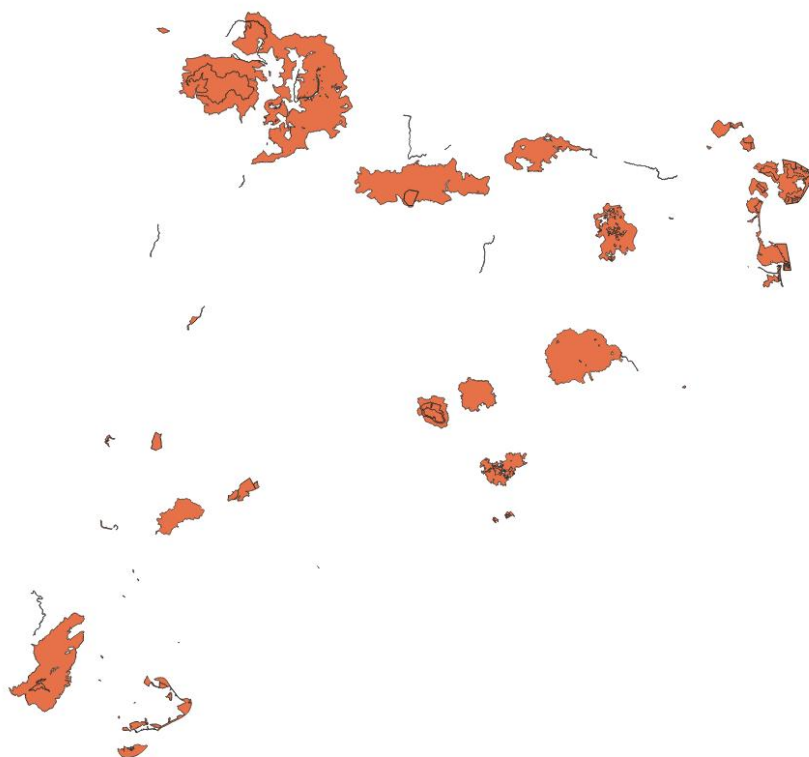


Figura 3.1: Visualización de la capa `ESPAISNATURALS_ENPE` (Espais Naturals de Protecció Especial) cargada en QGIS. Fuente: elaboración propia.

Además de estas capas, se ha consultado la referencia oficial del sistema de espais naturals de protecció especial [37].

Una vez descargadas, las capas se han importado y verificado en QGIS. Para ello, se han descomprimido los archivos ZIP y cargado los ficheros `.shp` correspondientes mediante el panel de capas del software. Posteriormente, se procedió a la fusión de las distintas capas vectoriales correspondientes a las zonas protegidas (ENPE, PEIN, Red Natura 2000 y RAMSAR) en una única capa combinada, mediante la herramienta “*Fusionar capas vectoriales*” disponible en QGIS, llamada `zonas_protegidas_fusionadas.gpkg`.



Figura 3.2: Visualización de la capa **ESPAISNATURALS\_PEIN** (Pla d'Espais d'Interès Natural) cargada en QGIS. Elaboración propia.



Figura 3.3: Visualización de las cuatro capas de zonas protegidas cargadas y superpuestas en QGIS. Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. Instalaciones solares fotovoltaicas

Las **instalaciones solares fotovoltaicas** se han extraído del *Referencial Topográfico Territorial (RTT)* del *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)* [2]. El conjunto de datos fue descargado en formato GeoPackage (.gpkg) y contiene los datos topográficos a escala 1:5000 de Catalunya clasificados y simbolizados. A través de un filtrado realizado en QGIS, se seleccionó exclusivamente aquella entidad clasificada como **instalaciones solares fotovoltaicas** ("*[eso] recinte d'inst. d'energia solar*" dentro del subapartado "*60\_construccions\_p*") y en su tabla de atributos, únicamente aquellos parques que no tuviesen su nombre vacío o *NULL*.

El resultado fue una capa final, nombrada como **parques\_solares\_filtrados.gpkg**, compuesta por **23 parques solares activos**, representados como polígonos que permiten calcular la superficie ocupada.

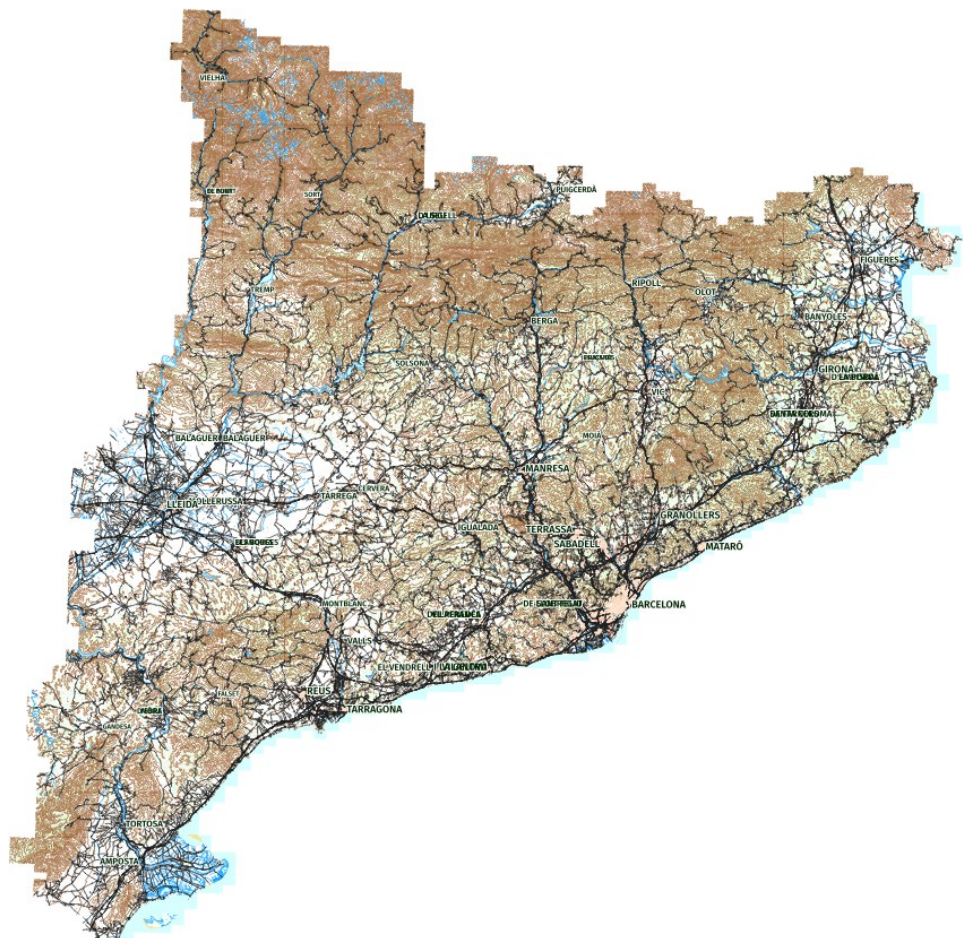


Figura 3.4: Visualización de la capa topografía territorial con todos sus elementos activos. Fuente: ICGC [2] mostrado a través de QGIS.

### 3.2.3. Cobertura del suelo

La **cobertura del suelo** se ha obtenido a partir de la capa “*Classificació d’usos i cobertes del sòl 2017*” publicada por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)* [3] y el conjunto de datos fue descargado en formato ráster GeoTIFF.

Presenta una clasificación con 25 tipos distintos de coberturas representados mediante códigos numéricos. Esta capa permite identificar de forma espacial los distintos usos del territorio catalán, como zonas forestales, agrícolas, urbanas o cuerpos de agua. En el marco del presente estudio, se definieron como usos naturales aquellos correspondientes a vegetación natural y seminatural: bosques (caducifolios, aciculifolios, esclerófilos), prados, humedales, matorrales y zonas sin actividad humana directa. Por su parte, se excluyeron de este grupo las zonas urbanas, industriales, infraestructuras y cultivos intensivos.

El proceso de reclasificación se realizó en QGIS utilizando la herramienta “*Reclasificar por tabla*”. A cada píxel del ráster se le asignó un valor binario: 1 si pertenecía a una clase natural y 0 en caso contrario. El resultado fue una nueva capa binaria (*usos\_naturales.tif*), que



posteriormente se usó para calcular el porcentaje de cobertura natural (`perc_natural_mean`) dentro de cada celda de 1 km<sup>2</sup> de la rejilla regular generada sobre Cataluña. Este valor constituye una de las variables clave del dataset para la modelización del impacto ambiental.

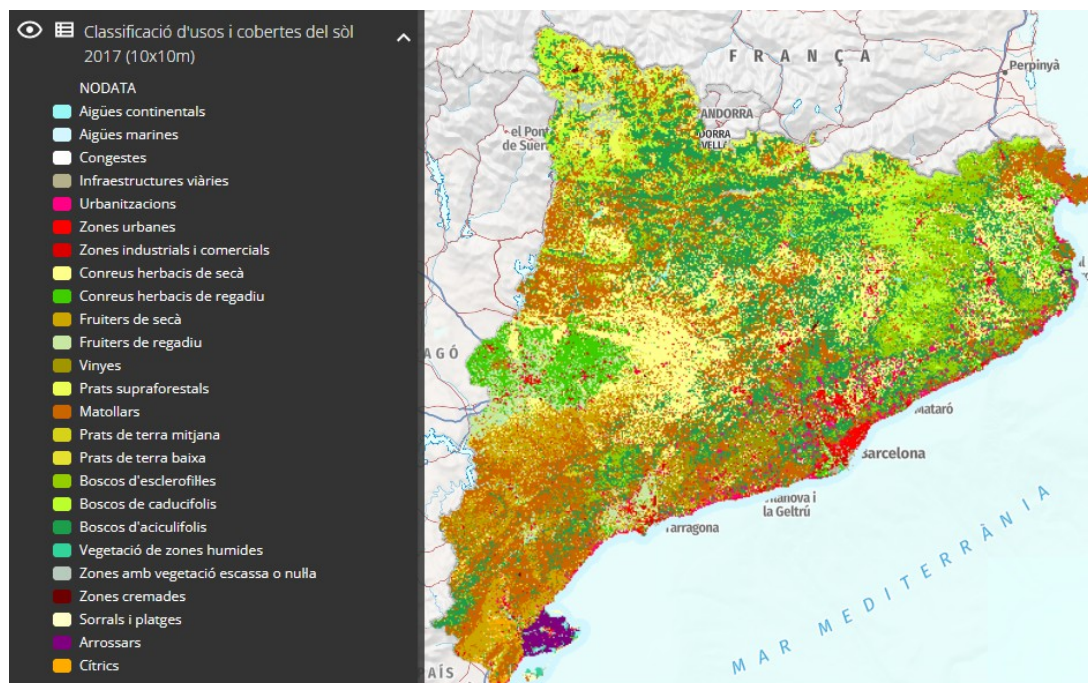


Figura 3.5: Visualización de la capa cobertura de usos del suelo con todos sus clases visibles. Fuente: ICGC [3]

### 3.2.4. Elevación del suelo

La obtención de los datos altimétricos se realizó a partir del subapartado `"_65_relleu.l"` del *Referencial Topogràfic Territorial* (RTT) del *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC), que contiene entidades lineales clasificadas según su tipología topográfica. Esta capa incluye 881.973 registros, entre los cuales se encuentran tanto curvas de nivel como otros elementos, como márgenes de banales, desmontes o terraplenes.

Para garantizar la consistencia del modelo altimétrico, se procedió a filtrar exclusivamente aquellas entidades que representaban curvas de nivel con valor real de altitud. Concretamente, se seleccionaron las siguientes clases: corbes de nivell mestres (`mes`), corbes senzilles (`sen`), corbes intercalades (`int`), corbes mestres en zones deprimides (`dpm`) y corbes senzilles en zones deprimides (`dps`). Este filtrado se llevó a cabo en QGIS mediante una expresión lógica aplicada al campo de clasificación tipológica de la capa, lo que permitió reducir el conjunto de datos a 506.381 entidades relevantes para el análisis.

El resultado fue una nueva capa vectorial que contiene únicamente curvas de nivel válidas para la generación del modelo digital de elevación, manteniendo el campo Z asociado a cada línea, el cual representa la altitud en metros sobre el nivel del mar.

### 3.2.5. Capa de conectividad ecológica

Uno de los conjuntos de datos más relevantes para el análisis de fragmentación del hábitat es la capa de **conectividad ecológica**, la cual fue descargada desde el visor cartográfico oficial HIPERMAPA de la Generalitat de Catalunya. Esta capa forma parte de las capas asociadas al sistema d’Espais Naturals de Protecció Especial (SENPE) y proporciona un valor continuo que representa el grado de conectividad funcional del territorio, entendido como la facilidad con la que las especies pueden desplazarse entre fragmentos de hábitat natural.

El archivo se encuentra en formato ráster GeoTIFF y contiene valores numéricos que oscilan entre **0** (muy baja conectividad) y **4.532663** (conectividad ecológica muy alta). Esta escala se basa en criterios territoriales y ecológicos previamente definidos por el Departament d’Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural (DACR) y permite cuantificar de forma estandarizada la conectividad entre espacios naturales. La capa descargada cubre todo el ámbito catalán y se encuentra georreferenciada en el sistema ETRS89 / UTM zona 31N (EPSG:25831).

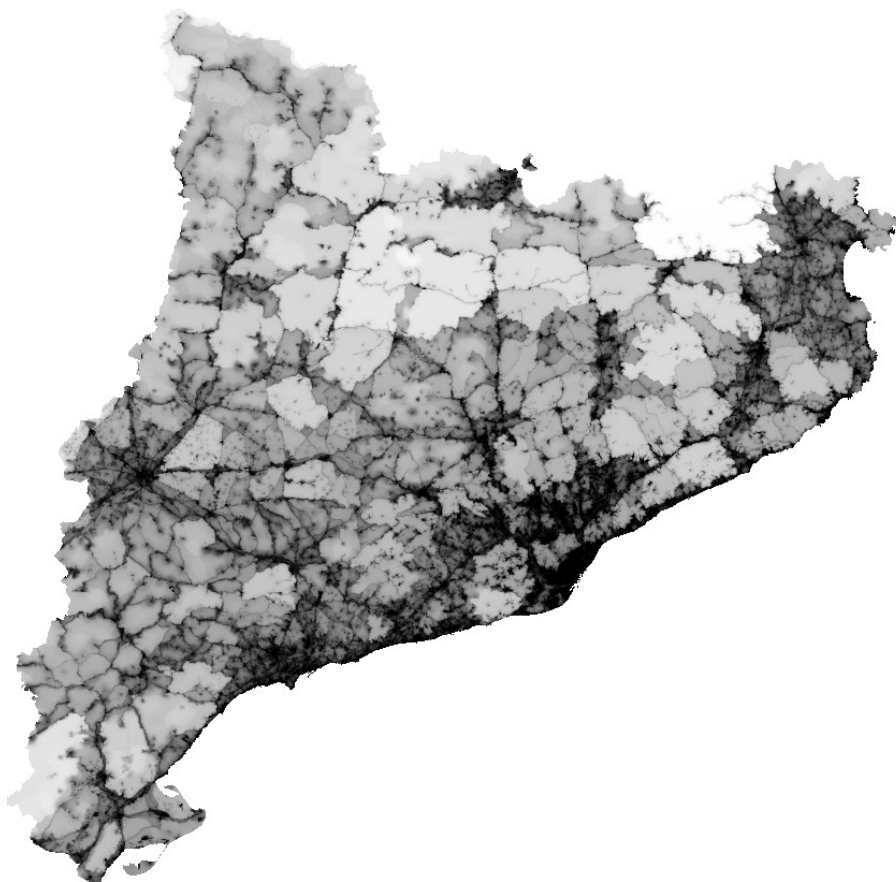


Figura 3.6: Visualización de la capa conectividad con simbología original. Fuente: ICGC[4]

### 3.2.6. Revisión de indicadores según el modelo estatal

Tras revisar los indicadores de exclusión propuestos en el modelo de zonificación ambiental del MITECO, se ha comprobado que las capas empleadas en este trabajo para el análisis en Cataluña (PEIN, ENPE, Red Natura 2000 y RAMSAR) cubren ampliamente los criterios establecidos. En el contexto catalán, muchas de las áreas protegidas y figuras legales de protección equivalentes están integradas bajo estas denominaciones, incluyendo espacios forestales de especial protección o zonas de interés para especies catalogadas.

Por tanto, no se han incorporado capas adicionales, ya que dichas capas integradas en el visor HIPERMAPA de la Generalitat de Catalunya recogen adecuadamente los indicadores relevantes para este análisis. Esta coherencia metodológica garantiza que los datos geoespaciales utilizados cumplen con los estándares ambientales estatales.

### 3.3. Realizar el análisis SIG para evaluar la proximidad de parques solares a zonas protegidas

El presente apartado tiene como objetivo analizar si alguna de las instalaciones solares fotovoltaicas activas en Cataluña se encuentra **dentro de los límites** de zonas protegidas, lo cual permitiría detectar posibles incompatibilidades normativas o impactos ambientales directos. Este análisis espacial se realiza exclusivamente mediante la **evaluación de intersección o inclusión geométrica**, sin aplicar de momento umbrales de proximidad o distancias buffer.

#### 3.3.1. Objetivo del análisis

A través de técnicas de análisis SIG, se pretende identificar qué parques solares fotovoltaicos se encuentran **contenidos o intersectan** con zonas protegidas del territorio catalán, como las recogidas en el marco del Pla d’Espais d’Interès Natural (PEIN), la Red Natura 2000, los Espacios Naturales de Protección Especial (ENPE) o los humedales RAMSAR. Este análisis permitirá determinar si existen instalaciones dentro de áreas de exclusión y, si fuera el caso, valorar si su ubicación fue anterior a la normativa vigente en materia de conservación del entorno.

#### 3.3.2. Datos utilizados

Los datos utilizados para este análisis han sido obtenidos exclusivamente de fuentes oficiales y en formato geográfico vectorial y corresponden a algunos de los mencionados en el apartado 3.2 anterior:

- Las **zonas protegidas** de Cataluña que han sido descargadas a través del visor HIPER-MAPA de la Generalitat de Catalunya:
  - **ENPE:** Espais Naturals de Protecció Especial [33]
  - **PEIN:** Pla d’Espais d’Interès Natural [34]
  - **Xarxa Natura 2000:** Red europea de espacios protegidos [35]
  - **RAMSAR:** Humedales de importancia internacional [36]
- Las **instalaciones solares fotovoltaicas** se han extraído del *Referencial Topográfico Territorial (RTT)* del *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)* [2].

#### 3.3.3. Análisis de proximidad a zonas protegidas

Además del análisis de intersección directa, se ha realizado un estudio de proximidad para evaluar la distancia mínima entre cada instalación solar fotovoltaica y las distintas zonas protegidas del territorio catalán. Para ello se ha utilizado la herramienta “Línea más corta entre objetos” de QGIS, que permite calcular la distancia geodésica mínima entre dos geometrías.



En concreto, se han calculado las distancias desde cada parque solar a las cuatro capas de zonas protegidas de Cataluña (Red Natura 2000, PEIN, ENPE y RAMSAR). El resultado obtenido ha sido una nueva tabla con los valores de distancia (en metros) para cada combinación parque–zona protegida. La Figura 3.6 muestra un ejemplo de este resultado al resaltar una línea con esta distancia mínima entre parque solar y zona protegida.

Este análisis permite identificar instalaciones que, aunque no deban encontrarse dentro de zonas protegidas por su prohibición, podrían estar situadas a una distancia crítica desde el punto de vista ambiental o ecológico. En el caso concreto del Parc solar Ramon Escriche, la distancia es 0 metros, lo que confirma el contacto directo con las zonas Xarxa Natura 2000 y PEIN y que puede verse en la Figura 3.8. El resto de parques presentan distancias variables, generalmente superiores a varios centenares de metros.



Figura 3.7: Visualización de diferentes parques solares marcados en rojo y su distancia más corta a zonas protegidas en el este de Cataluña marcadas en violeta. Fuente: Elaboración propia a través de QGIS.

### 3.3.4. Marco metodológico y buenas prácticas ambientales del MITECO

Como complemento a los criterios ambientales aplicados en este trabajo, se han revisado las herramientas metodológicas y normativas desarrolladas por el **Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO)** para la evaluación y planificación de proyectos de energías renovables en el territorio español.

En primer lugar, se ha tenido en cuenta la herramienta de *zonificación ambiental para energías renovables*, disponible públicamente a través del geoportal del MITECO [38]. Esta herramienta permite identificar zonas del territorio nacional con diferentes niveles de sensibilidad ambiental para la implantación de proyectos solares fotovoltaicos, mediante un modelo territorial basado en indicadores ecológicos, normativos y territoriales. El modelo clasifica el territorio en cinco niveles de sensibilidad ambiental (Máxima, Muy Alta, Alta, Moderada y Baja), a partir de múltiples capas ambientales, y constituye una referencia útil para detectar restricciones ambientales desde fases tempranas de planificación.

A nivel técnico, el *Resumen ejecutivo del estudio de zonificación ambiental* elaborado por el MITECO [39] detalla la metodología empleada, basada en análisis SIG multicriterio, así como los principales *indicadores de exclusión* (espacios protegidos, Red Natura 2000, etc.) e *indicadores de ponderación* (hábitats prioritarios, conectividad ecológica, zonas sensibles para la avifauna, entre otros). Muchos de estos factores coinciden con los empleados en el análisis SIG desarrollado en este trabajo, como las capas del PEIN, ENPE, Red Natura 2000 o RAMSAR.

Por otro lado, se ha consultado también la *Guía para la elaboración de estudios de impacto ambiental de proyectos de plantas solares fotovoltaicas y sus infraestructuras de evacuación* [40], publicada por el MITECO en 2022. Esta guía identifica los principales impactos que pueden generar estas instalaciones, como la pérdida y fragmentación de hábitats, la alteración de la calidad del suelo o del agua, los impactos paisajísticos y la afectación a especies sensibles, especialmente aves esteparias. Además, establece buenas prácticas para el diseño y ubicación de proyectos, priorizando zonas antropizadas, evitando espacios protegidos y considerando la conectividad ecológica.

Aunque este trabajo no constituye un estudio de impacto ambiental formal, se considera que la metodología adoptada se encuentra alineada con las recomendaciones del MITECO, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental. Esta coherencia metodológica contribuye a respaldar la validez de los resultados obtenidos en el análisis espacial aplicado al contexto catalán.

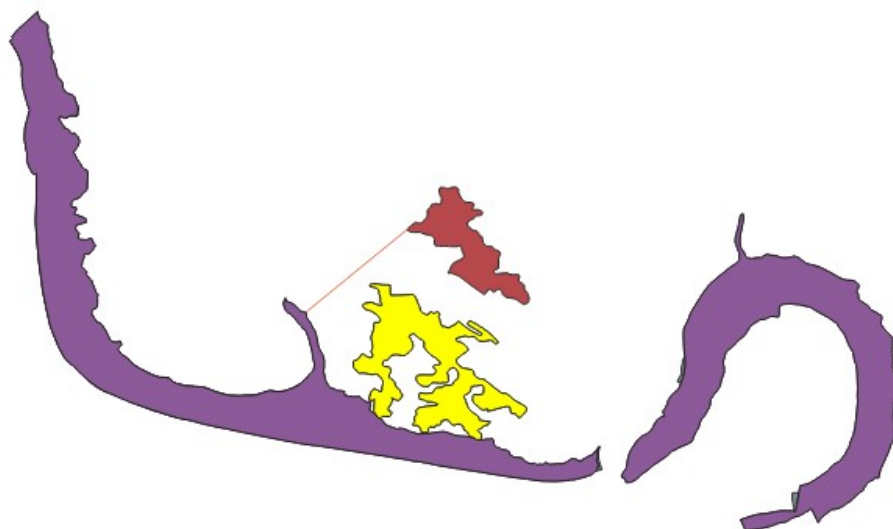


Figura 3.8: Visualización de los dos parques solares Ramon Escriche. Véase como uno de ellos linda directamente con el límite de la zona protegida de las *Riberes i Illes de l'Ebre*. Fuente: elaboración propia a través de QGIS.

Cabe señalar que, tras revisar la normativa vigente, no se ha identificado una distancia de exclusión fija (por ejemplo, 1000 metros) que deba aplicarse de forma genérica alrededor de las zonas protegidas. Según el *Resumen ejecutivo del modelo de zonificación ambiental para energías renovables* del MITECO [39] y la normativa ambiental publicada por la Generalitat de Catalunya [41], las restricciones dependen de la figura de protección y del contexto del proyecto. Por tanto, en este análisis se ha optado por evaluar exclusivamente la **intersección directa o inclusión de parques solares en zonas protegidas**, sin aplicar *buffers* estándar. Esta decisión se basa en la legislación aplicable y en la orientación metodológica oficial para estudios ambientales.

Además, según la normativa ambiental vigente en Cataluña, concretamente el Decreto Ley 16/2019, de 26 de noviembre (modificado por la Ley 5/2020 y el Decreto Ley 5/2022), se establecen criterios específicos de implantación y se identifican las zonas no compatibles con plantas solares fotovoltaicas. En su artículo 9.2 se indica expresamente que los espacios incluidos en la **Red Natura 2000** se consideran zonas no compatibles con este tipo de instalaciones, salvo excepciones muy concretas relacionadas con el autoconsumo, la baja tensión ( $\leq 25\text{ kV}$ ) y una ocupación inferior a 1 hectárea, supeditadas además a estudios agrarios, paisajísticos y climáticos específicos.

Por tanto, se ha considerado que cualquier intersección entre un parque solar de gran escala y una zona incluida en la Red Natura 2000 constituye, a efectos de este trabajo, una **afección incompatible con la normativa**, y se ha priorizado el análisis por intersección directa sobre la aplicación de distancias o *buffers* genéricos, en consonancia con la legislación catalana.

Como conclusión, el análisis SIG ha permitido integrar y examinar las zonas protegidas de Cataluña junto a la ubicación de 23 parques solares fotovoltaicos. Mediante la herramienta de intersección de QGIS, se ha comprobado que solo uno de ellos intersecciona directamente con una zona incluida tanto en la Xarxa Natura 2000 como en PEIN, mientras que el resto se sitúa fuera de áreas protegidas, ver Figura 3.8.

Estos resultados proporcionan una base sólida para los análisis de impacto ambiental que se desarrollarán en los siguientes apartados.

id	Nombre planta solar	Red Natura 2000	Distancia (m)
1	Planta fotovoltaica dels Magrells	Riberes i Illes de l'Ebre	1843,47
2	Estació fotovoltaica de Llaberia	Tivissa-Vandellós-Llaberia	309,09
3	Parc solar de Juncosa	Serra de Montsant-Pas de l'Ase	2808,72
4	Parc solar Ramon Escriche	Riberes i Illes de l'Ebre	0,00
5	Parc solar Ramon Escriche	Riberes i Illes de l'Ebre	856,75
6	Planta solar fotovoltaica de Nufri SAT	Estany d'Ivars - Vilasana	7211,87
7	Central Termosolar de les Borges Blanques	Secans de Mas de Melons-Alfés	3952,75
8	Planta fotovoltaica de Miralcamp	Secans de Belianes-Preixana	4830,73
9	Central Termosolar de les Borges Blanques	Els Bessons	4266,23
10	Planta fotovoltaica de Sant Dalmai	Volcá de la Crosa (PEIN)	829,07
11	l'Hort Solar	Riu Congost	117,79
12	l'Hort Solar	Riu Congost	257,58
13	Estació solar fotovoltaica Comiols	Serres del Montsec, Sant Mamet i Mitjana	1596,90
14	Parc d'energia solar de Prats de Lluçanès	Riera de Merlès	845,63
15	Camp solar Fotovoltaic	Serra de Castelltallat	2649,57
16	Camp solar de la Vinya de Querol	Serra de Castelltallat	2825,29
17	Planta fotovoltaica dels Anolls	Secans del Montsià	305,94
18	Planta fotovoltaica de Camp de Fels	Riu Verneda	863,51
19	Planta fotovoltaica de Comajordana	Riu Verneda	883,29
20	Planta fotovoltaica Els Quadrons	Riu de la Llosa	328,20
21	Planta fotovoltaica de Navès	Serres de Queralt i Els Tossals-Aigua d'Ora	2221,73
22	Parc Fotovoltaic de Montmajor	Serres de Queralt i Els Tossals-Aigua d'Ora	5405,40
23	Planta fotovoltaica del Rourell	Riera de Merlès	3651,22

Cuadro 3.1: Distancia mínima desde cada planta solar a la Red Natura 2000 más cercana. Fuente: elaboración propia mediante análisis en QGIS.

### 3.4. Implementar modelos predictivos para analizar la fragmentación de hábitats

El presente apartado tiene como objetivo aplicar modelos predictivos para analizar la relación entre la presencia de infraestructuras solares fotovoltaicas y la fragmentación del hábitat en zonas protegidas de Cataluña. Se pretende, mediante el uso de herramientas de análisis espacial, identificar si ciertas variables territoriales están asociadas a niveles más altos de fragmentación, y si es posible predecir dicha fragmentación a partir de la distribución y características de los parques solares.

Como paso previo, se ha consultado el dataset *Critical Habitats* disponible en la plataforma Kaggle [42], que ofrece una estructura de datos ambientales por fragmento geográfico (tipo de hábitat, superficie, amenazas, etc.) que identifica hábitats clave para la conservación en el estado de Connecticut, (EE. UU.). Se trata de una capa poligonal con una resolución espacial de 10 metros que delimita áreas de gran valor ecológico, asociadas a especies raras o vulnerables, y utilizadas para planificar estrategias de conservación. Este conjunto de datos ha sido útil como referencia estructural para organizar la información necesaria para nuestra aplicación, aunque no se ha utilizado directamente en el modelo desarrollado para nuestro estudio en Cataluña, ya que no está vinculado a la localización ni al tipo de infraestructura analizada.



Figura 3.9: Visualización del dataset *Critical Habitats* obtenido de la plataforma Kaggle y representado sobre el mapa del estado de Connecticut (EE. UU.) mediante QGIS. La imagen muestra polígonos correspondientes a áreas naturales clasificadas como hábitats críticos por su valor ecológico.



Para sustentar la construcción metodológica del modelo, se han seleccionado como referencias dos estudios previos:

- Un estudio en el sureste de Brasil que analiza la fragmentación ecológica usando imágenes Landsat y SIG. El artículo propone métricas clave como área del fragmento, forma, dispersión y distancia entre hábitats, que serán replicadas y adaptadas al contexto de Catalunya con capas SIG actuales. Este enfoque ofrece una base directa para la construcción de las variables dependientes del modelo [21]
- Un análisis desarrollado en el área metropolitana de Twin Cities (EE. UU.), en el que se aplican modelos espaciales para evaluar la evolución del paisaje urbano y su impacto sobre la fragmentación. Aunque centrado en crecimiento urbano, su enfoque predictivo y su uso de métricas de parches proporciona un marco útil para el análisis de escenarios en territorios modificados por infraestructuras energéticas. [5]

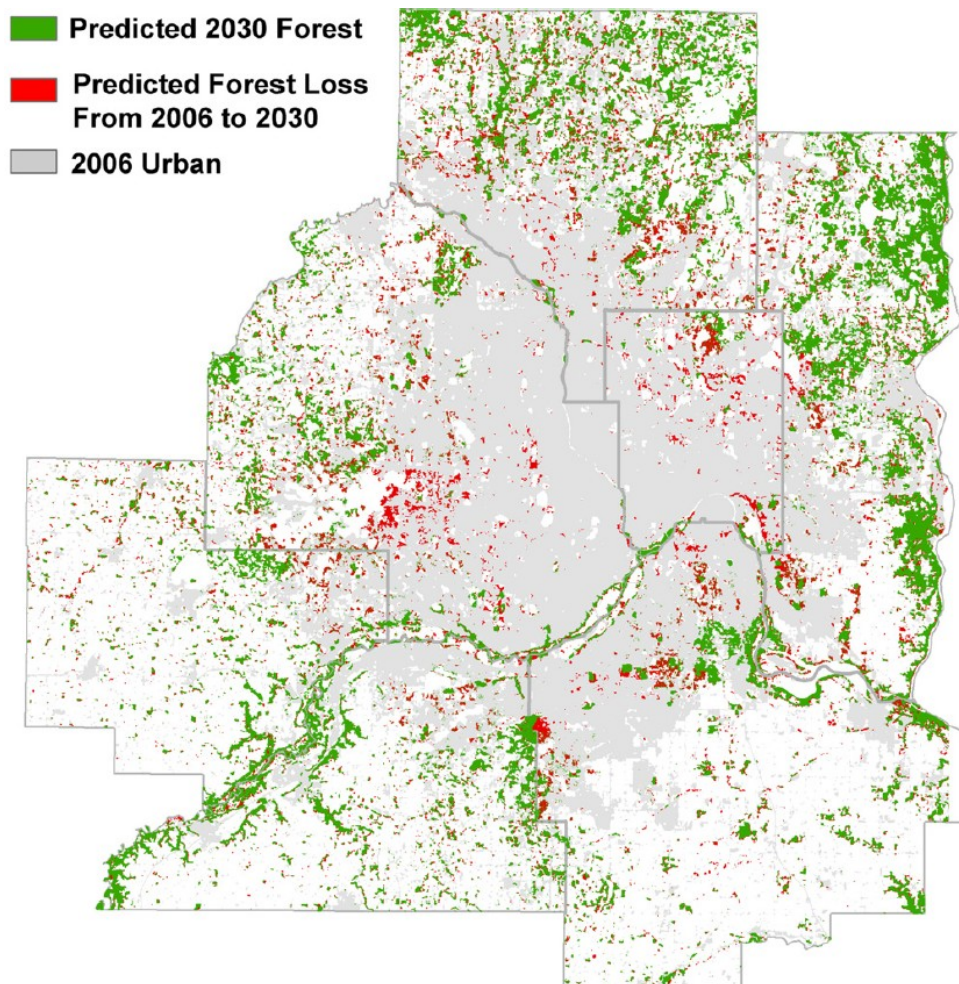


Figura 3.10: Superposición del bosque previsto para 2030 con la cobertura de suelo clasificada de 2006 (bosque y áreas urbanas). Fuente: estudio de fragmentación en el área metropolitana de Twin Cities. [5]

Ambos estudios serán tomados como referencia metodológica para definir las métricas de fragmentación, las variables independientes del modelo (uso del suelo, cercanía a infraestructuras, cobertura forestal, etc.) y la estrategia de análisis.

### 3.4.1. Unidad de análisis

Para este estudio, la unidad de análisis será una cuadrícula regular de  $1 \text{ km}^2$ , generada sobre el territorio catalán mediante herramientas SIG. Esta rejilla permite dividir el área de estudio en celdas homogéneas y facilita la asignación de variables espaciales a cada unidad territorial. En cada celda se calcularán métricas ambientales y de fragmentación, así como su relación con la cercanía a parques solares fotovoltaicos.

La cuadrícula fue generada mediante herramientas SIG en QGIS, utilizando la función *"crear cuadrícula"*. Se definió una malla de tipo rectangular con celdas de 1.000 metros por 1.000 metros ( $1 \text{ km}^2$ ), y como extensión de referencia se empleó la capa de zonas protegidas superpuestas. Una vez generada, la cuadrícula se transformó al sistema de referencia ETRS89 / UTM zona 31N (EPSG:25831) y se guardó en formato GeoPackage con el nombre de *rejilla\_1x1km* la cual contiene 70216 filas o rejillas de  $1 \text{ km}^2$ .



Figura 3.11: Visualización de las zonas protegidas de Catalunya sobre una rejilla cuadrangular de  $1 \text{ km}^2$ . Elaboración propia a través de QGIS.



Posteriormente, se realizó una superposición espacial entre esta cuadrícula y la capa combinada de zonas protegidas (ENPE, PEIN, Xarxa Natura 2000 y RAMSAR) para identificar qué celdas contenían espacios naturales relevantes, a través de la función *"intersección"* en QGIS. Se creó y guardó en formato GeoPackage otra capa con el nombre de **rejilla\_en\_zona\_protegida**. Ahora, su tabla de atributos contiene 42901 filas o rejillas de 1 km<sup>2</sup>.

A partir de esta nueva capa con rejillas en zonas protegidas, se procedió al cálculo de la distancia desde cada rejilla al parque solar fotovoltaico más cercano, con el objetivo de generar una variable que represente su proximidad a esta infraestructura. Esta variable, denominada **lineas\_rejilla\_a\_ps**, permite analizar si la cercanía a parques solares, aunque estos se encuentren fuera de los límites protegidos, puede influir en la fragmentación del hábitat o la conectividad ecológica.

El procedimiento se llevó a cabo en QGIS mediante la herramienta *"Línea más corta entre objetos"*, seleccionando como capa de origen la rejilla de 1x1 km<sup>2</sup> y como capa de destino los parques solares previamente filtrados. Se seleccionó la opción *"Distance to nearest point on feature"* para obtener la distancia mínima desde el centroide de cada celda al borde del parque solar más próximo. El resultado generó una nueva capa vectorial con una tabla de atributos que incluye la variable **distance**, expresada en metros, que se incorporará al conjunto de datos de entrada para los modelos predictivos.

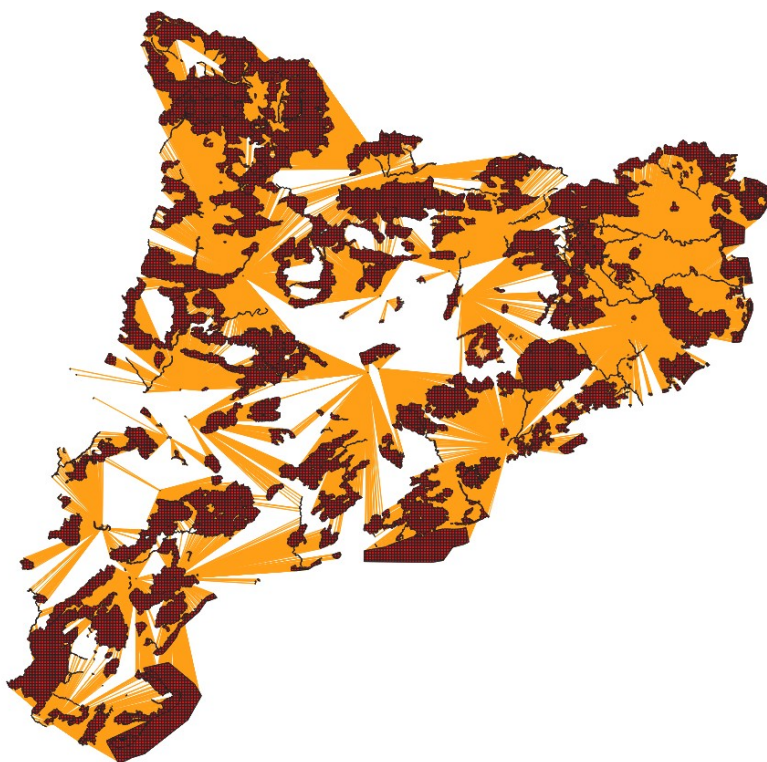


Figura 3.12: Visualización de una línea por cada celda (rejilla) de 1 km<sup>2</sup>, que va desde el centroide de esa celda hasta el parque solar más cercano. Fuente: elaboración propia a través de QGIS.

Posteriormente, este valor se transfirió a la capa de rejilla mediante una unión espacial “*Unir atributos por localización*”, obteniendo así una nueva capa con las celdas y su correspondiente distancia al parque solar más cercano. Esta variable se incorporó al conjunto de datos finales con el nombre `dist.distance`, y servirá para analizar si la proximidad a instalaciones solares guarda relación con el grado de fragmentación del hábitat.

Alternativamente, se valorará trabajar directamente con fragmentos naturales identificados a partir de coberturas del suelo (por ejemplo, masas forestales), especialmente en zonas protegidas. Esta opción permitirá comparar resultados con el enfoque basado en parches utilizado en el estudio de Brasil [21].

Una de las variables clave utilizadas en el análisis de fragmentación del paisaje es el porcentaje de superficie natural presente en cada unidad territorial. Esta variable, denominada `perc.natural`, permite cuantificar la proporción del territorio que mantiene usos del suelo compatibles con la conservación ecológica, lo cual resulta fundamental para evaluar el grado de alteración antrópica en el entorno de los parques solares.

Para su cálculo, se ha partido de la capa original de usos del suelo *Classificació d'usos i cobertes del sòl 2017*, en formato ráster, proporcionada por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Dado que esta capa contiene una clasificación detallada de los tipos de cobertura del suelo, se procedió a una reclasificación binaria que diferenciara entre usos considerados *naturales* y *no naturales*, con el objetivo de simplificar el análisis y enfocarlo en la funcionalidad ecológica del territorio.

Se consideraron como **no naturales** aquellas clases asociadas a infraestructuras, zonas urbanas, industriales o agrícolas intensivas, concretamente: *infraestructures viàries* (4), *urbanitzacions* (5), *zones urbanes* (6), *zones industrials i comercials* (7), *conreus herbacis de secà* (8), *conreus herbacis de regadiu* (9), *fruiters de secà* (10), *fruiters de regadiu* (11), *vinyes* (12), *zones amb vegetació escassa o nul·la* (21), *zones cremades* (22), *arrossars* (24) y *cítrics* (25). El resto de clases se clasificaron como usos **naturales**, por estar asociados a ecosistemas forestales, praderas o cuerpos de agua.

Esta reclasificación se implementó mediante la calculadora ráster de QGIS, generando una nueva capa binaria (`usos_naturales_actualizado.tif`) en la que las celdas con usos naturales tomaban el valor 1, y las no naturales el valor 0. Posteriormente, se utilizó la herramienta “Estadísticas de zona” para calcular la **media** de estos valores en cada celda de la rejilla regular de 1 km<sup>2</sup>. El valor medio obtenido representa la proporción de superficie natural dentro de cada unidad de análisis, y fue almacenado como nuevo campo (`perc_nat_mean`).

Finalmente, este valor fue transformado a porcentaje mediante la calculadora de campos, generando la variable definitiva `perc.natural`, que expresa el porcentaje de superficie con usos del suelo naturales dentro de cada celda de análisis. Esta variable será empleada en los modelos predictivos como uno de los indicadores de fragmentación del hábitat.

Todos los cálculos descritos se han consolidado en la capa final `rejilla_con_perc.natural`,

que contiene por cada celda de 1 km<sup>2</sup> la geometría espacial, la proporción (**perc\_nat\_mean**) y el porcentaje (**perc\_natural**) de suelo natural.

Una vez filtradas las curvas de nivel relevantes, se procedió a la generación de un modelo digital de elevación (DEM) con el objetivo de obtener una variable continua de altitud para cada unidad territorial de análisis. Este modelo se construyó a partir de la capa vectorial depurada mediante el proceso de rasterización en QGIS, utilizando como valor de entrada el campo Z correspondiente a la altitud de cada línea. Se definió una resolución espacial de 100 metros por píxel, adecuada para captar los gradientes de relieve sin introducir excesivo ruido a escala regional, y se limitó la extensión del ráster al área cubierta por la rejilla de análisis de 1 km<sup>2</sup>.

El DEM resultante permitió calcular la altitud media en cada celda de dicha rejilla, aplicando estadísticas zonales sobre la capa ráster generada. Este valor medio, almacenado en una nueva variable denominada **alt\_mean**, se incorporó al conjunto de variables explicativas del modelo predictivo.

La inclusión de la altitud responde a su potencial influencia en la distribución de hábitats y en el patrón de implantación de infraestructuras energéticas. Las zonas con mayor elevación tienden a presentar menor ocupación antrópica y condiciones ecológicas diferenciadas, mientras que las instalaciones solares suelen localizarse en áreas más accesibles y con pendientes suaves. Por tanto, la altitud constituye un factor ambiental relevante para modelar la fragmentación del hábitat y la localización de parques solares, justificando su consideración en los modelos de regresión o clasificación empleados en este estudio.

Una vez incorporadas las variables de distancia, cobertura y altitud, se procedió a generar una nueva variable continua que representa la **conectividad ecológica media** por celda de análisis. Para ello, se empleó la capa ráster descargada desde el visor HIPERMAPA, la cual contiene un valor por píxel entre 0 y 4.53 que cuantifica el grado de conectividad funcional del territorio en relación con el movimiento potencial de especies.

Con el objetivo de integrar esta información a escala de celda, se utilizó la herramienta “*Estadísticas zonales (raster)*” de QGIS, seleccionando como capa de análisis la rejilla regular de 1 km<sup>2</sup> (**rejilla\_en\_zona\_protegida**) y como capa ráster la conectividad ecológica. Se solicitó el cálculo del valor medio de conectividad por cada polígono (celda), generando un nuevo campo denominado **conn\_eco\_mean**.

El resultado final se almacenó en una nueva capa llamada **rejilla\_con\_conn\_eco\_mean**, que contiene el valor medio de conectividad ecológica para cada unidad territorial. Esta variable se incorpora al conjunto de predictores del modelo predictivo como indicador cuantitativo del grado de conexión funcional del paisaje. Su inclusión es especialmente relevante para evaluar la fragmentación del hábitat, ya que zonas con baja conectividad pueden ser más vulnerables a los efectos de las infraestructuras energéticas sobre el equilibrio ecológico.

### 3.4.2. Variables del modelo

A partir de las metodologías referenciadas y de los datos disponibles, se han definido las siguientes variables para su inclusión en los modelos predictivos:

- **Variable dependiente:**

- **Índice de fragmentación:** derivado de métricas como el número de fragmentos naturales por celda, su tamaño medio o la relación perímetro/área, obtenidas a partir del análisis de coberturas del suelo. En los modelos de regresión, será tratado como un valor numérico continuo; en los modelos de clasificación, se discretizará en categorías (alta / baja fragmentación) en función de umbrales ecológicos.

- **Variables independientes:**

- **Distancia al parque solar más cercano (dist\_distance):** variable continua en metros, calculada desde el centroide de cada celda de análisis.
- **Porcentaje de superficie natural (perc\_natural):** obtenido a partir de la reclasificación de usos del suelo de la capa del ICGC.
- **Altitud media (alt\_mean):** calculada a partir de un modelo digital de elevación generado desde curvas de nivel del RTT.
- **Presencia en zona protegida:** variable binaria que indica si una celda se encuentra dentro del perímetro de alguna figura de protección ambiental (ENPE, PEIN, Natura 2000, RAMSAR).
- **Cobertura del suelo dominante:** clase de uso del suelo más frecuente en cada celda, obtenida a partir del análisis modal sobre la capa *USOS\_COBERTES\_SOL\_2017*.
- **Conectividad ecológica media (conn\_eco\_mean):** valor medio de conectividad funcional del territorio por celda, obtenido a partir de la capa ráster del visor HIPERMAPA mediante estadísticas zonales.

### 3.4.3. Modelos a aplicar

Se plantea aplicar dos tipos de modelos predictivos, dependiendo del tipo de variable dependiente que se utilice:

- **Modelos de regresión:** se emplearán cuando se pretenda predecir un índice numérico continuo de fragmentación (por ejemplo, número medio de fragmentos por celda).
- **Modelos de clasificación:** se aplicarán cuando se defina una variable dicotómica o categórica, como presencia/ausencia de fragmentación severa, o clases de fragmentación (alta / media / baja).

Ambos enfoques serán evaluados mediante métricas de validación cruzada, como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la precisión global o el área bajo la curva (AUC), según el tipo de modelo utilizado.

### 3.4.4. Conclusión

Este apartado sienta las bases metodológicas para la construcción de modelos predictivos basados en datos espaciales, con el objetivo de analizar la relación entre la fragmentación del hábitat y la presencia de infraestructuras solares. La estrategia propuesta permite integrar variables ecológicas, territoriales y funcionales mediante el uso de herramientas SIG y análisis estadístico en Python, garantizando la reproducibilidad del estudio.

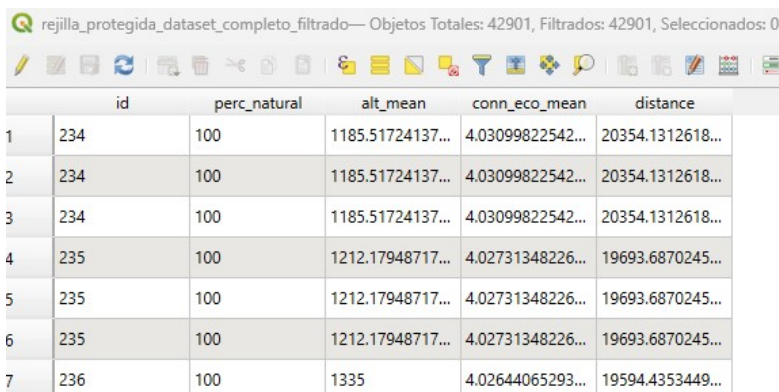
El modelo generado aportará evidencia cuantitativa sobre los patrones espaciales de fragmentación en zonas protegidas de Cataluña, y permitirá evaluar si la implantación de parques solares contribuye significativamente a dichos procesos. Este enfoque tiene un valor añadido para la planificación territorial y la toma de decisiones en escenarios de transición energética, especialmente en contextos con alta sensibilidad ambiental.

### 3.5. Evaluar el rendimiento de los modelos (métricas de clasificación/regresión)

Este apartado tiene como objetivo definir las métricas que se utilizarán para evaluar la fiabilidad y precisión de los modelos implementados en el estudio.

De acuerdo con los artículos de referencia seleccionados en el estado del arte [21] [5], se utilizarán métricas de evaluación adecuadas al tipo de modelo. En el caso de emplear modelos de regresión (por ejemplo, para estimar un índice de fragmentación), se aplicarán métricas como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Por otro lado, si se emplean modelos de clasificación (por ejemplo, para predecir si una celda está fragmentada o no), se considerarán métricas como la matriz de confusión.

En este punto, se ha completado la construcción del *dataset* base para el análisis predictivo. A partir de la capa de celdas de 1 km<sup>2</sup> ubicadas en zonas protegidas, se han unido de forma secuencial los valores de las variables necesarias mediante herramientas de geoprocésamiento en QGIS. Concretamente, se ha incorporado la distancia al parque solar más cercano (**distance**), el porcentaje de superficie con usos del suelo naturales (**perc\_natural**), la altitud media por celda (**alt\_mean**) obtenida a partir de un modelo digital de elevación, y el valor medio de conectividad ecológica (**conn\_eco\_mean**). Cada una de estas variables ha sido derivada previamente mediante análisis zonales o uniones espaciales a partir de capas vectoriales y ráster oficiales. El resultado es un único archivo en formato **.csv** con 42.901 registros, correspondiente a cada celda de análisis, que servirá como base estructurada para la implementación de modelos predictivos en Python.



	id	perc_natural	alt_mean	conn_eco_mean	distance
1	234	100	1185.51724137...	4.03099822542...	20354.1312618...
2	234	100	1185.51724137...	4.03099822542...	20354.1312618...
3	234	100	1185.51724137...	4.03099822542...	20354.1312618...
4	235	100	1212.17948717...	4.02731348226...	19693.6870245...
5	235	100	1212.17948717...	4.02731348226...	19693.6870245...
6	235	100	1212.17948717...	4.02731348226...	19693.6870245...
7	236	100	1335	4.02644065293...	19594.4353449...

Figura 3.13: Visualización de la tabla de atributos con las variables necesarias para la elaboración de nuestro dataset. Fuente: elaboración propia a través de QGIS.



```
import pandas as pd

# Cargar el dataset CSV generado en QGIS
df = pd.read_csv("rejilla_protegida_dataset_completo_filtrado.csv")

# Mostrar las primeras filas
print(df.head())
print(df.columns)
```

Figura 3.14: Script en Python para cargar el dataset. Elaboración propia.

### 3.5.1. Evaluación del modelo de regresión

Una vez generado el dataset limpio con 38.899 observaciones, se entrenó un modelo de regresión lineal utilizando la librería `scikit-learn` en Python. La variable dependiente fue el porcentaje de superficie natural (`perc_natural`) en cada celda, mientras que las variables independientes fueron la distancia al parque solar más cercano (`distance`), la altitud media (`alt_mean`) y el índice de conectividad ecológica (`conn_eco_mean`).

Los resultados obtenidos tras aplicar validación con una partición del 20 % del conjunto de datos fueron los siguientes:

- **Coeficiente de determinación ( $R^2$ ):** 0,2185
- **Error absoluto medio (MAE):** 20,90

El **coeficiente de determinación  $R^2$**  mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente que puede explicarse por las variables independientes del modelo, es decir, cuánto de lo que pasa en la variable que queremos predecir puede justificarse por los datos que usamos como entrada. En contextos ecológicos, donde existen múltiples factores difíciles de medir, valores de  $R^2$  entre 0,2 y 0,4 suelen considerarse aceptables, especialmente si se utilizan variables indirectas como en este caso [21]. En nuestro estudio, el modelo de regresión obtuvo un valor de  $R^2 = 0,2185$ , lo que indica que el modelo es capaz de explicar aproximadamente un 22 % del comportamiento observado, lo cual se considera aceptable para un análisis en sistemas territoriales.

El **MAE (Error Absoluto Medio)** expresa en unidades reales (porcentaje en este caso) el promedio de error entre los valores predichos y los observados, es decir, cuánto se equivoca el modelo de media al hacer una predicción. Un MAE de 20,9 sugiere que, en promedio, el modelo se desvía en un 20 % del valor real, lo cual es coherente con la dispersión de los datos y puede considerarse aceptable cuando se trabaja con datos espaciales de carácter ambiental y espaciales [43].

```
# Modelo de regresión lineal

import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import r2_score, mean_absolute_error

# 1. Cargar el dataset limpio
df = pd.read_csv("rejilla_protegida_dataset_limpio.csv")

# 2. Definir variables predictoras (X) y objetivo (y)
X = df[["distance", "alt_mean", "conn_eco_mean"]]
y = df["perc_natural"]

# 3. Dividir en conjuntos de entrenamiento y prueba
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# 4. Crear y entrenar el modelo
modelo = LinearRegression()
modelo.fit(X_train, y_train)

# 5. Realizar predicciones sobre el conjunto de prueba
y_pred = modelo.predict(X_test)

# 6. Evaluar el modelo
r2 = r2_score(y_test, y_pred)
mae = mean_absolute_error(y_test, y_pred)

print("RESULTADOS DEL MODELO DE REGRESIÓN:")
print("-----")
print(f"Coeficiente de determinación (R²): {r2:.4f}")
print(f>Error absoluto medio (MAE): {mae:.2f}")
```

Figura 3.15: Script en Python del modelo de regresión lineal. Elaboración propia.



### 3.5.2. Evaluación del modelo de clasificación

Además del modelo de regresión, se entrenó un modelo de clasificación binaria con el objetivo de predecir si una celda del territorio presenta fragmentación ecológica significativa o no, en función de la proximidad a parques solares. Los modelos de clasificación se utilizan frecuentemente en estudios ambientales para categorizar zonas según distintos umbrales ecológicos, como niveles de riesgo, degradación o fragmentación, y permiten traducir una variable continua en una decisión binaria de conservación o intervención [44].

Para este análisis, se generó una nueva variable categórica denominada **fragmentada**, a partir del porcentaje de superficie natural (**perc\_natural**) de cada celda. Esta variable toma el valor 1 (fragmentada) si el valor es inferior al 30 %, y 0 en caso contrario. Este umbral se basa en criterios ampliamente utilizados en ecología del paisaje, que consideran que una cobertura natural inferior al 30 % representa un grado elevado de fragmentación funcional, lo que puede comprometer la conectividad ecológica y la persistencia de especies [45].

Se aplicó una regresión logística simple utilizando únicamente la distancia al parque solar más cercano (**distance**) como variable independiente. Esta elección responde al objetivo de evaluar si la cercanía a infraestructuras solares puede asociarse directamente con una mayor probabilidad de fragmentación ecológica. El conjunto de datos se dividió en un 80 % para entrenamiento y un 20 % para test siguiendo una práctica común en el aprendizaje supervisado, que busca garantizar que el modelo disponga de suficientes datos para aprender, sin comprometer la capacidad de evaluar su rendimiento sobre observaciones no vistas. Esta proporción permite verificar si el modelo generaliza correctamente sin sobreajustarse a los datos de entrenamiento [46].

El modelo alcanzó una precisión global del 87 %, lo que significa que acertó en la mayoría de los casos al clasificar las celdas como fragmentadas o no fragmentadas. Sin embargo, su capacidad para distinguir bien entre ambos grupos fue limitada. El valor del área bajo la curva ROC (AUC) fue de 0,61, lo que indica que el modelo tiene una capacidad limitada para diferenciar entre celdas fragmentadas y no fragmentadas. Este resultado sugiere que, aunque la distancia a los parques solares puede influir en la fragmentación ecológica, no es suficiente por sí sola para explicarla con claridad.

## 3.6. Generar mapas temáticos y gráficos que visualicen los resultados obtenidos

### 3.6.1. Visualización del modelo de regresión

Con el objetivo de facilitar la comprensión de los resultados del modelo, se ha creado un gráfico de dispersión que compara los valores reales del porcentaje de cobertura natural (`perc_natural`) con los valores predichos por el modelo de regresión lineal. Cada punto representa una celda de 1 km<sup>2</sup> incluida en el conjunto de prueba del modelo (*test set*), ya que el análisis se ha realizado a partir de una cuadrícula regular que divide el territorio en unidades de esa superficie (`rejilla_1x1km`). Se ha añadido además una línea diagonal ( $y = x$ ) como referencia para indicar dónde se situarían los puntos si el modelo acertara exactamente en sus predicciones.

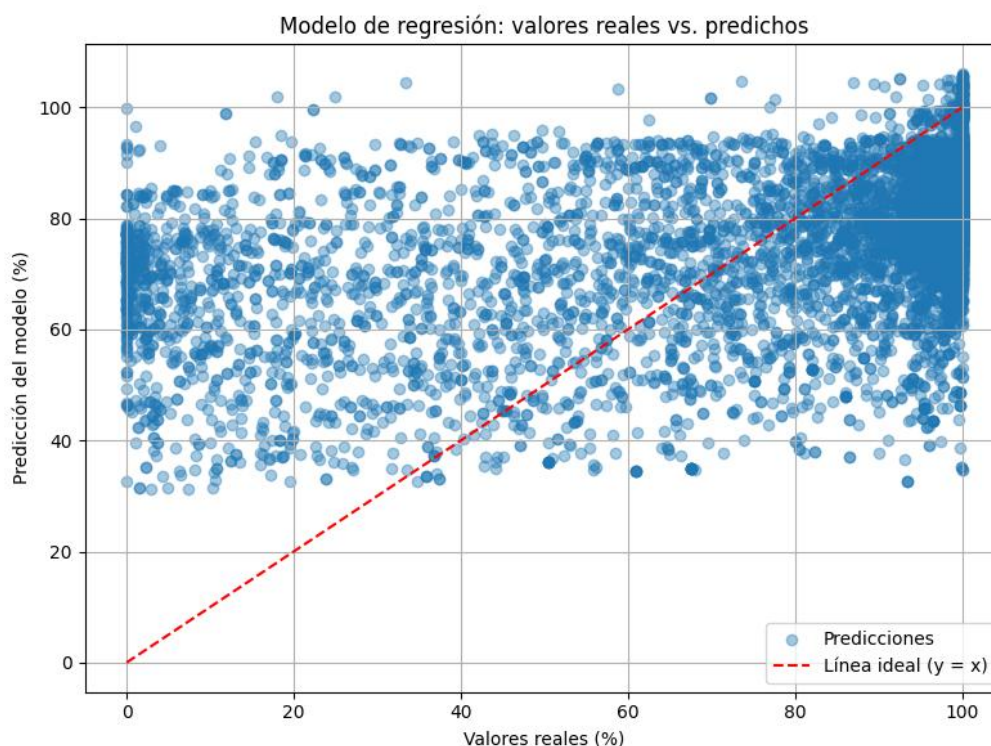


Figura 3.16: Relación entre los valores reales y predichos del modelo de regresión lineal. Elaboración propia mediante Python.

Como se puede ver en la Figura 3.16, los puntos están bastante dispersos respecto a la línea ideal, lo que refleja que el modelo no es muy preciso en sus predicciones. La mayoría se concentran entre el 50 % y el 90 % de cobertura natural, lo que indica que el modelo tiene más dificultades para acertar cuando los valores reales son muy bajos o muy altos. Esta dispersión concuerda con el valor del coeficiente de determinación obtenido ( $R^2 = 0,2185$ ), que muestra que el modelo es capaz de explicar solo una parte de la variabilidad en los datos.

A pesar de estas limitaciones, el gráfico es útil para entender mejor cómo se comporta el modelo y para detectar posibles errores sistemáticos, como una tendencia a sobrestimar o subestimar ciertos valores. También permite visualizar qué tan lejos están las predicciones de los valores reales en cada caso.

### 3.6.2. Visualización del modelo de clasificación

Para ilustrar el comportamiento del modelo de clasificación, se ha generado una curva ROC (Receiver Operating Characteristic), que permite evaluar cómo de bien el modelo distingue entre celdas fragmentadas y no fragmentadas en diferentes umbrales de decisión.

La Figura 3.17 muestra esta curva junto a una línea diagonal que representa una clasificación aleatoria (sin capacidad predictiva). El área bajo la curva (AUC) obtenida fue de **0.61**, lo que indica un rendimiento modesto. Esto sugiere que, si bien la distancia al parque solar puede tener cierta relación con la fragmentación, no es suficiente por sí sola para realizar predicciones precisas.

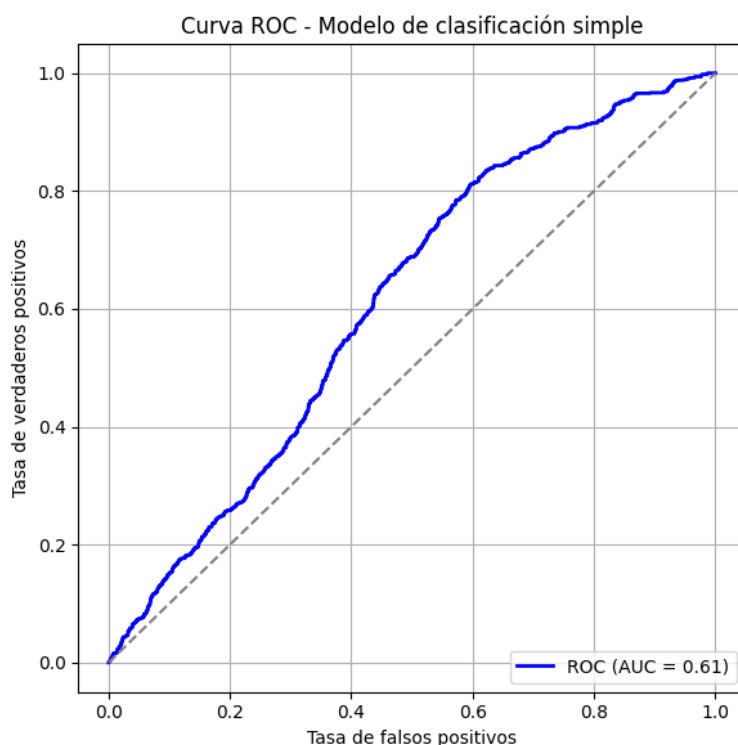


Figura 3.17: Curva ROC del modelo de clasificación simple (distancia como única variable predictora). Elaboración propia.

## Capítulo 4

# Entrega Final (Memoria y Producto)

### 4.1. Conclusiones finales

El objetivo principal del proyecto era analizar el posible impacto ambiental de los parques solares fotovoltaicos en zonas protegidas de Cataluña, mediante herramientas SIG y modelos predictivos. A lo largo del trabajo se han recopilado y procesado múltiples capas geoespaciales oficiales, se han procesado de manera adecuada para el objeto del estudio, se han implementado indicadores de fragmentación y se han aplicado modelos de regresión y clasificación para evaluar patrones espaciales.

En definitiva, los resultados muestran que, aunque existen ciertos patrones espaciales entre la fragmentación ecológica y la proximidad a parques solares, las variables empleadas (como la distancia, la altitud o la conectividad ecológica) solo explican parcialmente el fenómeno. El modelo de regresión logró captar una parte limitada de la variabilidad ( $R^2 = 0,22$ ), y el modelo de clasificación obtuvo una capacidad predictiva modesta ( $AUC = 0,61$ ), lo que evidencia que la fragmentación del hábitat depende de múltiples factores no incluidos en este análisis. Aun así, el estudio demuestra que es posible aproximarse al fenómeno con herramientas accesibles y datos públicos, abriendo la puerta a estudios más complejos que integren otras variables ecológicas, temporales o socioeconómicas.

A nivel personal, el desarrollo del trabajo me ha permitido consolidar habilidades técnicas en el uso del programa QGIS, análisis de múltiples bibliografías y, empezar a manejar instrumentos tan básicos pero tan complejos a la vez, como son los modelos predictivos y la programación en Python. No esperaba que con todas estas herramientas se pudiesen realizar tantos y tan variados estudios a aplicar en SIG para tantos campos diferentes. Yo solo lo he aplicado para una ínfima fracción pero las posibilidades son infinitas. Sin duda, me he dado cuenta que mi amor por los mapas tiene que pasar del modelo 'analógico' al digital.

## 4.2. Líneas futuras y mejoras del modelo

El análisis desarrollado en este trabajo representa una aproximación exploratoria al estudio de la fragmentación ecológica vinculada a la implantación de parques solares en Cataluña. No obstante, el enfoque puede ser ampliado y perfeccionado en futuras investigaciones mediante las siguientes líneas de mejora:

- **Ampliar el conjunto de variables independientes**, incorporando factores adicionales como la pendiente del terreno, la orientación (exposición solar), la distancia a zonas urbanizadas, vías de comunicación (carreteras o líneas ferroviarias), el tipo de cobertura vegetal dominante o la presencia de especies sensibles y corredores ecológicos. Estas variables podrían mejorar la capacidad explicativa del modelo.
- **Explorar modelos predictivos más avanzados**, como los árboles de decisión, bosques aleatorios (random forests) o algoritmos basados en gradiente (gradient boosting), que permiten detectar relaciones no lineales entre variables.
- **Incorporar la dimensión temporal**, incluyendo series de datos multianuales o imágenes satelitales históricas que permitan estudiar la evolución de la fragmentación en relación con la expansión de infraestructuras energéticas, cambios en el uso del suelo u otras presiones antrópicas.
- **Validar los modelos con observaciones de campo o estudios ecológicos previos**, para garantizar que los patrones detectados mediante SIG y modelos estadísticos se corresponden con impactos reales sobre la biodiversidad o la funcionalidad del ecosistema.

Estas mejoras permitirían desarrollar herramientas más precisas y fiables para apoyar la toma de decisiones en materia de planificación ambiental, ordenación territorial o evaluación de impacto ambiental, especialmente en un contexto de transición energética que requiere compatibilizar desarrollo e integración ecológica.

### 4.3. Revisar la perspectiva de género y alineamiento con los ODS

Aunque el objeto del proyecto no se enmarca específicamente en una temática de género, se ha mantenido una perspectiva inclusiva durante todo el desarrollo, utilizando lenguaje no sexista en la redacción y asegurando el acceso abierto al conocimiento generado sin discriminar ninguno de los autores consultados. Además, el trabajo se alinea claramente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030:

1. **ODS 5:** Igualdad de género. Mediante la inclusión de la perspectiva de género y asegurando que las decisiones y recomendaciones ambientales no generen desigualdades indirectas.
2. **ODS 7:** Energía asequible y no contaminante. Al evaluar el impacto ambiental de los parques solares, el proyecto apoya un desarrollo de infraestructuras renovables más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.
3. **ODS 11:** Ciudades y comunidades sostenibles. Promoviendo la conservación de los ecosistemas cercanos a infraestructuras solares, se favorece un entorno natural saludable para las comunidades locales.
4. **ODS 13:** Acción por el clima. El proyecto contribuye a la mitigación del cambio climático al permitir un mejor diseño y evaluación de proyectos de energía renovable.
5. **ODS 15:** Vida de ecosistemas terrestres. Ayudando a proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y la biodiversidad, el proyecto se alinea directamente con los objetivos de este ODS.

Este alineamiento refuerza el valor del trabajo como herramienta de apoyo a políticas sostenibles.

## 4.4. Producto obtenido: publicación del código y datos en un repositorio de GitHub

Como parte del compromiso con la transparencia científica y la reutilización de datos, se ha creado un repositorio en GitHub donde se han publicado:

- Los scripts en Python utilizados para limpiar datos, construir modelos y generar gráficos.
- Los datasets procesados en formato CSV y los metadatos necesarios para entender su estructura.
- Capturas de pantalla de QGIS y ejemplos de análisis espaciales realizados.
- Un archivo `README.md` explicativo sobre cómo reproducir el análisis.

Este repositorio constituye el producto digital del trabajo y permite que cualquier persona interesada pueda replicar el estudio o adaptarlo a otros contextos. El enlace al repositorio ha sido incluido en la versión final en PDF:

<https://github.com/Antonio-Fdez-UOC/TFG-impacto-parques-solares.git>

## Capítulo 5

### Glosario

- **AHP** (*Analytic Hierarchy Process* o **Proceso Analítico Jerárquico**): Método de decisión multicriterio que permite priorizar criterios a través de comparaciones por pares.
- **Análisis / modelo fractal**: Técnica que permite medir la complejidad de formas en la naturaleza, como los fragmentos de hábitat, para analizar si los bordes de estas áreas son simples o irregulares, ayudando a entender la fragmentación del paisaje.
- **Análisis geoespacial**: Proceso de examinar datos geográficos para detectar patrones, relaciones o tendencias.
- **Análisis multivariante**: Conjunto de técnicas estadísticas utilizadas para analizar más de una variable dependiente a la vez.
- **Biodiversidad**: Variedad de especies animales y vegetales presentes en un entorno natural.
- **Capa ráster**: Tipo de representación espacial en formato matricial donde el territorio se divide en una cuadrícula de celdas (píxeles), cada una con un valor asociado. Se utiliza comúnmente para representar variables continuas o categóricas como el uso del suelo, la altitud o la cobertura forestal.
- **Cartografía temática**: Representación gráfica de datos espaciales centrada en un tema específico, como el impacto ambiental.
- **Clasificador**: Modelo predictivo usado para categorizar datos en clases o grupos definidos.
- **Cobertura del suelo**: Distribución y tipo de superficie terrestre (bosques, cultivos, áreas urbanas, etc.) observable en un área determinada.
- **Coefficiente de determinación ( $R^2$ )**: Métrica usada en modelos de regresión para indicar qué proporción de la variación de la variable dependiente puede explicarse por las variables independientes. Toma valores entre 0 y 1, donde  $R^2 = 1$  indica una predicción perfecta.



- **Conectividad ecológica:** Capacidad del entorno para permitir el movimiento de especies y el flujo ecológico entre hábitats.
- **CREAF:** Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales, institución catalana que ofrece datos ambientales y de biodiversidad.
- **Dashboard:** Panel visual interactivo que combina gráficos, mapas y tablas para mostrar datos en tiempo real o resultados de análisis. En planificación energética, se utilizan para explorar indicadores geográficos y facilitar la toma de decisiones.
- **Densidad de fragmentos:** Métrica que indica cuántos fragmentos de hábitat existen en una unidad de superficie. A mayor densidad, mayor fragmentación del paisaje.
- **Ecosistema:** Conjunto de organismos vivos y el medio físico donde interactúan.
- **Fragmentación de hábitats:** División de ecosistemas continuos en porciones aisladas, generalmente causada por actividades humanas.
- **Fuzzy-AHP:** Método que combina el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con lógica difusa para tener en cuenta la incertidumbre en la valoración de criterios. Se usa en la selección de sitios y toma de decisiones ambientales.
- **GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*):** Plataforma internacional de acceso abierto que proporciona datos sobre biodiversidad a escala mundial.
- **HIPERMAPA de Catalunya:** Visor y repositorio de datos geográficos de Cataluña que permite acceder a capas ambientales y territoriales.
- **ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya):** Organismo oficial que proporciona información cartográfica, geológica y geoespacial de Cataluña.
- **Land sparing (segregación espacial):** Concentración de infraestructuras (como parques solares) en zonas específicas, minimizando su extensión territorial y dejando grandes áreas naturales intactas para la conservación de la biodiversidad.
- **Land sharing (compartición del territorio):** Integración de infraestructuras con los usos del suelo naturales o agrícolas, permitiendo una convivencia en el mismo espacio geográfico.
- **Librería:** Conjunto de funciones o herramientas predefinidas que permiten realizar tareas específicas en programación (como visualización o análisis estadístico).
- **Matriz de confusión:** Tabla que compara las predicciones de un modelo de clasificación con los valores reales. Se compone de cuatro elementos: Verdaderos Positivos (VP), Verdaderos Negativos (VN), Falsos Positivos (FP) y Falsos Negativos (FN). Permite calcular métricas clave para evaluar la calidad del modelo.
- **MCDM (*Multi-Criteria Decision Making* o Modelo de decisión multicriterio):** Conjunto de técnicas para evaluar múltiples alternativas considerando distintos criterios, usualmente en contextos de incertidumbre.

- **Modelado espacial:** Técnica que permite simular patrones geográficos o cambios en el territorio mediante herramientas SIG y matemáticas.
- **Modelos predictivos:** Técnicas de análisis de datos que permiten anticipar resultados o eventos futuros basados en datos históricos.
- **ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible):** Objetivos propuestos por la ONU para abordar retos globales como la pobreza, el cambio climático y la igualdad de género.
- **Parque solar fotovoltaico:** Infraestructura dedicada a la generación de electricidad a partir de la radiación solar mediante paneles fotovoltaicos.
- **PEIN (Plan de Espacios de Interés Natural):** Herramienta de planificación ambiental de Cataluña para proteger espacios naturales.
- **PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System):** Herramienta europea que proporciona datos sobre radiación solar y rendimiento fotovoltaico.
- **QGIS:** Software libre de Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizado para análisis y visualización de datos espaciales.
- **Radiación solar:** Energía emitida por el sol que incide sobre la superficie terrestre, fundamental para el funcionamiento de paneles solares.
- **Red Natura 2000:** Red ecológica europea de áreas protegidas para la conservación de la biodiversidad.
- **Regresión:** Modelo estadístico que describe la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes.
- **Regresión polinómica:** Tipo de regresión que utiliza una función polinómica para modelar la relación entre variables.
- **SIG (Sistemas de Información Geográfica):** Herramientas que permiten gestionar, analizar y visualizar datos geoespaciales.
- **Sistema de Soporte a la Decisión (DSS o Decision Support System):** Herramienta informática que combina datos, análisis espacial y modelos para apoyar la toma de decisiones complejas, empleada para comparar ubicaciones, evaluar impactos y seleccionar alternativas en proyectos de infraestructuras.
- **Teledetección:** Técnica que permite obtener información de la superficie terrestre mediante sensores satelitales o aéreos.
- **Topografía:** Estudio de las formas del terreno y sus elevaciones mediante mapas y modelos digitales.

## Capítulo 6

# Bibliografía

- [1] Ascensao F, Chozas S, Serrano H, Branquinho C. Mapping potential conflicts between photovoltaic installations and biodiversity conservation. *Biological Conservation*. 2023;287:110331.
- [2] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Referencial Topogràfic Territorial (RTT);. <https://www.icgc.cat/ca/Geoinformacio-i-mapes/Dades-i-productes/Geoinformacio-cartografica/Referencial-Topografic-Territorial>.
- [3] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Classificació d'usos i cobertes del sòl 2017;. [https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html?background=icgc\\_mapa\\_estandard&bg\\_transp=1&BBOX=68678,4385905,948982,4803567&layers=USOS\\_COBERTES\\_SOL\\_2017\\_10M&styles=0&transparency=1](https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html?background=icgc_mapa_estandard&bg_transp=1&BBOX=68678,4385905,948982,4803567&layers=USOS_COBERTES_SOL_2017_10M&styles=0&transparency=1).
- [4] Generalitat de Catalunya. Hipermapa – Capa de Conectividad Ecológica (SERVECO-SIS.CONECTECOLOGICA); 2025. [https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html?background=icgc\\_mapa\\_estandard&bg\\_transp=1&BBOX=73191,4355856,956661,4775896&layers=SERVECOSIS\\_CONECTECOLOGICA&styles=0&transparency=1](https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html?background=icgc_mapa_estandard&bg_transp=1&BBOX=73191,4355856,956661,4775896&layers=SERVECOSIS_CONECTECOLOGICA&styles=0&transparency=1).
- [5] Paudel S, Yuan F. Assessing landscape changes and dynamics using patch analysis and GIS modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012;16:66-76.
- [6] Boletín Oficial del Estado. Ley 12/1985, de Espacios Naturales;. Available from: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1985-14282>.
- [7] Boletín Oficial del Estado. Ley 42/2007, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad;. Available from: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-21490>.
- [8] Generalitat de Catalunya. Normativa sobre actividades en espacios naturales protegidos;. Available from: <https://mediambient.gencat.cat/es/detalls/Articles/Normativa-00013>.
- [9] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Estrategia sobre la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transportes;. Available from: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/ecosistemas-y-conectividad/fragmentacion.html>.

- [10] Comisión Europea. Environment Action Programme to 2030;. Available from: [https://environment.ec.europa.eu/strategy/environment-action-programme-2030\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/environment-action-programme-2030_en).
- [11] Vicenç Vives. Guías para una docencia universitaria con perspectiva de género;. Available from: <https://www.vives.org/programes/igualtat-genero/guies-docencia-universitaria-perspectiva-genero/>.
- [12] Naciones Unidas. Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible;. Available from: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>.
- [13] Shi J, Yu J, Guan J. A scientometrics analysis and visualization of the ecological impact of photovoltaic projects. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2024;16(3).
- [14] Boscarino-Gaetano R, Vernes K, Nordberg EJ. Creating wildlife habitat using artificial structures: a review of their efficacy and potential use in solar farms. *Biological Reviews*. 2024;99(5):1848-67.
- [15] López-Bravo C, Mora-López L, Sidrach-deCardona M, Márquez-Ballesteros MJ. A comprehensive analysis based on GIS-AHP to minimise the social and environmental impact of the installation of large-scale photovoltaic plants in south Spain. *Renewable Energy*. 2024;226:120387.
- [16] Bandira PNA, Tan ML, Teh SY, Samat N, Shaharudin SM, Mahamud MA, et al. Optimal solar farm site selection in the george town conurbation using GIS-based multi-criteria decision making (MCDM) and NASA POWER data. *Atmosphere*. 2022;13(12):2105.
- [17] Tao S, Rogan J, Ye S, Geron N. Mapping photovoltaic power stations and assessing their environmental impacts from multi-sensor datasets in Massachusetts, United States. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2023;30:100937.
- [18] Lopez Ruiz D. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA PLANTA FOTOVOLTAICA CEBRIÁN SOLAR EN EL TÉRMINO MUNICIPAL SAN CEBRIÁN DE MAZOTES (VALLADOLID). 2024.
- [19] Yuan F. Land-cover change and environmental impact analysis in the Greater Mankato area of Minnesota using remote sensing and GIS modelling. *International Journal of Remote Sensing*. 2008;29(4):1169-84.
- [20] Kovshun N, Solodkyy V, Nalyvaiko N, Zhemba A, Syrotynska A. Using correlation and regression analysis methods to assess the effectiveness of environmental projects. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. vol. 1429. IOP Publishing; 2024. p. 012012.
- [21] Jorge LAB, Garcia GJ. A study of habitat fragmentation in Southeastern Brazil using remote sensing and geographic information systems (GIS). *Forest Ecology and Management*. 1997;98(1):35-47.

- [22] Izquierdo Osado MI. Estudio de un modelo multicriterio para estudiar la viabilidad de un cultivo energético en la Península Ibérica. Aplicación a la comarca de Navalmoral de la Mata. Montes; 2015.
- [23] Ming G, Wenbing Y, Mingguo M, Xin L. Study on the oasis landscape fragmentation in northwestern China by using remote sensing data and GIS: a case study of Jinta oasis. Environmental Geology. 2008;54:629-36.
- [24] Fiduccia A, Pagliaro F, Gugliermetti L, Filesi L. A GIS-based model for the analysis of ecological connectivity. In: International Conference on Computational Science and Its Applications. Springer; 2017. p. 600-12.
- [25] Pimentel Da Silva GD, Magrini A, Branco DAC. A multicriteria proposal for large-scale solar photovoltaic impact assessment. Impact Assessment and Project Appraisal. 2020;38(1):3-15.
- [26] Adem Esmail B, Geneletti D. Multi-criteria decision analysis for nature conservation: A review of 20 years of applications. Methods in Ecology and Evolution. 2018;9(1):42-53.
- [27] Amin A, Fazal S. Assessment of forest fragmentation in District Shopian using multitemporal land cover (a GIS approach). Journal of Geosciences and Geomatics. 2017;5(1):12-23.
- [28] Prinsloo FC. Development of a GIS-based decision support tool for environmental impact assessment and due-diligence analyses of planned agricultural floating solar systems. Master of Science Dissertation (Geographical Information), University of South Africa. 2019;1:1-121.
- [29] Asakereh A, Soleymani M, Sheikhdavoodi MJ. A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. Solar Energy. 2017;155:342-53.
- [30] Glint Solar. Solar Site Analysis Platform;. <https://www.glintsolar.com>.
- [31] ESRI. Renewable Energy Solutions;. <https://www.esri.com/en-us/industries/renewable-energy/overview>.
- [32] ESMAP and World Bank. Global Solar Atlas;. <https://globalsolaratlas.info>.
- [33] Generalitat de Catalunya. Espais Naturals de Protecció Especial (ENPE);. [https://sig.gencat.cat/ows/ESPAIS\\_NATURALS/wfs?service=wfs&version=2.0&request=getfeature&typename=ESPAIS\\_NATURALS:ESPAISNATURALS\\_ENPE&outputformat=shape-zip](https://sig.gencat.cat/ows/ESPAIS_NATURALS/wfs?service=wfs&version=2.0&request=getfeature&typename=ESPAIS_NATURALS:ESPAISNATURALS_ENPE&outputformat=shape-zip).
- [34] Generalitat de Catalunya. Pla d'Espais d'Interès Natural (PEIN);. [https://sig.gencat.cat/ows/ESPAIS\\_NATURALS/wfs?service=wfs&version=2.0&request=getfeature&typename=ESPAIS\\_NATURALS:ESPAISNATURALS\\_PEIN&outputformat=shape-zip](https://sig.gencat.cat/ows/ESPAIS_NATURALS/wfs?service=wfs&version=2.0&request=getfeature&typename=ESPAIS_NATURALS:ESPAISNATURALS_PEIN&outputformat=shape-zip).

- [35] Generalitat de Catalunya. Xarxa Natura 2000 - Red europea de espacios protegidos;. [https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html?param=param&color=vermell&background=orto\\_ICC&BBOX=154934.710744,4485000,639065.289256,4752000&layers=ESPAISNATURALS\\_XARNAT\\_2000](https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html?param=param&color=vermell&background=orto_ICC&BBOX=154934.710744,4485000,639065.289256,4752000&layers=ESPAISNATURALS_XARNAT_2000).
- [36] Generalitat de Catalunya. RAMSAR - Humedales de importancia internacional;. [https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html?param=param&color=vermell&background=topo\\_ICC&BBOX=144799.428571,4485000,649200.571429,4752000&layers=ESPAISNATURALS\\_RAMSAR](https://sig.gencat.cat/visors/hipermapa.html?param=param&color=vermell&background=topo_ICC&BBOX=144799.428571,4485000,649200.571429,4752000&layers=ESPAISNATURALS_RAMSAR).
- [37] Generalitat de Catalunya. Els espais naturals de protecció especial a Catalunya;. [https://mediambient.gencat.cat/ca/05\\_ambits\\_dactuacio/patrimoni\\_natural/senp\\_catalunya/els\\_espais\\_naturals\\_de\\_proteccio\\_especial/](https://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/patrimoni_natural/senp_catalunya/els_espais_naturals_de_proteccio_especial/).
- [38] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Zonificación ambiental para energías renovables: Eólica y Fotovoltaica;. Available from: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/zonificacion\\_ambiental\\_energias\\_renovables.html](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/zonificacion_ambiental_energias_renovables.html).
- [39] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Zonificación ambiental para la implantación de energías renovables: Eólica y Fotovoltaica. Resumen ejecutivo;. Available from: [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/documento0resumenejecutivo\\_tcm30-518037.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/documento0resumenejecutivo_tcm30-518037.pdf).
- [40] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Guía para la elaboración de estudios de impacto ambiental de proyectos de plantas solares fotovoltaicas y sus infraestructuras de evacuación;. Available from: [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/guiaelaboracionesiplantasfotovoltaicassgea\\_tcm30-538300.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/evaluacion-ambiental/guiaelaboracionesiplantasfotovoltaicassgea_tcm30-538300.pdf).
- [41] Generalitat de Catalunya. Decreto Ley 16/2019, de medidas urgentes para la emergencia climática y el impulso a las energías renovables (modificado por Ley 5/2020 y Decreto Ley 5/2022);. Available from: [https://mediambient.gencat.cat/es/05\\_ambits\\_dactuacio/avaluacio\\_ambiental/energies\\_renovables/normativa/](https://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/avaluacio_ambiental/energies_renovables/normativa/).
- [42] Kumar U. Critical Habitats Data;. Available from: <https://www.kaggle.com/datasets/utkarshx27/critical-habitats-data>.
- [43] Willmott CJ, Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*. 2005;30(1):79-82.
- [44] Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*. 2006;29(2):129-51.
- [45] Andrén H. Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos*. 1994;71(3):355-66.

- [46] Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. New York: Springer; 2009.