

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Estudio de la ubicación de una subestación eléctrica en la comarca de La Campiña mediante un sistema de información geográfica

Autor: Álvaro Hidalgo Ruiz

Tutor: José Lázaro Amaro Mellado

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Estudio de la ubicación de una subestación eléctrica en la comarca de La Campiña mediante un sistema de información geográfica

Autor:

Álvaro Hidalgo Ruiz

Tutor:

José Lázaro Amaro Mellado

Profesor asociado

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Estudio de la ubicación de una subestación eléctrica en la comarca de La Campiña mediante un sistema de información geográfica

Autor: Álvaro Hidalgo Ruiz

Tutor: José Lázaro Amaro Mellado

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mi familia, en especial a mis padres, por aportarme todos los medios para mi desarrollo profesional y permitirme plena libertad de decisiones académicas.

A mi tutor.

El aumento de los precios en los combustibles fósiles, junto a una sociedad concienciada con el cuidado del planeta y la importancia de las fuentes de energía renovables, provocan que cada año la demanda de energía eléctrica aumente.

Para poder hacer frente a esta demanda será necesario tanto producir la energía necesaria como transportarla al consumidor final, mejorando la red de transporte en la cual se encuentran incluidas las subestaciones.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es analizar las distintas ubicaciones para una subestación en la comarca sevillana de La Campiña. Para determinar la mejor localización y analizarla, estableceremos un análisis multicriterio. Como herramienta informática, utilizaremos un Sistema de Información Geográfica (SIG), que nos permitirá realizar un estudio a través del manejo y la representación de datos geográficos. El método propuesto parte de información oficial y libre que se encuentra alojada en diferentes páginas Web, como la de los Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA) o el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). La herramienta SIG empleada será QGIS, programa de código libre y abierto.

Abstract

The increase in prices of fossil fuels, a society aware of environmental care, and the importance of renewable energy sources lead to an annual increase in the demand for electricity.

In order to meet this demand, it will be necessary to both generate electric energy and transport it to the end consumer, improving the transportation network, which includes substations.

This Major Project Report aims to analyze the different locations for a substation in the La Campiña region of Seville. In order to determine the best location and analyze it, we will establish a multicriteria analysis. As a computer tool, we will use a Geographic Information System (GIS) to carry out a study by managing and representing geographic data. The proposed method is based on official and free information hosted on different Web pages, such as the Basic Spatial Data of Andalusia (*Datos Espaciales de Referencia de Andalucía, DERA*) or the Download Center of the National Center for Geographic Information (*Centro Nacional de Información Geográfica, CNIG*). The GIS tool used will be QGIS, free and open-source software.

Aclaración

El presente trabajo se trata de un ejercicio metodológico cuyo principal objetivo es ejemplificar el potencial de los sistemas de información geográfica para lograr soluciones ante problemas de ubicación geográfica, trabajando con distintos criterios y procesando gran cantidad de datos.

No trata de alcanzar una solución real, para ello se debería de haber considerado una serie de factores que no se han tenido en cuenta.

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
Aclaración	XIII
Índice	XV
Índice de Tablas	XVIII
Índice de Figuras	XX
Notación	XXIII
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivos</i>	2
1.2 <i>Estructura del trabajo</i>	2
1.3 <i>Ámbito geográfico del trabajo</i>	2
2 Subestación Eléctrica	5
2.1 <i>Cómo funciona</i>	5
2.2 <i>Utilidad</i>	5
2.3 <i>Partes</i>	7
2.4 <i>Tipos</i>	7
2.5 <i>Subestación elegida</i>	8
3 Sistema Eléctrico Español	9
3.1 <i>Operación del sistema eléctrico español</i>	9
3.1.1 <i>Equilibrio constante entre la generación y consumo</i>	10
3.1.2 <i>Servicios de ajuste del sistema</i>	10
3.2 <i>Comercialización de la energía en España</i>	11
3.3 <i>Infraestructura eléctrica de Andalucía</i>	11
4 Legislación	13
4.1 <i>Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión.</i>	13
4.2 <i>Condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas</i>	15
4.3 <i>Reglamento electrotécnico para baja tensión.</i>	16
4.4 <i>Regulación de las actividades de transporte, distribución, comercialización y suministros</i>	18
4.5 <i>UNE-EN 60076</i>	18
4.6 <i>Ley 24/2013, del 26 de diciembre, del Sector Eléctrico</i>	18
4.6.1 <i>Artículo 7: Garantía de suministro</i>	19
4.6.2 <i>Artículo 16: Peajes de acceso a las redes y cargos asociados a los costes del sistema</i>	19
4.6.3 <i>Artículo 39: Autorización de instalaciones de distribución</i>	20
4.6.4 <i>Artículo 53: Autorización de instalaciones de transporte, distribución, producción y líneas directas.</i>	20
4.6.5 <i>Artículo 56: Utilidad pública</i>	21
4.7 <i>Ordenación Urbanística en Andalucía</i>	21

4.8	<i>Ordenación de territorio y urbanismo</i>	22
5	Análisis de riesgo y seguridad	23
5.1	<i>Señalización</i>	24
5.2	<i>Impacto medio ambiental</i>	24
6	Evaluación económica	26
7	Criterios considerados para la ubicación de una subestación eléctrica	27
7.1	<i>Criterios considerados</i>	27
7.2	<i>Criterios ampliados (no considerados en este trabajo)</i>	28
7.3	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	28
8	Sistema de Información Geográfica	32
8.1	<i>Qué son los SIG</i>	32
8.2	<i>Funcionamiento de un SIG</i>	32
8.2.1	<i>Modelo vectorial</i>	33
8.2.2	<i>Modelo ráster</i>	35
8.3	<i>QGIS</i>	36
9	Implementación del trabajo	37
9.1	<i>Datos de partida</i>	38
9.2	<i>Análisis multicriterio</i>	40
9.2.1	<i>Pendiente</i>	40
9.2.2	<i>Densidad de consumo eléctrico local</i>	45
9.2.3	<i>Distancia a carreteras principales</i>	50
9.2.4	<i>Distancia a la red eléctrica</i>	54
9.2.5	<i>Distancia a subestaciones ya existentes</i>	57
9.2.6	<i>Expropiación de terrenos</i>	60
9.3	<i>Función objetivo</i>	62
9.3.1	<i>Temperatura</i>	63
9.3.2	<i>Espacios protegidos</i>	65
9.3.3	<i>Puntuación final</i>	67
9.4	<i>Resultado final</i>	69
9.4.1	<i>Estudio zona 1</i>	73
9.4.2	<i>Estudio zona 2</i>	74
9.4.3	<i>Estudio zona 3</i>	75
10	Conclusión	76
	Referencias	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Resistividad de diversos materiales a 20°C	6
Tabla 2 - Tensiones nominales normalizadas	14
Tabla 3 - Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos.	15
Tabla 4 - Valor máximo de campo eléctrico y magnético en subestaciones	15
Tabla 5 - Intensidad máxima admisible en amperios para cables soterrados	17
Tabla 6 - Intensidad máxima admisible en amperios para conductores de cobre al aire libre	17
Tabla 7 - Escala del 1 al 9 con significado	29
Tabla 8 - Comparación de los criterios	30
Tabla 9 - Índice para matrices aleatorias RI	30
Tabla 10 - Puntuación respecto a la inclinación del terreno	43
Tabla 11 - Puntuación para la demanda eléctrica	49
Tabla 12 - Puntuación respecto a la distancia de las carreteras principales	52
Tabla 13 - Puntuación en función de la distancia a la red eléctrica	55
Tabla 14 - Puntuación en función de la distancia a una subestación	58
Tabla 15 - Puntuación reduciendo la distancia a la mitad	59
Tabla 16 - Tabla de importancia relativa para los criterios	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Demanda por comunidades autónomas en 2021 y variación respecto al año anterior	1
Figura 2 – Ubicación de La Campiña	3
Figura 3 - Municipios en La Campiña	4
Figura 4 - Transformador eléctrico reductor	5
Figura 5 - Mapa del sistema eléctrico ibérico	9
Figura 6 - Seguimiento de la demanda de energía eléctrica peninsular para el día 26/02/2023	10
Figura 7 - Evolución del TIEPI en Andalucía y España	11
Figura 8 - Evolución del NIEP en Andalucía y España	12
Figura 9 - Perfiles de medición en subestaciones	16
Figura 10 - Cálculo de la matriz de prioridad y obtención de los pesos mediante AHP	29
Figura 11 - Importancia relativa de los criterios	30
Figura 12 - Capas o estratos de información en un SIG	33
Figura 13 - Vector puntual característico	34
Figura 14 - Característica en forma de línea poligonal	34
Figura 15 - Característica poligonal	35
Figura 16 - Representación de una capa de rasterización señalizando una celda	35
Figura 17 – Procedimiento para la elaboración del trabajo	37
Figura 18 - Portal DERA	38
Figura 19 – Centro de descargas perteneciente al Centro Nacional de Información Geográfica	39
Figura 20 - Comarcas agrarias en Andalucía con La Campiña seleccionada	40
Figura 21 - Modelo de pendientes para Andalucía	41
Figura 22 - Sistema de referencia de coordenadas asignado	41
Figura 23 – Mapa de mosaico de altura en La Campiña	42
Figura 24 - Mosaico de altura combinado en La Campiña	43
Figura 25 - Tabla de valores introducida en QGIS	44
Figura 26 - Registro del algoritmo reclasificar	44
Figura 27 - Mapa rasterizado de pendiente en La Campiña	45
Figura 28 - Pasos para obtener la demanda estimada en cada celda	46
Figura 29 - Distribución de población en Andalucía	47
Figura 30 - Demanda eléctrica por municipio	48
Figura 31 - Malla de población recortada a La Campiña	48
Figura 32 - Demanda eléctrica puntuada en La Campiña	50
Figura 33 - Mapa de carreteras de Andalucía	51
Figura 34 - Mapa de carreteras en La Campiña	51

Figura 35 - <i>Buffers</i> respecto a las carreteras en La Campiña	52
Figura 36 - <i>Buffers</i> de carreteras en La Campiña respecto a un mapa topográfico	53
Figura 37 - Mapa red eléctrica en Andalucía	54
Figura 38 - Mapa red eléctrica en La Campiña	55
Figura 39 - <i>Buffers</i> respecto a líneas eléctricas de alta tensión en La Campiña	56
Figura 40 - <i>Buffers</i> de líneas eléctricas en La Campiña respecto a un mapa topográfico de la zona	56
Figura 41 - Mapa de subestaciones en Andalucía	57
Figura 42 - Subestaciones eléctricas en La Campiña	58
Figura 43 - <i>Buffers</i> incompletos de subestaciones en La Campiña	59
Figura 44 - <i>Buffers</i> de subestaciones en La Campiña nuevo criterio	60
Figura 45 - Suelos industriales en Andalucía	61
Figura 46 - Suelos industriales en La Campiña	61
Figura 47 - Mapa de puntuación para La Campiña	63
Figura 48 - Mapa de temperatura media anual para Andalucía	64
Figura 49 - Mapa de temperatura media anual para La Campiña	65
Figura 50 - Zonas protegidas en Andalucía	66
Figura 51 - Zonas protegidas en La Campiña	67
Figura 52 - Mapa final de puntuación para La Campiña	68
Figura 53 - Distribución de puntuación en la comarca de La Campiña	68
Figura 54 - Histograma para los valores de puntuación	69
Figura 55 - Mayor puntuación en La Campiña	70
Figura 56 - Puntuación más elevada en El Viso del Alcor	71
Figura 57 - Zonas de estudio	72
Figura 58 – Primera zona de estudio	73
Figura 59 – Segunda zona de estudio	74
Figura 60 – Tercera zona de estudio	75

ET	ESTACIÓN TRANSFORMADORA
I	INTENSIDAD
DERA	DATOS ESPACIALES DE REFERENCIA EN ANDALUCÍA
CNIG	CENTRO NACIONAL DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
km	KILÓMETROS
kV	KILO VATIO
m	METROS
P	POTENCIA
R	RESISTENCIA
SIG	SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
ST	SUBESTACIÓN TRANSFORMADORA
STE	SUBESTACIÓN TRANSFORMADORA ELÉCTRICA
T	TESLA (UNIDAD DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA)
V	VOLTAJE
W	VATIOS

1 INTRODUCCIÓN

La electricidad es una de las principales fuentes de energía usadas, tanto a nivel industrial como a nivel de consumo personal. Para poder transferir la energía producida en las centrales hasta el consumidor final se usa la red de transporte, formada por líneas de transportes de alta tensión y subestaciones. (Endesa Fundación, 2022)

Según (REE, 2022) el año 2021 se consumieron en España 256387 GWh un 2,4% más que año anterior. En la comunidad autónoma de Andalucía se consumieron 39660 GWh, un 1,6% más respecto a 2020 (Figura 1).

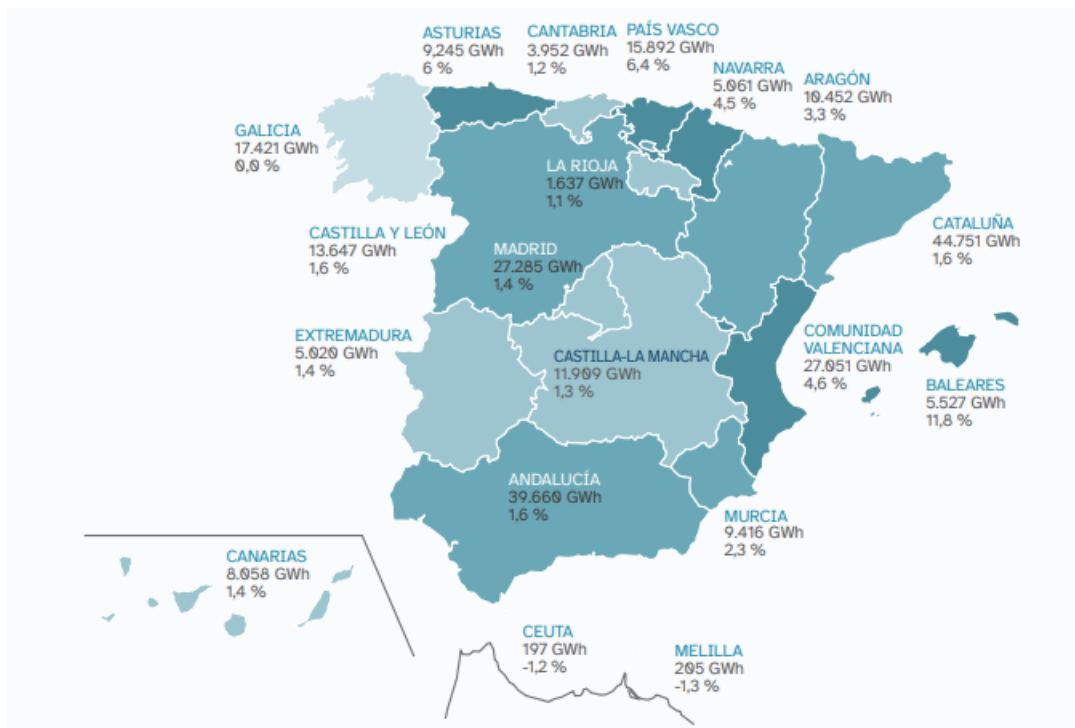


Figura 1 - Demanda por comunidades autónomas en 2021 y variación respecto al año anterior

Fuente: (REE, 2022)

En el año 2021 se construyeron 188km de circuito y se incorporaron 600 MVA de potencia de transformación (REE, 2022). Con estos datos confirmamos cómo la demanda eléctrica aumenta y con ella su red de distribución en la que tienen un papel fundamental las subestaciones eléctricas, encargadas de la transformación.

Las estimaciones a futuro son de aumento de la demanda, incentivando sectores como el de la automoción eléctrica y penalizando los combustibles fósiles, aumentando el uso de renovables en la generación (Amores, 2018).

Sabiendo que la demanda crecerá, para poder atenderla de manera estable y segura, será necesario seguir reforzando la red de transporte y transformación. En este trabajo se determinará la localización más apropiada para situar una subestación eléctrica, siguiendo una serie de criterios. La localización de una nueva subestación será esencial para determinar el éxito de su construcción y explotación. Será necesario tener en cuenta factores económicos, técnicos, medioambientales, sociales y administrativos (Krieg & Finn, 2019). Como afirma (Willis, 2004), una mala localización puede significar un aumento en los costes de distribución de la electricidad lo que repercutiría en un aumento del precio de la energía en la factura final para los consumidores.

1.1 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es definir la mejor localización de una subestación eléctrica en la comarca de La Campiña situada dentro de la provincia de Sevilla.

La construcción de una nueva subestación requiere de dos fases, exploración y desarrollo (Mehane & Kane, 2013). Nos centraremos únicamente en la primera, aplicando un análisis multicriterio. Para ello, usaremos un sistema de información geográfica (SIG) mediante el cual aplicaremos una serie de criterios (algunos de los cuales están recogidos en bibliografía específica). Esto nos permitirá llegar a un conjunto de soluciones admisibles. Estas últimas serán analizadas individualmente para encontrar la propuesta definitiva.

Los criterios usados en la localización estarán fundamentados principalmente en bases legales y artículos científicos relacionados con la temática.

1.2 Estructura del trabajo

- **Introducción:** en este primer apartado se introduce el problema planteado, los objetivos del trabajo y la estructura de este.
- **Subestación eléctrica:** explica los principios de funcionamiento de una subestación, su utilidad en el transporte de energía eléctrica, partes que la componen y tipos de subestaciones existentes.
- **Sistema eléctrico español:** se da una idea de cómo funciona el control de la demanda en España, la red de distribución existente y ampliando esta información dentro de Andalucía.
- **Legislación:** en este capítulo se menciona la legislación que aplicable para un proyecto de estas características, extrayendo los puntos de mayor relevancia para poderlos usar como criterios en el desarrollo del trabajo. En primer lugar, se tiene en cuenta la legislación global y por último la andaluza.
- **Análisis de riesgo y seguridad:** trata los riesgos existentes durante su construcción como explotación y las características que debe tener nuestro proyecto para entrar dentro del marco de las leyes de seguridad y salud.
- **Evaluación económica:** se enumeran los diferentes factores que influyen en nuestro trabajo, y se extraen los más importantes para poder usarlos como criterios.
- **Criterios considerados para la ubicación de una subestación eléctrica:** primero, se definirán los criterios elegidos para la ubicación en este trabajo; posteriormente se comentan otros más avanzados en caso de querer realizar un estudio más preciso o en una región de distintas características.
- **Sistemas de información geográfica:** se define qué es un sistema de información geográfica, sus casos de uso y modo de funcionamiento.
- **Implementación del trabajo:** usando los criterios definidos en apartados anteriores y el sistema de información geográfica ya mencionado, se procederá a realizar un estudio de las posibles ubicaciones de una subestación dentro de la comarca de La Campiña, hasta alcanzar la solución propuesta.
- **Conclusión:** se comentará las conclusiones extraídas del trabajo.

1.3 Ámbito geográfico del trabajo

El trabajo se va a desarrollar en la comarca de La Campiña (Figura 2), que tiene una extensión de unos 5000 km². Se trata de una de las siete comarcas en las que se divide la provincia de Sevilla y se encuentra ubicada entre la zona del bajo Guadalquivir y los cerros de la Sierra Sur (LACASE, 2021).

Una comarca es un área geográfica que se distingue del resto debido a sus particularidades históricas, sociales, culturales o geográficas, contiene una serie de municipios y suele contar con una identidad distintiva.

En la (Guía de Andalucía, 2023) encontramos un artículo sobre La Campiña. Esta comarca se caracteriza por

presentar terrenos planos y ligeramente ondulados, con una escasa presencia de formas erosivas, excepto en su extremo sur. Se considera una zona geográfica donde predominan los procesos geomorfológicos de erosión y denudación, con la presencia de materiales sedimentarios como arenas, limos, arcillas, gravas y cantos cerca de los cursos fluviales; margas, calcarenitas, arenas y calizas en los interfluvios. Además, en los amplios sistemas de terrazas ubicados al sur del Guadalquivir, también se encuentran conglomerados y lutitas, mientras que en algunas áreas aparecen margas yesíferas, como en los alrededores de Osuna, Morón, Puebla de Cazalla, El Rubio, Marinaleda y al sur de Écija.

El clima de esta región se caracteriza por inviernos suaves y veranos extremadamente calurosos, considerados los más calurosos de Andalucía y de la Península Ibérica. Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 16° y 17° Celsius. La insolación anual supera las 3000 horas de sol en la mayoría de La Campiña, mientras que la precipitación varía desde los 500 mm en el sector oriental hasta más de 700 mm en Morón de la Frontera. Esta amplia insolación anual incentiva la construcción de plantas fotovoltaicas, lo que conlleva un refuerzo de la red aumentando el número de subestaciones.

En cuanto a la vegetación, debido a la antigua y extensa influencia humana en la zona, la vegetación natural se ha visto relegada a espacios reducidos, siendo la encina, el alcornoque y el acebuche las especies originales más destacables.

En resumen, esta región se caracteriza por contar con pocos recursos naturales protegidos debido a la intensa transformación realizada por el ser humano a lo largo del tiempo.

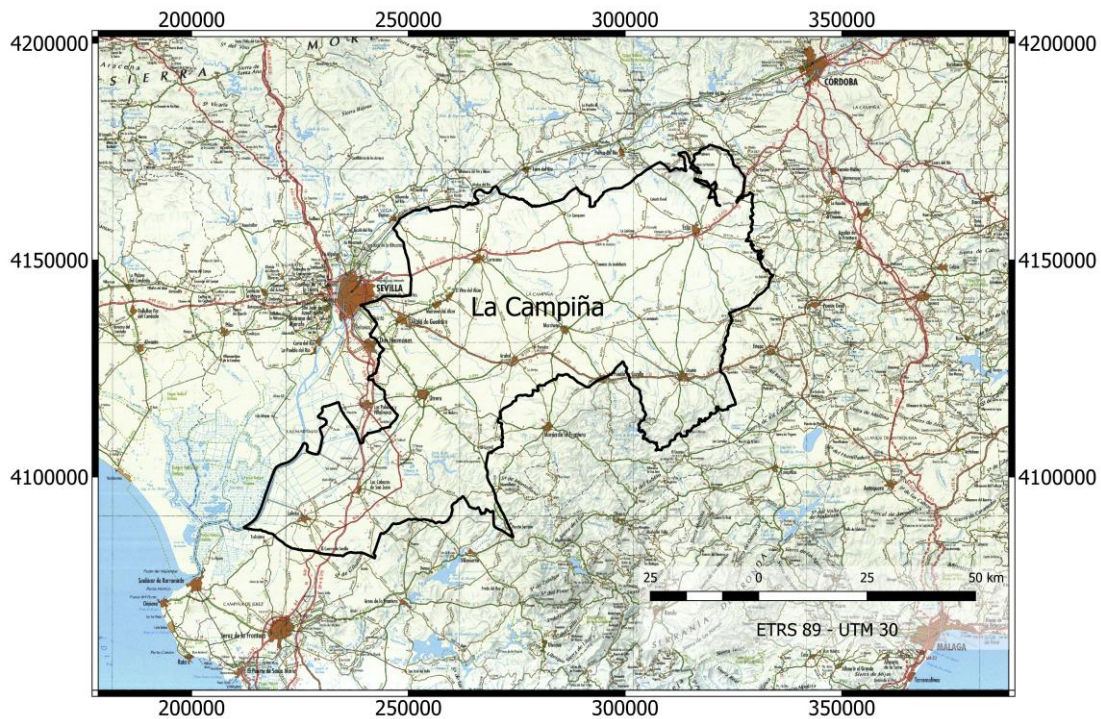


Figura 2 – Ubicación de La Campiña

Elaboración propia con datos de (ideAndalucia, 2023)

Dentro de La Campiña se encuentran los siguientes municipios (Figura 3): Écija, La Luisiana, Cañada Rosal, Fuentes de Andalucía, La Campana, Carmona, Osuna, El Rubio, Lantejuela, Marchena, Paradas, Arahál, El Viso del Alcor, Mairena del Alcor, Alcalá de Guadaíra, Utrera, Los Morales, El Coronil, El Palmar de Troya, Las Cabezas de San Juan, Lebrija y El Cuervo.

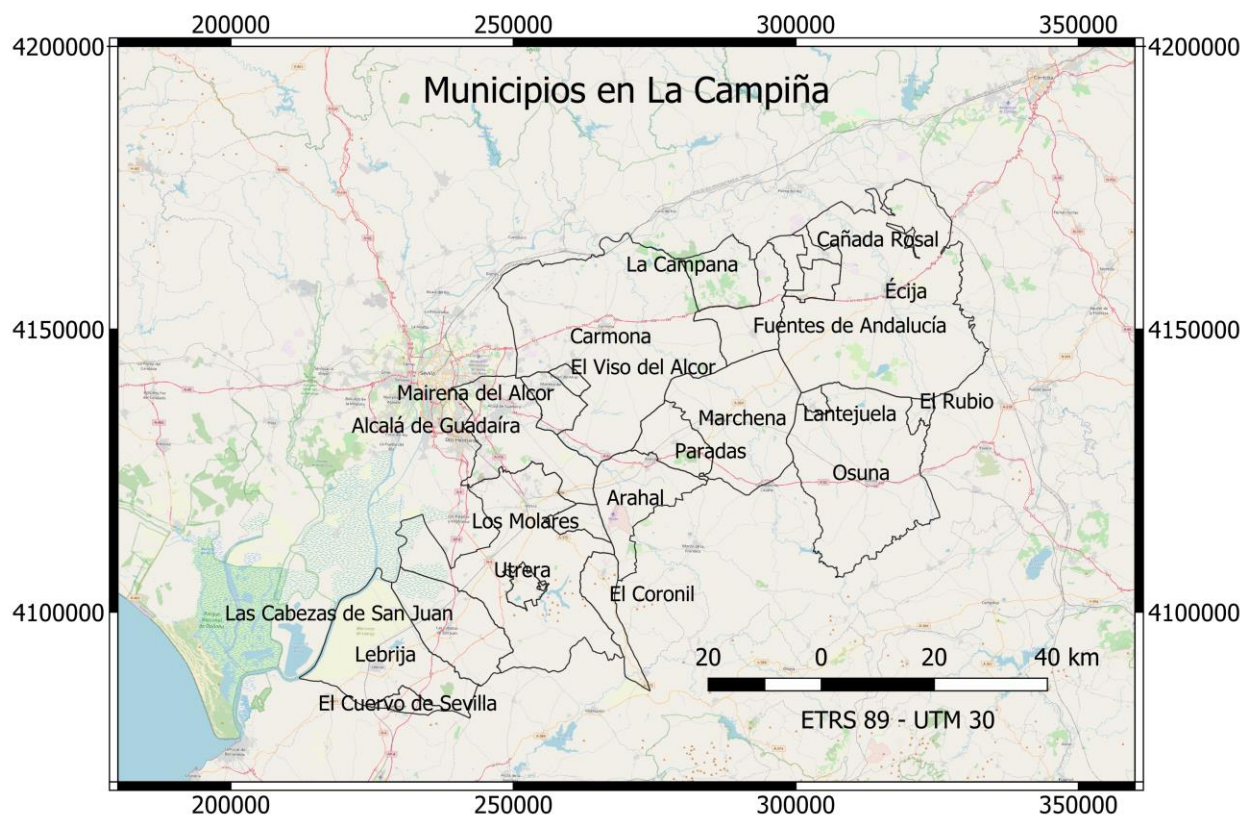


Figura 3 - Municipios en La Campiña
 Elaboración propia con datos de (ideAndalucia, 2023)

Se ha elegido una comarca debido a que contiene un tamaño adecuado para poder trabajar con los datos sin llegar a ser demasiado pequeña, a su vez se encuentra en la misma provincia de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería perteneciente a la Universidad de Sevilla.

2 SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

En este apartado se va a realizar una introducción a las subestaciones eléctricas. En primer lugar, se explicará sus principios de funcionamiento, continuando con su utilidad en el transporte de la energía eléctrica, partes y clasificación.

Las subestaciones eléctricas son las destinadas a establecer los niveles de tensión adecuados para la transmisión y distribución de la energía eléctrica. Su equipo principal es el transformador.

2.1 Cómo funciona

Para modificar la tensión se usan los transformadores, que son máquinas de corriente alterna que funcionan basándose en la inducción electromagnética (Endesa Fundación, 2022). Usan dos bobinas, una primaria de entrada y una secundaria de salida. La relación entre el número de vueltas en cada bobina y las tensiones siguen la siguiente ecuación: $\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S}$ siendo N_P Número de vueltas en el primario, N_S Número de vueltas en el secundario, V_P Voltaje en el primario y V_S Voltaje en el secundario. En la Figura 4 se muestra un transformador reductor, de modo que el número de vueltas en el primario debe de ser menor al secundario.

Cuando las disminuciones de tensión son grandes se conectan los transformadores en serie, decreciendo la tensión escalonadamente.

Si el transformador se conecta al revés, cambia su función de reductor a elevador.



Figura 4 - Transformador eléctrico reductor

Fuente: (Endesa Fundación, 2022)

2.2 Utilidad

Los transformadores son una pieza fundamental de la red de transporte eléctrico, ya que permiten elevar la tensión al inicio de un tramo largo de transporte y disminuirla al final. Este proceso es necesario dado que durante el transporte, por acción del efecto Joule, se producen pérdidas de potencia, en forma de calor, por la resistencia ejercida en la línea (Gómez-Esteban, 2010).

Este fenómeno se rige por las siguientes fórmulas expuestas a continuación, donde intervienen la potencia (P), la intensidad (I), el voltaje (V) y la resistencia (R). La potencia es igual a $P = V \times I$, sustituyendo con la Ley de Ohms $V = I \times R$, la fórmula de potencia se podría expresar como $P = I^2 \times R$.

La R corresponde a la resistencia de la línea. Todos los conductores eléctricos se oponen al paso de la corriente eléctrica en mayor medida, debido a que los portadores de carga encuentran dificultades para desplazarse dentro del materia que lo conforman (Fernandez Yagües, 2023). Esta oposición es la conocida como resistencia eléctrica de un conductor, en este caso la línea. Esta resistencia dependerá de:

- Material del conductor.
- Temperatura a la que se encuentra el conductor.
- Longitud del conductor, a mayor distancia recorrida mayor será la resistencia.
- Sección, a mayor área de sección menor será la resistencia de este.

Sustituyendo la fórmula del conductor en la potencia resultaría $P = I^2 \times \rho \times \frac{L}{S}$, siendo como desglosan (Areatecnologia, 2023) y (Fernandez Yagües, 2023):

- ρ la resistividad del conductor (depende de la temperatura y el material) su unidad de medida es ohmios por metros ($\Omega \times m$)
- L la longitud del conductor, en este caso la línea, se mide en metros (m).
- S el área de la sección del conductor, será necesario calcularla en metros cuadrados (m^2)

Para la resistividad de los conductores existen una serie de tablas en función de la temperatura, como por ejemplo la Tabla 1 propuesta por (Arrayás & Trueba, 2007).

Material	Resistividad ($\Omega.m$)	Material	Resistividad ($\Omega.m$)
Conductores		Semiconductores	
Aluminio (Al)	$2,82 \times 10^{-8}$	Carbono (C)	$3,5 \times 10^{-5}$
Cobre (Cu)	$1,72 \times 10^{-8}$	Germanio (Ge)	$0,5^\alpha$
Oro (Au)	$2,44 \times 10^{-8}$	Silicio (Si)	$20 - 2300^\alpha$
Hierro (Fe)	$9,7 \times 10^{-8}$	Aislante	
Mercurio (Hg)	$95,8 \times 10^{-8}$	Mica	$10^{11} - 10^{15}$
Plomo (Pb)	22×10^{-8}	Vidrio	$10^{11} - 10^{14}$
Nicromo (aleación)	100×10^{-8}	Goma	$10^{13} - 10^{16}$
Plata (Ag)	$1,59 \times 10^{-8}$	Teflón	10^{16}
Tungsteno (W)	$5,6 \times 10^{-8}$	Madera	$3,5 \times 10^{-5}$

Tabla 1 – Resistividad de diversos materiales a 20°C

(En los casos que aparece un superíndice ^a, el valor depende de la potencia del material)

Fuente: (Arrayás & Trueba, 2007)

El objetivo será disminuir las pérdidas lo máximo posible. Para ello usaremos materiales de baja resistividad tales como cobre y aluminio (Tabla 1), aumentaremos todo lo posible su sección, siempre teniendo en cuenta que esto incurre en un mayor coste y peso. Por último, disminuirémos la intensidad, magnitud que se encuentra elevada al cuadrado. Los transformadores aumentan la tensión antes de su transporte, por la ley de Ohms a resistencia constante si se aumenta su tensión su intensidad disminuirá de forma proporcional, por este motivo a mayor longitud de transporte mayor tensión (Gómez-Esteban, 2010).

$$V \uparrow = I \downarrow \times R$$

$$P \downarrow \downarrow = I^2 \downarrow \times \rho \times \frac{L}{S}$$

Gracias a los transformadores es posible realizar transporte de energía eléctrica teniendo unas pérdidas aceptables. Si no se contará con ellos la electricidad debería de consumirse junto a las fuentes de generación y a la tensión de salida de estas.

2.3 Partes

Las subestaciones se encuentran normalmente compuestas por los siguientes componentes:

- Transformador: dispositivo eléctrico utilizado para regular la tensión en un circuito de corriente alterna. Manteniendo la frecuencia y la potencia, un transformador puede aumentar o disminuir la tensión. Hay dos tipos de transformadores disponibles: sumergidos en líquido y de tipo seco.
- Interruptor de potencia: elemento que permite interrumpir y restaurar la continuidad en un circuito eléctrico. La interrupción se produce con una carga o una corriente de cortocircuito
- Restaurador: componente electromecánico que se activa para interrumpir la corriente cuando se produce un exceso de electricidad o un fallo en el circuito.
- Cuchillas fusibles: dispositivos que cumplen tanto con la tarea de conectar y desconectar circuitos eléctricos como la de proteger contra corrientes excesivas. Funcionan tanto como cuchillas desconectoras al conectarse y desconectarse, así como elementos de protección del fusible al detectar sobre corrientes.
- Cuchillas de desconexión y comprobación: utilizadas para interrumpir físicamente un circuito eléctrico, por lo que normalmente operan sin carga. Estas cuchillas se manejan de manera mecánica o manual.
- Apartarrayos: responsables de mantener alejados los rayos ionizados. En caso de sobretensión, los dispositivos de descarga de rayos crean un arco eléctrico que descarga la corriente a tierra en lugar de afectar a personas o equipos de la instalación.
- Transformadores de medición: herramientas encargadas de medir la corriente eléctrica. Hay dos tipos, transformadores de corriente, que cambian el valor de la corriente, y transformadores de voltaje, que transforman los valores de voltaje sin tener en cuenta la corriente. Estos valores se usan en tiempo real en instrumentos de medición, control y protección que necesitan señales de corriente o voltaje.
- Cajas derivadoras: terminales de conexión por fase que permiten hacer derivaciones y llegar a áreas específicas.
- Condensadores: permiten almacenar temporalmente la energía eléctrica generada en un campo eléctrico. La energía se almacena a través de dos conductores separados por material aislante

2.4 Tipos

Existen distintas clasificaciones para las subestaciones eléctricas: según su nivel de tensión, funcionalidad, área de servicio o aislamiento (Vargas, 2020).

- Según su nivel de tensión podremos clasificar las subestaciones en:
 - Baja Tensión (LV), con una tensión nominal igual o menor a 1000V
 - Media tensión (MV), con una tensión nominal mayor a 1000V e inferior a 100kV

- Alta tensión (HV), con una tensión igual o mayor a 100kV e igual o menor a 230kV
- Extra alta tensión (EHV), con una tensión nominal mayor a 230kV e igual o menor a 1000kV
- Ultra alta tensión (UHV), con una tensión nominal mayor o igual a 1000kV
- Según su funcionalidad se clasifican en:
 - Subestación transformadora elevadora: eleva la tensión generada de media a alta para poder transportarla. La tensión primaria, la de entrada en los transformadores suele estar entre 3 y 36kV. La tensión secundaria, o salida, de los transformadores está condicionada por la tensión de la línea de transporte o de interconexión (66, 110, 220 o 380 kV). El voltaje de la línea depende de la longitud de esta, a mayor longitud un mayor voltaje.
 - Subestación transformadora reductora: reduce la tensión de alta a tensión media para su posterior distribución. La tensión primaria de los transformadores depende de la tensión de la línea de transporte (66, 110, 220 o 380 kV). Mientras que la tensión secundaria de los transformadores está condicionada por la tensión de las líneas de distribución entre 6 y 30kV.
 - De maniobra: son aquellas que se conectan a más de un circuito actuando como nodo.
- Según el área de servicio en la que se encuentran las podemos clasificar en:
 - Generación: situadas junto a fuentes generadoras, se encargan de subir su tensión para poder inyectarla al sistema.
 - Transmisión: funcionan como nodos del sistema eléctrico, conectando generadores con distribuidoras y otras estaciones de transmisión.
 - Distribución: Son subestaciones de bajadas, ubicada junto a los consumidores, abastecen industrias, ciudades y hogares.
- Dependiendo de su aislamiento las podremos clasificar en:
 - Aire: denominadas subestaciones convencionales, raras de ver en la actualidad.
 - SF6: se usa como aislamiento el SF6 (Sistema Español de Inventario de Emisiones, 2020) “Un gas inodoro, incoloro, ininflamable y no tóxico que, debido a sus cualidades dieléctricas, es el principal fluido que se incorpora en los aparatos electrotécnicos, garantiza todas las funciones de corte y aislamiento eléctrico en alta tensión”. Gracias a estas propiedades permite reducir la distancia de aislamiento drásticamente, disminuyendo el tamaño de las subestaciones en más de un 50%. Son las denominadas GIS.
 - Híbridas: mezcla entre equipos de aire y SF6, son las más comunes en la actualidad.

2.5 Subestación elegida

Para este Trabajo Fin de Grado se ha seleccionado una subestación de bajada. Entrará la electricidad a una tensión elevada (tensión de transporte) y mediante el uso de transformadores iremos reduciéndola para adecuarla al consumo doméstico. Buscaremos situarla cerca de los consumidores finales, los hogares.

Normalmente, este tipo de subestaciones se encuentran situadas en el interior de los núcleos de población, en parcelas libres intentando disminuir su impacto visual y ambiental al máximo. Para una estación de este tipo hemos considerado una superficie mínima de 2000 m².

3 SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL

El suministro de energía eléctrica es esencial para el funcionamiento de nuestra sociedad. Su precio es un factor decisivo de la competitividad de buena parte de nuestra economía. La evolución del resto sectores de la industria está determinada por la estructura de aprovisionamiento de materias primas y el desarrollo tecnológico de la industria eléctrica (Gobierno de España, 2023).

Debemos hacer una principal distinción en el sistema eléctrico español, entre comercializadores y transportistas encargadas de operar el sistema eléctrico (Elige tu energía, 2023).

3.1 Operación del sistema eléctrico español

El operador nacional del sistema eléctrico español es Red Eléctrica de España conocida por las siglas REE, donde es titular al 100% de la red de transporte de alta tensión en nuestro país (Elige tu energía, 2023).

Tal y como nos afirma (REE, 2022), Red Eléctrica opera el sistema eléctrico español, tanto en la península como en los sistemas no peninsulares de Canarias, Baleares, Ceuta y Melilla (Figura 5), donde es la encargada de garantizar en todo momento la seguridad y la continuidad del suministro eléctrico.

Dentro de la operación del sistema se comprenden las actividades tales como garantizar la seguridad y continuidad del sistema, coordinando adecuadamente la producción y el transporte de energía desde los generadores hasta las redes de distribución con los estándares de calidad requeridos por la normativa vigente.

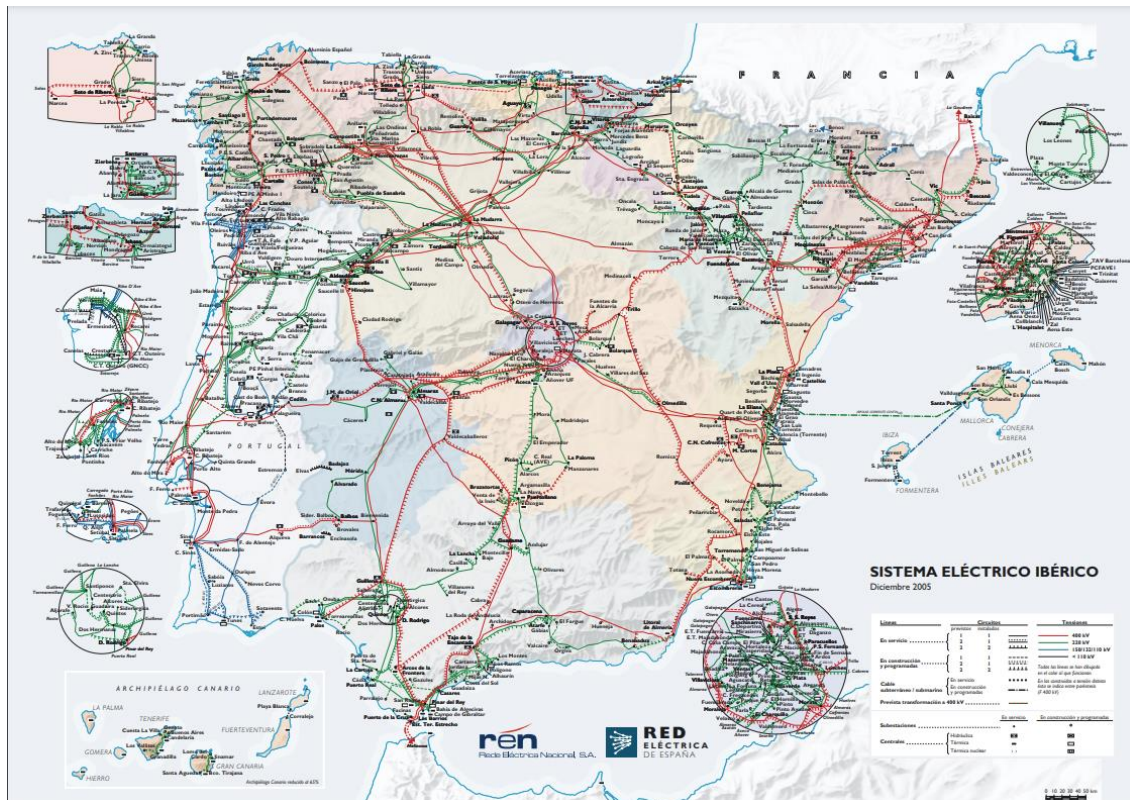


Figura 5 - Mapa del sistema eléctrico ibérico

Fuente: (REE, 2022)

3.1.1 Equilibrio constante entre la generación y consumo

De acuerdo con (REE, 2022), la energía eléctrica tiene la característica de no poder almacenarse en grandes cantidades, lo que implica que el sistema eléctrico debe equilibrar de manera precisa e instantánea la producción de las centrales de generación con el consumo para su correcto funcionamiento. Será necesario lograr un balance entre la generación y la demanda en tiempo real para evitar desequilibrios que puedan resultar en desviaciones de la frecuencia nominal de 50 Hz. Una desvirtualización de esta frecuencia puede tener impacto negativo en los dispositivos, motores, estabilidad de la red eléctrica y sus sistemas de control.

Red Eléctrica, como operador del sistema eléctrico español, tiene la tarea de asegurar el equilibrio en el sistema. Para cumplir con este cometido, realiza proyecciones de la demanda de energía eléctrica y gestiona las instalaciones de generación y transporte eléctrico en tiempo real, asegurando que la producción de las centrales eléctricas coincida exactamente con la demanda de los consumidores en todo momento.

Anualmente, Red Eléctrica realiza previsiones a medio y largo plazo sobre la evolución de la demanda eléctrica y su cobertura. Estas previsiones son esenciales para la planificación del desarrollo futuro de la red de transporte, la cual debe ser aprobada por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

En la web de REE (<https://www.ree.es/es>, accedido el 3 de julio de 2023) se puede consultar la demanda diaria de energía eléctrica (Figura 6), donde se observa la distinción entre demanda real, prevista y programada. Se advierte cómo la previsión de la demanda y la demanda real se encuentran muy ajustadas, la programada se va reajustando a lo largo del día.



Figura 6 - Seguimiento de la demanda de energía eléctrica peninsular para el día 26/02/2023

Fuente: (REE, 2023)

3.1.2 Servicios de ajuste del sistema

Como se cita en (REE, 2022) existen dos tipos de ajuste del sistema:

En primer lugar, resolución de las restricciones técnicas del sistema, mediante la limitación y modificación, en su caso, de los programas de producción, de las unidades de generación y de consumo de bombeo que resuelven las restricciones técnicas identificadas con el menor coste para el sistema.

En segundo lugar, balances gestionados por mecanismos del mercado. Es conocida como la energía de balance de tipo *Replacement Reserve* (RR) dentro de ella encontramos dos tipos:

- Regulación secundaria: modifica el programa de intercambio de energía, actúa en un horizonte temporal

de los 20 segundos a los 15 minutos.

- Regulación terciaria: corresponde con la utilización del producto estándar europeo de reserva para la recuperación de la frecuencia.

3.2 Comercialización de la energía en España

De acuerdo con lo señalado en (Sunfield, 2020) las empresas comercializadoras de energía eléctrica son elegidas libremente por cada consumidor. Estas son las encargadas de fijar la tarifa de consumo y enviar las facturas.

En España existen más de 500 empresas comercializadoras de energía eléctrica, las cinco más conocidas son: Endesa, Iberdrola, Naturgy, Repsol y EDP

3.3 Infraestructura eléctrica de Andalucía

La Junta de Andalucía cuenta con la Agencia Andaluza de la Energía cuyo objetivo es contribuir a que Andalucía sea una comunidad autónoma referente en términos de energía.

Como encontramos en (Agencia Andaluza de la Energía , 2023) la red de distribución en Andalucía está constituida por 400 subestaciones, 60.000 km de líneas de alta y media tensión, 63.000 transformadores y 59.000 MVA de potencia de transformación.

La agencia dispone de un centro de evaluación y seguimiento energético de Andalucía (CESEA) el cual realiza un seguimiento continuo de la calidad del suministro y su distribución. Esta calidad se mide mediante dos índices:

- TIEPI (Tiempo de Interrupción Equivalente de la Potencia Instalada en media tensión): el tiempo medio de la duración de los cortes de suministro, se miden en horas (Figura 7).
- NIEPI (Número de interrupción Equivalente de la Potencia Instalada): número de cortes a lo largo de un año (Figura 8).

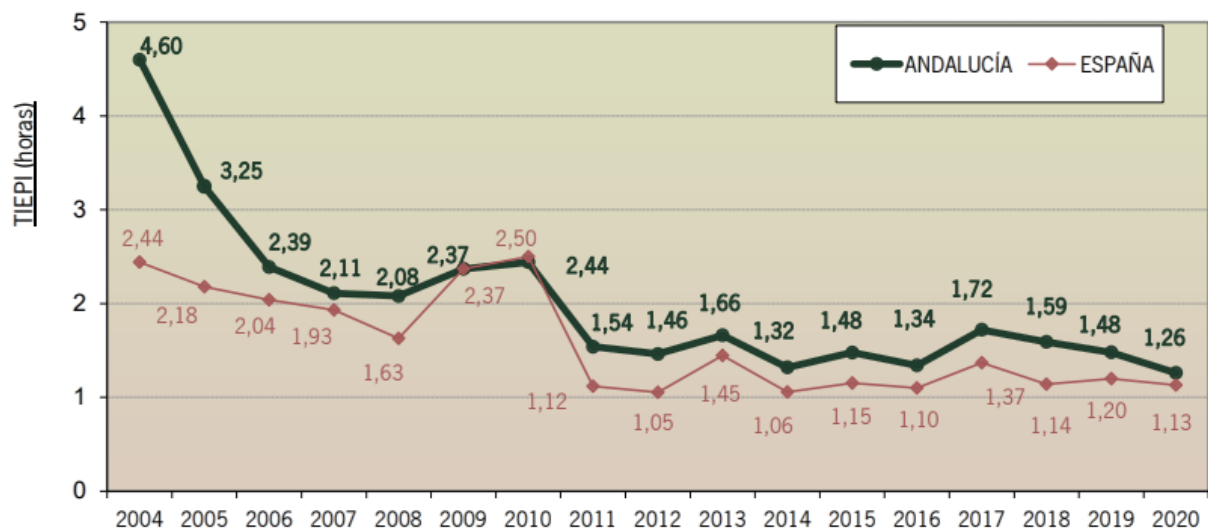


Figura 7 - Evolución del TIEPI en Andalucía y España

Fuente: (Agencia Andaluza de la Energía , 2023)

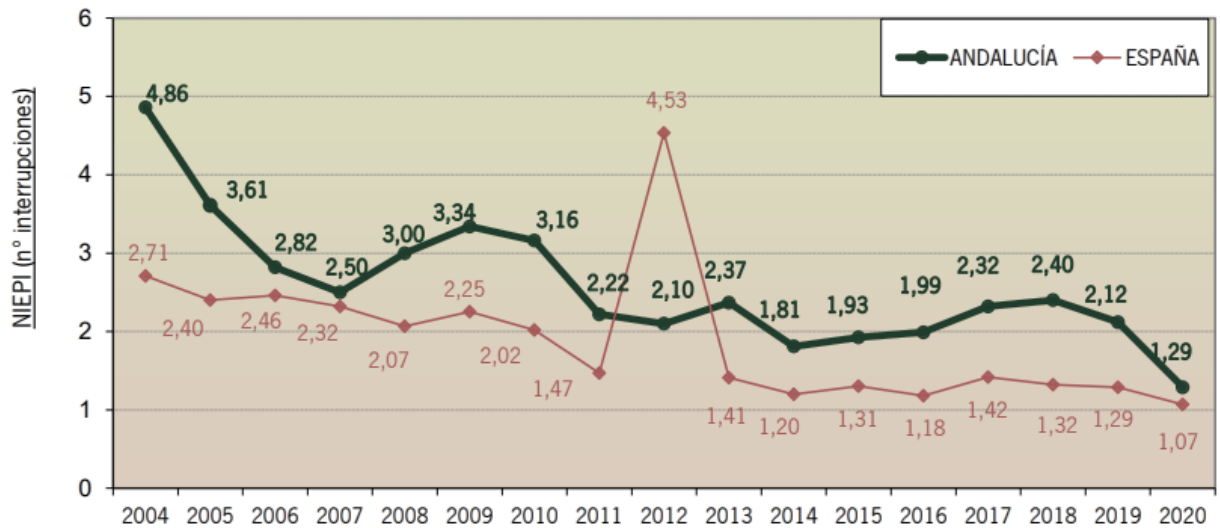


Figura 8 - Evolución del NIEP en Andalucía y España

Fuente: (Agencia Andaluza de la Energía , 2023)

Se observa como cada año va disminuyendo, pero Andalucía se sigue encontrando por encima de la media española, lo cual nos indica que existe posibilidad de mejora en la red de distribución andaluza.

4 LEGISLACIÓN

En este capítulo se repasará la legislación española actual referente a subestaciones eléctrica, extrayendo los puntos de mayor relevancia para posteriormente usarlos en la selección de la ubicación. En primer lugar, se revisará la legislación nacional para finalmente estudiar la andaluza.

4.1 Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión.

El Real Decreto 337/2014 dicta los reglamentos sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (Gobierno de España , 2014). Tiene como objetivo proteger a las personas y bienes, garantizar la calidad en los suministros, promover la eficiencia, establecer una normalización precisa y facilitar los procesos en la creación y ampliación de estaciones.

Para clasificar las instalaciones se usa su tensión nominal, siendo esta el valor con el que se denomina a un sistema y para el que ha sido previsto su funcionamiento y aislamiento.

Dependiendo de su tensión nominal se clasifican en:

1. Categoría especial: tensión nominal superior a 220kV
2. Primera categoría: tensión nominal entre 220kV y 66kV
3. Segunda categoría: tensión nominal entre 66kV y 30kV
4. Tercera categoría: tensión nominal entre 30kV y 1kV

Las instalaciones con un valor inferior a 1kV no son consideradas de alta tensión, se encuentran reguladas por el reglamento electrónico para baja tensión.

Las redes de alta tensión de distribución están englobadas en la primera y segunda categoría. Si en una instalación existen circuitos o elementos en los que se utilicen distintas tensiones, el conjunto de la instalación se considerará al de mayor tensión nominal. Al contar en las subestaciones con alta tensión se encontrarán en la primera o segunda categoría, en función de su tamaño y caso de uso.

TENSIÓN NOMINAL DE LA RED (U_n) kV	TENSIÓN MÁS ELEVADA DE LA RED (U_s) kV	TENSIÓN MÁS ELEVADA DEL MATERIAL (U_m) kV
3	3,6	3,6
6	7,2	7,2
10	12	12
15	17,5	17,5
20	24	24
25	30	30
30	36	36
45	52	52
66	72,5	72,5
110	123	123
132	145	145
220	245	245
400	420	420

Tabla 2 - Tensiones nominales normalizadas

Fuente: (Gobierno de España , 2014)

Dependiendo de la tensión nominal del sistema existirá una tensión máxima que deberán soportar los materiales y la red, indicados en la Tabla 2.

La subestación deberá estar dotada con los elementos necesarios para que su funcionamiento no produzca perturbaciones en las instalaciones de la zona.

En la instrucción técnica complementaria número uno (ITC01) se define una subestación como: “conjunto situado en un mismo lugar, de la apartament eléctrica y de los edificios necesarios para realizar alguna de las funciones siguientes: transformación de la tensión, de la frecuencia, del número de fases, rectificación, compensación del factor de potencia y conexión de dos o más circuitos”

Para las subestaciones aplica la ITC-15 para instalaciones técnicas en exterior:

- Se deberá de vallar en su totalidad con una altura superior a los 2,2 metros, medida desde el exterior. Esta valla deberá estar provista de señales de advertencia de peligro por alta tensión con el objetivo de advertir a personas ajenas al servicio sobre el peligro de acceso. La información sobre la señalización se encuentra ampliada en el punto 5.1.
- Será necesaria la instalación de muros cortafuegos entre los transformadores para disminuir el riesgo de incendio, además de pararrayos. Los muros cortafuegos deben de tener una resistencia al fuego superior a 60 minutos en caso de separar transformadores entre sí y superior a 90 minutos en caso de separar transformadores del exterior. La altura del muro será un metro superior a la altura del depósito de aceite del transformador.
- El terreno deberá ser explanado en uno o varios planos, aunque se deberá mantener una pendiente mínima para evitar encharcamiento de la superficie.
- No se podrá construir una subestación bajo una línea de alta tensión ajena a la misma.
- Los campos electromagnéticos producidos por la circulación de corriente a 50HZ será necesario comprobar que no se supere el valor de $100\mu\text{T}$, valor umbral de exposición para él ser humano (Gobierno de España , 2001).
- Será necesario realizar un plan de gestión de residuos siguiendo los preceptos técnicos y administrativos recogidos en la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (Gobierno de España, 2022).

4.2 Condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas

En el apartado 4.1 se ha mencionado la presencia de campos electromagnéticos producidos por la circulación de corriente. El límite establecido de exposición para el ser humano se sitúa en los 100 μT o el equivalente en campo eléctrico a 5000 V/m Tabla 3. Estos valores han sido obtenidos para una frecuencia de 50 Hz, frecuencia usada para la corriente alterna en la Unión Europea (REE, 2022).

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μT)	Densidad de potencia equivalente de onda plana ($\frac{W}{m^2}$)
0-1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	
1-8 Hz	10000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	
8-25 Hz	10000	4000/f	5000/f	
0,025-0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	
0,8-3 kHz	250/f	5	6,25	
3-150 kHz	87	5	6,25	
0,15-1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	
1-10 MHz	$87 / f^{\frac{1}{2}}$	0,73/f	0,92/f	
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000 MHz	$1,375 / f^{\frac{1}{2}}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	f/200
2-300 GHz	61	0,16	0,2	10

Tabla 3 - Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos.

Fuente: (Gobierno de España , 2001)

Haciendo uso del estudio realizado por (Cadavid, y otros, 2001) en donde se realizaron mediciones y simulaciones de los campos electromagnéticos generados por distintas subestaciones (Figura 9), las medidas se realizaron con un espaciamiento de entre 1 y 2 metros, involucrando los puntos más bajos de las conexiones por los que circula una mayor corriente (Tabla 4) obteniendo los siguientes valores:

SUBESTACIÓN	E máximo (kV/m)	B máximo (mG)
Buga 115 kV	2,748	49,5
Chipichape 115 kV	2,770	95,3
Juanchito 220 kV	8,600	57,5
Juanchito 220/115 kV	3,680	147,5
Juanchito 115kV	4,116	217,6
Meléndez 115 kV	3,520	90,3
Pance 115 kV	2,598	131,7
Pance 220 kV	4,648	149,1
Santa Barbara 115kV	3,991	286,9

Tabla 4 - Valor máximo de campo eléctrico y magnético en subestaciones

Fuente: (Cadavid, y otros, 2001)

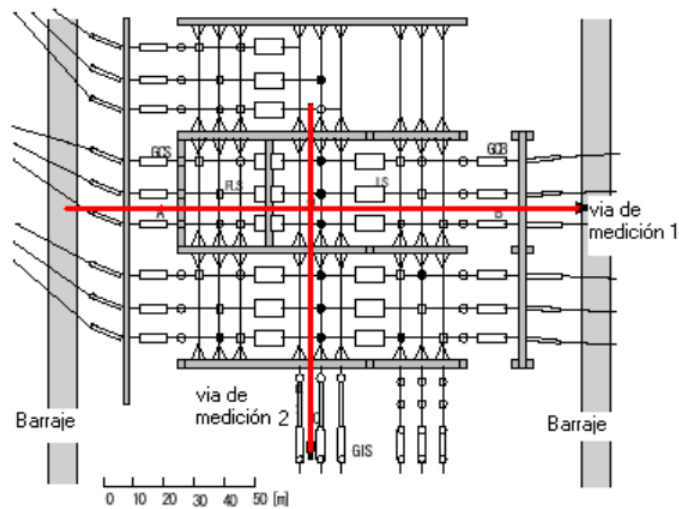


Figura 9 - Perfiles de medición en subestaciones

Fuente: (Cadavid, y otros, 2001)

Sabiendo que 1 mili Gauss (mG) equivale a 10 micro Teslas (μT). Podemos afirmar que los valores producidos por las subestaciones en su interior son inferiores a los umbrales establecidos en el BOE, de modo que no serán perjudiciales para el ser humano. No será necesario tomar medidas adicionales.

4.3 Reglamento electrotécnico para baja tensión.

El Real Decreto 842/2002 aprueba el reglamento electrotécnico para baja tensión, aplica para instalaciones que distribuyan la energía eléctrica, a las generadoras de electricidad para consumo propio y a las receptoras, en los siguientes límites de tensiones nominales (Gobierno de España , 2002):

- Corriente alterna igual o inferior a 1kV
- Corriente continua igual o inferior a 1,5kV

Este Real Decreto no aplicará para los equipos principales de la estación, pero sí para los servicios necesarios para que funcione, tales como iluminación, cuadro de mandos, ventilación...

Para evitar interferencia con los equipos principales las conexiones de estos equipos se deben de realizar siguiendo el código de color establecido: para la fase negro, marrón o gris; para el neutro azul claro y la línea de tierra franjas verdes y amarillas con una inclinación de 45°.

Las conexiones deberán de estar correspondientemente aisladas, en función de su intensidad, para evitar accidentes, de acuerdo con las siguientes tablas:

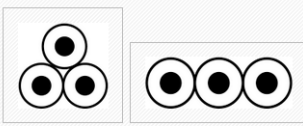

Sección nominal mm ²	Terna de cables unipolares (1) (2)			1 cable tripolar o tetrapolar (3)		
						
	Tipo de aislamiento					
	XLPE	EPR	PVC	XLPE	EPR	PVC
6	72	70	63	66	64	56
10	96	94	85	88	85	75
16	125	120	110	115	110	97
25	160	155	140	150	140	125
35	190	185	170	180	175	150
50	230	225	200	215	205	180
70	280	270	245	260	250	220
95	335	325	290	310	305	265
120	380	375	335	355	350	305
150	425	415	370	400	390	340
185	480	470	420	450	440	385
240	550	540	485	520	505	445
300	620	610	550	590	565	505
400	705	690	615	665	645	570
500	790	775	685	-	-	-
630	885	870	770	-	-	-

Tabla 5 - Intensidad máxima admisible en amperios para cables soterrados
(Gobierno de España , 2002)

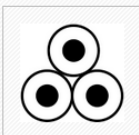
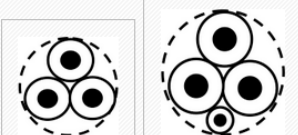
Sección nominal mm ²	Tres cables unipolares (1)			1 cable trifásico		
						
	Tipo de aislamiento					
	XLPE	EPR	PVC	XLPE	EPR	PVC
6	46	45	38	44	43	36
10	64	62	53	61	60	50
16	86	83	71	82	80	65
25	120	115	96	110	105	87
35	145	140	115	135	130	105
50	180	175	145	165	160	130
70	230	225	185	210	220	165
95	285	280	235	260	250	205
120	335	325	275	300	290	240
150	385	375	315	350	335	275
185	450	440	365	400	385	315
240	535	515	435	475	460	370
300	615	595	500	545	520	425
400	720	700	585	645	610	495
500	825	800	665	-	-	-
630	950	915	765	-	-	-

Tabla 6 - Intensidad máxima admisible en amperios para conductores de cobre al aire libre
(Gobierno de España , 2002)

La Tabla 5 muestra el caso de cables soterrados a un metro de profundidad, la Tabla 6 sirve para el caso de cable al descubierto.

4.4 Regulación de las actividades de transporte, distribución, comercialización y suministros

Como se dicta el Real Decreto 1955/2000 por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimiento de autorización de instalaciones de energía eléctrica, con el objetivo es desarrollar el marco normativo en el que han de desarrollarse las actividades relacionadas con el sector eléctrico (Gobierno de España , 2000).

Red Eléctrica de España, como operador del sistema y gestor de la red de transporte elaborará las propuestas de desarrollo de la red, que contendrán las previsiones asociadas a la instalación de los nuevos elementos tales como líneas, subestaciones, transformadores, elementos de compensación u otros y su programa temporal de ejecución para un horizonte de seis a diez años, definiendo las nuevas necesidades de instalación hasta el fin de su vida útil y revisando las decisiones referentes a los años más remotos del horizonte precedente. Las propuestas de desarrollo se elaborarán cada cuatro años y deberán ser aprobadas por el Ministerio de Economía. Será necesaria su autorización para poder construir una nueva subestación y anexionarla al sistema.

Al elegir localización siempre será más favorable un terreno de titularidad pública, tras la declaración de utilidad pública de una infraestructura de estas características resultará una menor cuantía económica su expropiación al no estar sometido al régimen de gravámenes. No obstante, sí es de aplicación el pago de las indemnizaciones recogidas en las Leyes de Patrimonio y de Montes vigentes.

Cuando la conexión dé lugar a la partición de una línea existente o planificada con entrada y salida en una nueva subestación, será necesario una nueva línea de entrada y salida para la nueva subestación de la red de transporte o distribución. También en lo que se refiere a las necesidades motivadas por la nueva conexión, el eventual refuerzo de la línea existente o planificada y la adecuación de las posiciones en los extremos de la misma, que resulten del nuevo mallado establecido en la planificación. De esta forma se indica la obligación de contener en el proyecto de una nueva subestación, su conexión a la red incluyendo las desconexiones y cambios necesarios para su posterior adhesión.

La inversión necesaria será sufragada por el o los promotores de la conexión, pudiendo este o estos designar al constructor de las instalaciones necesarias para la conexión, conforme a las normas técnicas aplicadas por el transportista, siendo la titularidad de las instalaciones del propietario de la línea a la que se conecta.

4.5 UNE-EN 60076

Esta norma es de obligado cumplimiento para el uso de transformadores, parte fundamental de una subestación.

La altura de nuestra subestación se verá condicionada por los transformadores, debido a que la rigidez dieléctrica del aire disminuye con la altura. Será necesario tener en cuenta la altura con respecto a nivel del mar, debido a que, para el correcto funcionamiento de transformadores a altitudes por encima de 1 000 m sobre el nivel del mar, el diseño debe tener en cuenta la reducción de la rigidez dieléctrica del aire. Se deberán usar tablas de factores de corrección para determinar la tensión necesaria (AENOR, 2002).

Como se dicta (AENOR, 2013) será necesario tomar medidas de refrigeración adicionales siempre que la temperatura de entrada al sistema de refrigeración, en este caso la temperatura ambiente sea:

- Inferior a 40 °C en cualquier momento
- La media mensual del mes más cálido inferior a 30 °C
- La media anual inferior a 20 °C y superior a –25 °C

4.6 Ley 24/2013, del 26 de diciembre, del Sector Eléctrico

Es una ley a nivel nacional en España que regula diversos aspectos del sector eléctrico de forma que se garantice el suministro de energía eléctrica. Se consideran actividades al suministro: generación, transporte, distribución, servicios de recarga energética, comercialización e intercambios intracomunitarios e internacionales, así como

la gestión económica y técnica del sistema eléctrica. Encontrándose las subestaciones tanto en la generación, transporte y distribución (Gobierno de España, 2013).

A la hora de montar una subestación eléctrica, los siguientes artículos de esta ley pueden resultar especialmente relevante:

4.6.1 Artículo 7: Garantía de suministro

Bajo este artículo se justifica la construcción de una nueva subestación eléctrica, la cual ayuda a garantizar un suministro estable a su rango de acción, mejorando la fiabilidad del suministro en la zona elegida para su construcción. Los puntos fundamentales tratados en este artículo son los siguientes:

- Acceso y conexión a las redes: todos los consumidores tienen derecho al acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica en el territorio nacional, de acuerdo con las condiciones establecidas en la ley y en las regulaciones gubernamentales.
- Medidas para garantizar el suministro: el Gobierno puede tomar medidas temporales para garantizar el suministro de energía eléctrica en diferentes situaciones, como riesgos para el suministro, desabastecimiento de fuentes primarias de energía, amenazas a la integridad física o seguridad de las personas o instalaciones, y reducciones sustanciales en la disponibilidad de las instalaciones de producción, transporte o distribución.
- Tipos de medidas: el Gobierno puede adoptar diversas medidas para abordar las situaciones mencionadas, como limitaciones o modificaciones temporales del mercado eléctrico, operación directa de instalaciones, establecimiento de obligaciones especiales de existencias de seguridad de fuentes primarias, limitaciones o suspensión de derechos de productores de energía renovable, modificación de condiciones de suministro, limitaciones en el acceso a las redes, asignación de abastecimientos de energía primaria, entre otras.
- Régimen retributivo: en caso de aplicar medidas que afecten a actividades del sector eléctrico, el Gobierno determinará el régimen retributivo aplicable para garantizar un reparto equilibrado de los costes.
- Colaboración con las Comunidades Autónomas: cuando las medidas afecten solo a una Comunidad Autónoma, en nuestro caso la andaluza, se tomarán decisiones en colaboración con esta. Las medidas adoptadas por las Comunidades Autónomas en estos casos no tendrán repercusiones económicas en el sistema eléctrico sin autorización previa del Ministerio de Industria, Energía y Turismo.
- Intervención de empresas: en caso de incumplimiento de las obligaciones que puedan afectar a la continuidad y seguridad del suministro eléctrico, el Gobierno puede intervenir una empresa de acuerdo con el artículo 128.2 de la Constitución, adoptando las medidas necesarias para ello. La intervención puede ocurrir en casos de concurso de acreedores, gestión irregular de la actividad o falta de mantenimiento adecuado de las instalaciones que ponga en peligro su seguridad.
- Información a la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia: se proporcionará a la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) información sobre la aplicación de las medidas para garantizar el suministro de energía eléctrica.

4.6.2 Artículo 16: Peajes de acceso a las redes y cargos asociados a los costes del sistema

Este artículo establece las bases para poder hacer uso de las redes ya creadas para el sistema eléctrico español, será de gran utilidad debido a que nuestra subestación se encontrará conectada a dicha red.

- Libre acceso a las redes: se establece que los usuarios tienen derecho a acceder a las redes de transporte y distribución eléctrica en condiciones no discriminatorias. Esto implica que los titulares de instalaciones de generación y consumo de energía tienen derecho a utilizar las redes existentes, siempre que cumplan con los requisitos técnicos y administrativos establecidos.
- Conexión a las redes: expone el derecho de los titulares de instalaciones de generación y consumo de energía a solicitar la conexión a las redes de transporte y distribución eléctrica. La conexión debe ser realizada de manera no discriminatoria y en condiciones razonables, teniendo en cuenta la capacidad

y seguridad de las redes.

- **Regulación de acceso y conexión:** indica la obligación de regir el acceso y la conexión a las redes por las condiciones establecidas en la normativa aplicable. En particular, se menciona la necesidad de establecer procedimientos claros y transparentes, así como los criterios técnicos y económicos que deben cumplirse para acceder y conectarse a las redes.
- **Tarifas y peajes:** se señala la posibilidad de condicionar el acceso y la conexión a las redes al pago de tarifas y peajes, los cuales deben ser establecidos de acuerdo con los principios de eficiencia económica y coste-efectividad. Estos costes deben ser transparentes y no discriminatorios. Será importante tenerlos presentes en la viabilidad económica del proyecto.
- **Coordinación con las autoridades competentes:** las autoridades competentes, como la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), deben establecer las condiciones técnicas y económicas para el acceso y la unión a las redes, así como supervisar y controlar su cumplimiento.

4.6.3 Artículo 39: Autorización de instalaciones de distribución

Las subestaciones son tratadas como elementos pertenecientes a la red de distribución, de modo que deberá de cumplir los puntos expuestos a continuación:

- **Concesión de autorización:** la autorización no otorga derechos exclusivos de uso y se otorga considerando el carácter de red única y monopolio natural de la distribución eléctrica, así como el criterio de menor coste para el sistema en general, evitando perjuicios a los titulares de redes ya establecidas que deben atender nuevos suministros.
- **Red de distribución:** todas las instalaciones destinadas a suministrar a más de un consumidor se consideran redes de distribución y deben ser cedidas a la empresa distribuidora de la zona, que es responsable de la seguridad y calidad del suministro. Estas infraestructuras están abiertas al uso de terceros.
 - Cuando haya varios distribuidores en una zona a los que se puedan ceder las instalaciones construidas por un promotor, la autoridad competente determinará, antes de su ejecución, a cuál de los distribuidores se deben ceder, siguiendo criterios de menor coste para el sistema y regulaciones establecidas por la Administración General del Estado.
 - Cuando en un área sin electrificar haya varios distribuidores interesados en desarrollarla, la autoridad competente, considerando el carácter de red única y el objetivo de generar el menor coste de retribución para el sistema, determinará qué empresa distribuidora debe llevar a cabo el desarrollo antes de la ejecución de las instalaciones.
- **Registros de distribuidores:** existe un registro administrativo de distribuidores dependiente del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, donde deben estar inscritas las empresas distribuidoras debidamente autorizadas. Las Comunidades Autónomas con competencias en la materia pueden crear y gestionar registros territoriales en los que deben inscribirse todas las instalaciones ubicadas en su ámbito territorial.

Una vez realizada la construcción existen dos posibilidades, ceder los derechos de explotación y mantenimiento de la subestación a un distribuidor autorizado o convertirse en uno para poder encargarse personalmente.

4.6.4 Artículo 53: Autorización de instalaciones de transporte, distribución, producción y líneas directas.

Una vez construida la subestación se requerirá de una serie de autorizaciones para poder iniciar su

funcionamiento.

- Autorización administrativa previa: se tramita junto con el anteproyecto de la instalación y, en su caso, con la evaluación de impacto ambiental. Concede a la empresa autorizada el derecho a realizar una instalación específica bajo ciertas condiciones. En el caso de instalaciones de generación, no se puede otorgar la autorización sin los permisos de acceso y conexión a las redes correspondientes, podría ser el caso de una subestación perteneciente a un proyecto de generación.
- Autorización administrativa de construcción: permite al titular llevar a cabo la construcción de la instalación cumpliendo con los requisitos técnicos exigibles. Se presenta un proyecto de ejecución junto con una declaración responsable de cumplimiento de la normativa aplicable.
- Autorización de explotación: permite poner en funcionamiento las instalaciones una vez ejecutado el proyecto.
- Requisitos para la autorización: el promotor de una instalación debe demostrar aspectos técnicos y de seguridad de las instalaciones y equipos asociados, cumplimiento de condiciones de protección ambiental, características del emplazamiento y capacidad legal, técnica y económico-financiera para llevar a cabo el proyecto.

La administración pública competente puede establecer que ciertos tipos de modificaciones no sustanciales de las instalaciones no requieran las autorizaciones administrativas previas mencionadas. Se establecerán criterios reglamentarios para determinar qué modificaciones se consideran no sustanciales, basados en las características técnicas de la modificación proyectada. Sin embargo, estas modificaciones deben obtener la autorización de explotación previa, demostrando el cumplimiento de las condiciones de seguridad de las instalaciones.

Se podrá eximir reglamentariamente a las instalaciones de producción de pequeña potencia del régimen de autorizaciones previsto en los apartados anteriores.

La transmisión y cierre definitivo de las instalaciones requieren una autorización administrativa previa, que también se aplica al cierre temporal de instalaciones de producción. El titular de la instalación tiene la obligación de desmantelarla tras el cierre definitivo, a menos que la autorización de cierre permita lo contrario. El cierre definitivo de instalaciones de generación debe contar con un informe del operador del sistema que evalúe posibles afectaciones a la seguridad de suministro.

4.6.5 Artículo 56: Utilidad pública

Las subestaciones son consideradas de utilidad pública, a efectos de expropiación forzosa de los bienes y derechos necesarios para su establecimiento y de la imposición y ejercicio de la servidumbre de paso. Del mismo modo se extiende dicha declaración de utilidad pública para la subestación construida cuando por razones de eficiencia energética, tecnológicas o medioambientales sea necesaria.

Este artículo nos facilita la elección de la ubicación permitiéndonos una expropiación forzosa en caso de poder demostrar el beneficio público de situarla en dicha localización. De la misma manera puede expropiarse la subestación al completo en caso de ser necesario.

4.7 Ordenación Urbanística en Andalucía

La Ley 6/2016, de 1 de agosto, por la que se modifica la Ley 7/2002, de 17 de diciembre, de Ordenación Urbanística de Andalucía establece los criterios y directrices para la ordenación del territorio, incluyendo la distribución territorial de las infraestructuras y equipamientos (Junta de Andalucía, 2016). La ubicación de una subestación debe ser coherente con la ordenación territorial establecida, considerando aspectos como la conectividad, el desarrollo sostenible y la integración en el entorno.

Se dictan los procedimientos y requisitos para la elaboración y aprobación de los instrumentos de planeamiento urbanístico, como el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) y los Planes Especiales. La subestación debe

estar contemplada en el planeamiento correspondiente y cumplir con las condiciones y normas establecidas en dichos instrumentos.

Se regulan las condiciones de edificación y uso del suelo, estableciendo parámetros urbanísticos como alturas máximas, densidades de ocupación, espacios libres, entre otros. La ubicación y construcción de una subestación deberá ajustarse a estos parámetros y requerirá obtener las correspondientes licencias y autorizaciones de acuerdo con la normativa urbanística.

Será obligatorio realizar una evaluación ambiental para determinados proyectos que puedan tener un impacto significativo en el medio ambiente. Será necesario realizarla en este proyecto, proponiendo medidas de mitigación y protección ambiental.

Se priorizará la protección y conservación del patrimonio histórico y cultural, aplicándose medidas específicas de protección en caso de que la subestación se encuentra en una zona de interés patrimonial, se requerirá autorizaciones adicionales para garantizar la preservación de los valores patrimoniales.

Es importante tener en cuenta que la aplicación de la ley puede variar según el municipio y el planeamiento urbanístico local. Por lo tanto, es fundamental consultar la normativa urbanística específica del municipio donde se pretenda ubicar la subestación para asegurarse de cumplir con todos los requisitos y procedimientos necesarios.

4.8 Ordenación de territorio y urbanismo

El proyecto se sitúa en Andalucía, de forma que además de cumplir con la legislación aplicable a nivel nacional, será necesario cumplir con la andaluza. En el Decreto 36/2014 se regula el ejercicio de las competencias de la Administración de la Junta de Andalucía en materia de Ordenación del Territorio y Urbanismo, establece las competencias y procedimientos que la Junta debe seguir en relación con la Ordenación del Territorio y el Urbanismo (Junta de Andalucía, 2014). Aunque no hace referencia específica a las subestaciones eléctricas, existen algunos puntos relevantes que podrían aplicarse a ellas:

- **Artículo 3. Competencias:** establece que la Administración de la Junta de Andalucía tiene competencia en materia de ordenación del territorio y urbanismo, lo que implica que puede ejercer funciones de control y supervisión sobre la ubicación y desarrollo de las subestaciones eléctricas.
- **Disposición adicional segunda:** Se afirma la coordinación con los municipios en la elaboración y aprobación de los instrumentos de planeamiento urbanístico. Esto implica que puede colaborar con los municipios en la planificación y autorización en la ubicación de nuestro proyecto.
- **Disposición adicional octava:** Cuenta con competencias para llevar a cabo la evaluación ambiental de proyectos y planes de ámbito regional. En el caso de las subestaciones eléctricas, si el proyecto cumple con los criterios establecidos, podría requerirse una evaluación ambiental que evalúe los posibles impactos ambientales y proponga medidas de mitigación. Además, cuenta con la capacidad para emitir informes y conceder autorizaciones en materia de ordenación del territorio y urbanismo. Se podrían requerir la obtención de informes favorables y autorizaciones por parte de la Junta de Andalucía, además de los correspondientes informes y autorizaciones municipales.

5 ANÁLISIS DE RIESGO Y SEGURIDAD

La ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de riesgos laborales establece el marco legal para la protección de los trabajadores frente a los riesgos derivados de su actividad (Gobierno de España , 1995). Se fundamenta en la prevención la cual contiene conjunto de actividades o medidas adoptadas en todas las fases de actividad con el fin de evitar o disminuir los riesgos derivados del trabajo. Para garantizarla se establecen una serie de puntos a seguir:

- Evaluación de riesgos presentes trabajo. Serán tenidos en cuenta tanto los riesgos durante la construcción como su posterior explotación y mantenimiento. Teniendo presente que contamos con un riesgo importante durante todas las fases, el eléctrico. Se deberá considerar las posibles consecuencias de estos riesgos.
- Planificación de la prevención adoptando medidas preventivas para los riesgos que se hayan evaluados anteriormente incluyendo la selección adecuada de equipos y métodos de trabajo para minimizar los riesgos.
- En la construcción de subestaciones es común la presencia de distintas empresas realizando trabajos simultáneos. Será fundamental establecer una comunicación garantizando la cooperación y seguridad entre los distintos actores involucrados.
- Será necesario dotar a los trabajadores de sus equipos de protección individual correspondiente y se implementaran las medidas de protección colectivas.

La mayoría de los trabajos se realizarán en presencia de electricidad, existiendo siempre el peligro de producirse un contacto eléctrico. Distinguimos entre dos tipos de contactos eléctricos:

- Directo: entre una fase y el neutro, para evitar este tipo de contactos deberán de estar correctamente aislados todos elementos con carga. De esta forma su conductividad será prácticamente nula.
- Indirecto: cuando un elemento accidentalmente está en tensión. Para prevenir este tipo de contacto los elementos deberán estar conectados a tierra, mediante una línea que oponga poca resistencia, de este modo en caso de fallo la intensidad fluirá por la línea de tierra.

En los conductores de alta tensión, como es el caso, se pueden producir descargas eléctricas sin necesidad de que se produzca el contacto físico, debió al campo eléctrico. Para ello se establece una distancia de seguridad en función del voltaje:

- 3 metros para cualquier línea aérea
- 4,5 metros para tensiones superiores a 66kV
- 13 metros para tensiones superiores a 220kV

En toda la instalación será necesario garantizar las distancias de seguridad, mediante el uso de protecciones por alejamiento u obstáculos.

5.1 Señalización

Con el objetivo de garantizar la seguridad en el interior y alrededores la subestación se colocarán una serie de carteles informativos tal y como se establece en el artículo (hc-energía, 2013) colocando, un cartel a la entrada indicando el nombre de la subestación y empresa constructora. Carteles tipo por cada área, tanto en la entrada principal como en los accesos a cada una de las áreas, indicando obligaciones, riesgos y prohibiciones específicas del lugar en la subestación que se accede. Contendrán tanto pictogramas como información escrita, por ejemplo, en el situado en la entrada principal se deberá de indicar:

- Peligro alta tensión advirtiendo sobre la presencia de alta tensión en la subestación y la importancia de mantenerse alejado de las áreas restringidas.
- Acceso restringido al personal autorizado indicando que solo las personas autorizadas pueden ingresar a la subestación y que se deben seguir los procedimientos de seguridad adecuados.
- Uso Obligatorio de Equipos de Protección Personal informando que se deben usar los equipos de protección personal adecuados para ingresar a la subestación, como casco, guantes, gafas de seguridad, etc.
- Prohibido el paso haciendo ver que se trata de un área peligrosa y donde el acceso no está permitido sin la autorización previa.

En el acceso a la sala de grupos de transformación se añadirán los pictogramas de riesgos de explosión y el uso obligatorio de medidas de protección auditivas.

En señales con el fondo verde y los símbolos en blanco se indicarán las rutas de evacuación y salidas de emergencia, usando señales con fondo rojo y símbolos en rojo para las medidas de protección contra incendios, ya sean extintores, mangueras, alarma, etc.

A lo largo de todo el perímetro de la subestación se colocarán señales de riesgo eléctrico, con fondo amarillo y simbología en negro, indicando el peligro de muerte por alta tensión. Se deberán de ubicar cada 10 metros.

5.2 Impacto medio ambiental

Es considerado impacto medioambiental cualquier cambio en el medioambiente, sea beneficioso o adverso, resultante en todo o en parte de las actividades, productos o servicios de una actividad humana. Se origina debido a una acción humana y se manifiesta según tres facetas sucesivas:

- La modificación de alguno de los factores ambientales o el conjunto del sistema ambiental.
- La modificación del valor del factor alterado o del conjunto del sistema ambiental.
- La interpretación o significad ambiental de dichas modificaciones, y en último término, para la salud y el bienestar humano.

El impacto ambiental hay que tenerlo en cuenta durante las tres fases del proyecto: construcción, explotación y desmantelamiento. Los impactos producidos por un proyecto de características semejantes (Enatrel, 2017) son:

- Construcción de obras temporales para bodegas y oficinas provisionales, almacenes, talleres, instalación de sanitario, y otras obras temporales.
- Limpieza, roce y despeje: comprende la limpieza inicial del sitio y el corte o desrame de árboles y/o arbustos, limpieza de basura, cobertura vegetal menor (con predominio de maleza y pastos) que se encuentran en el área donde se construirá la subestación y en el derecho de servidumbre de la línea de transmisión. Incluye los cortes y derrame de vegetación cuando se realice el movimiento de tierra, el montaje de estructura, montaje de estructura y apoyos, el tendido de cables
- Movimientos de tierra tales como excavaciones de zanjas para cimientos, base de equipos, zapatas, canaletas, ductos, entre otros.

- Montaje de estructuras y apoyos, para la construcción de la línea de transmisión.
- Instalación de máquinas y equipos, se incluye la instalación de: Transformadores, Interruptor de Potencia, Pararrayos, Seccionador, Aisladores, Caja de centralización para Transformador de corriente Servicios Auxiliares, Comunicaciones, Red de Tierra, Iluminación y Accesorios.
- Tendido de cables: tendido de conductores y tensado.
- Construcción de acceso y obras complementarias
- Energización de la línea
- Construcción de obras exteriores

Será necesario realizar un estudio de la flora y fauna perteneciente al área de influencia de la subestación, realizando un control durante todas las fases del proyecto garantizando su correcta coexistencia con la subestación.

Siempre que se tengan identificados los posibles impactos ambientales, se cumpla con la normativa y se realice una gestión de los residuos generados el impacto ambiental será de aceptable. Dependiendo de la localización final elegida existirá una legislación más o menos restrictiva respecto a este, de modo que será una cuestión a tener en cuenta a la hora de elegir los criterios.

6 EVALUACIÓN ECONÓMICA

El trabajo deberá ser evaluado en todos sus aspectos y uno de los principales corresponde al económico. En este capítulo mencionaremos algunos de los costes y cómo pueden verse afectados en función de la localización elegida. También se comentará el impacto económico producido por el trabajo en la zona elegida.

En los alrededores de la ubicación elegida se producirá un impacto económico positivo creando empleos tanto directos como indirectos durante su etapa de construcción como de mantenimiento. Como es afirmado por (Basonia, 2010) la mejora del servicio eléctrico con la ampliación de la potencia de transformación en la zona proporcionará una disminución de costes en el servicio, disminuyendo las pérdidas por mal funcionamiento del sistema, esta disminución de costes se verá reflejada en la factura de la luz particular.

Estos argumentos serán usados a la hora de la elección de la ubicación, dando acceso a subvenciones y permisos por tratarse una acción de interés social, disminuyendo los costes de permiso y licencias.

Los costes de logística y transporte de equipos a la subestación están directamente relacionados con la ubicación elegida. Será necesario tener en cuenta los accesos ya existentes la ubicación elegida, en caso de ser inexistentes deberán de ser construidos con el coste adicional que ello conlleva.

El valor y propiedad del terreno elegido para la construcción, debido a que deberá ser compensado económicamente su propietario, así como la ingeniería, diseño y transformación del terreno que deberá de producirse para el correcto emplazamiento.

Se deberá estudiar el coste de conexión a la red, la compensación que puede exigir la empresa distribuidora en la zona, descrito en el punto 4.6.2 como el coste de realizar una conexión física, materiales, mano de obra, obtención de nuevos permisos, etc. Teniendo en cuenta los costes de mantenimiento preventivo tanto de la conexión con la red como de la propia estación.

Todos estos costes deberán de ser contemplados en la viabilidad económica, teniendo siempre presente la eficiencia energética, la cual mediante el uso de tecnología y equipos más eficiente nos puede ayudar tanto a disminuir los costes como a mejorar el impacto ambiental de nuestra subestación eléctrica.

7 CRITERIOS CONSIDERADOS PARA LA UBICACIÓN DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

Será necesario determinar los distintos criterios y factores influyentes en la ubicación de nuestra subestación eléctrica en la comarca de La Campiña. Obtendremos dos tipos de criterios, los excluyentes, en los que o se puede o no se puede construir la subestación y un segundo tipo a los cuales le daremos una importancia relativa e iremos puntuando las zonas para determinar la más idónea.

7.1 Criterios considerados

Hemos extraído del artículo de (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021) los criterios más relevantes en la ubicación de una nueva subestación.

- **Densidad de consumo eléctrico local:** es fundamental conocer la demanda actual cercana a las posibles localizaciones de la subestación, se han de construir cercanas al consumidor final, disminuyendo así sus pérdidas en la distribución a baja tensión, como hemos explicado anteriormente en el apartado 2.2. Deberemos obtener el consumo eléctrico en kW/m^2 más adelante se explicará el procedimiento.
- **Pendiente:** la subestación deberá ubicarse preferentemente en un terreno de poca pendiente, de esta forma se disminuirán los costes de construcción y se podrá llevar a cabo en una menor duración. Permitirá un mantenimiento y explotación más sencillos.
- **Distancia a carreteras principales:** es fundamental que se encuentre cercana a carreteras principales, durante su construcción y mantenimiento será necesario el uso de maquinaria pesada y el transporte de grandes equipos. Sin embargo, por motivos de seguridad se deberá respetar una distancia mínima con respecto a esas mismas carreteras.
- **Distancia a la red eléctrica:** nuestra subestación deberá encontrarse conectada a la red eléctrica. Cuanto más cerca nos encontremos de las redes de distribución de alta tensión, menor será la infraestructura a construir para unir nuestra subestación a la misma. No obstante, legalmente, tal y como se ha mencionado en el apartado 4.1, no podremos situar nuestra estación bajo líneas de alta tensión ajenas a ella, de modo que deberemos establecer una distancia mínima de seguridad con las redes de distribución.
- **Distancia a subestaciones ya existentes:** en caso de existir una subestación que ya este abasteciendo a la zona no sería necesario realizar la construcción de una nueva con todos los costes que ello conlleva. Para determinar la distancia mínima de separación entre dos subestaciones ya existentes (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021) haciendo uso de un problema modelado por (Daskin, 2013) establecieron 2,5 km como distancia mínima a la que no deben situarse dos subestaciones.
- **Área mínima:** Se deberá contar con la superficie necesaria para construir la subestación de las características definidas en el apartado 2.5, 2000 m².

En la publicación de (Um, 2021) encontramos dos nuevos criterios importantes a tener en cuenta:

- **Expropiación del terreno:** será fundamental tanto desde el punto de vista burocrático como el de costes la elección de un terreno barato y de fácil construcción. Para ello se buscará un terreno clasificado de forma apta para este tipo de construcciones, como por ejemplo el industrial.
- **Temperatura:** se trata de un criterio excluyente, debido a lo comentado en el apartado 4.5 en unos rangos determinados de temperatura aumentan los requisitos necesarios para la instalación de los

transformadores, con el objetivo de evitar ese problema descartaremos todas las posibles ubicaciones que no se encuentren dentro de los rangos.

- **Zonas protegidas:** para facilitar los permisos de construcción deberemos se evitarán todo tipo de zonas protegidas ya sean patrimonio histórico, reservas naturales...

7.2 Criterios ampliados (no considerados en este trabajo)

Si se desea realiza un análisis más profundo o para regiones en donde estos criterios sean críticos existe una lista más extensa a tener en cuenta para seleccionar la ubicación.

- **Distancia a antenas:** (Chen, 2021) establece un nuevo criterio con respecto a la distancia respecto antenas y apartaos de radio frecuencia. Como ya hemos mencionado anteriormente, las emisiones radio magnéticas producidas en una subestación y pueden afectar a antenas de radio. Para evitar interferencias se establecerá una distancia de seguridad con respecto a las principales antenas ya existentes.
- **Ambiente apropiado:** como señalan (Liu, Yan, & Xu, 2013) deberá de localizarse alejada de lugares con riesgo de explosión o inflamación, áreas contaminadas y deberá de ser una zona fácil radiocomunicación.
- **Aceptación pública:** es conveniente como viene reflejado en el artículo de (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021) involucrar y tener en cuenta la comunidad, de esta manera se podrán mitigar problemas como impacto visual, comunicación, costes de mantenimiento...
- **Patrimonio cultural:** según lo expuesto por (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021) será conveniente evitar localizaciones cercanas a monumentos o zonas arqueológicas.

En el estudio de (Um, 2021) se encuentran un gran número de criterios usados a la hora de elegir la ubicación, de manera que se mantenga la seguridad, sea económicamente viable, no perjudique al ambiente que le rodea y cumpla con sus condiciones de operación.

- **Riesgo de inundaciones:** como es recalado en el artículo nos encontramos trabajando con elevadas tensiones, para garantizar la seguridad y un correcto funcionamiento será necesario mantener nuestra subestación a una distancia mínima de ríos, lagos y embalses. Este criterio es también considerado de naturaleza excluyente.
- **Geología:** para poder garantizar la seguridad y el servicio será muy conveniente la elección de una zona geológica estable.
- **Condiciones de vida:** la subestación será necesaria de mantener durante su funcionamiento, de modo que será necesario tener operarios trabajando en ella, sería conveniente tener en cuenta las condiciones de vida cercana para poder alojar los operarios. También es aplicable para los operarios durante la construcción.
- **Altura:** para facilitar la ejecución del proyecto localizaremos la subestación a una altura menor a 1000 metros, tal y como se ha mencionado en el apartado 4.5 a partir de esa altura los transformadores deberían de ser rediseñados suponiendo un sobre coste adicional en nuestro proyecto. Al encontrarse toda La Campiña en una cota inferior a los 1000 metros no sería necesario tener en cuenta este criterio.

7.3 Analytic Hierarchy Process

Para establecer los pesos de cada criterio vamos a ampliar el análisis realizado por (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021), que mediante *Analytic Hierarchy Process* (AHP) determinaron importancia relativa de cada uno (Figura 10).

Criteria	1	2	3	4	5
1: Electric load density	1	7	3	2	5
2: Slope	1/7	1	2	1/2	3
3: Distance to main roads	1/3	1/2	1	1	3
4: Distance to subtransmission network	1/2	2	1	1	8
5: Distance to facilities	1/5	1/3	1/3	1/8	1

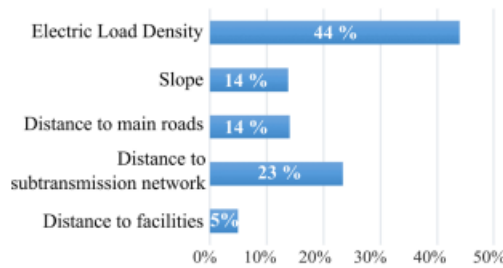


Figura 10 - Cálculo de la matriz de prioridad y obtención de los pesos mediante AHP

Fuente: (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021)

Realizaremos el mismo proceso para nuestros criterios, usando el mismo método de decisión multicriterio, AHP, que se basa en la representación del problema mediante una jerarquía en la que se incluyen los criterios y las alternativas (Saaty, 1980). Nos limitaremos a realizar la primera parte del análisis, en el que se establecen los pesos de los criterios, la evaluación de las alternativas la realizaremos usando SIG.

Realizaremos una matriz de comparación por criterios siguiendo la siguiente escala (Tabla 7).

1	i y j son equivalentes/similares/iguales
3	i es preferible a j
5	i es claramente mejor que j
7	i es mucho mejor que j
9	i es absolutamente mejor que j

Tabla 7 - Escala del 1 al 9 con significado

Elaboración propia con datos de (Saaty, 1980)

Cabe destacar que los elementos de la diagonal tomarán un valor de 1 y los elementos simétricos son recíprocos, esto quiere decir $a_{ik} = \frac{1}{a_{ki}}$. Este proceso no será necesario realizarlo con los criterios excluyentes.

La nueva matriz de comparación incluyendo los nuevos criterios nos quedaría de la siguiente forma (Tabla 8).

Criterio	1	2	3	4	5	6
1 Densidad de consumo eléctrico local	1,00	7,00	3,00	2,00	5,00	3,00
2 Desnivel	0,14	1,00	2,00	0,50	3,00	0,50
3 Distancia a carreteras principales	0,33	0,50	1,00	1,00	3,00	1,00
4 Distancia a la red eléctrica	0,50	2,00	1,00	1,00	8,00	3,00
5 Distancia a subestación ya existente	0,20	0,33	0,33	0,13	1,00	0,33
6 Expropiación de terrenos	0,33	2,00	1,00	0,33	3,03	1,00

Tabla 8 - Comparación de los criterios

Elaboración propia usando datos de (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021) y metodología de (Saaty, 1980)

En la matriz de comparación es importante mantener la consistencia en la puntuación de distinto criterios. Esta consistencia nos verifica que nuestra matriz está construida de forma correcta, evitando incoherencia en las puntuaciones comparativas. Para ello calculamos su índice de consistencia, el cual se define como $CI = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1}$, donde λ_{max} es su máximo autovalor y N la dimensión de la matriz. En nuestro caso $CI = 0,077$

Para poder confiar en nuestra matriz es necesario definir el ratio de consistencia, $CR = \frac{CI}{RI}$. Siendo RI el índice para matrices aleatorias, lo extraeremos de la Tabla 9 en función del tamaño de nuestra matriz.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,6	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5

Tabla 9 - Índice para matrices aleatorias RI

Fuente: (Saaty, 1980)

En nuestro caso $CR = 0,058$, como afirma (Saaty, 1980) se considera consistencia aceptable si $CR \leq 0,1$. De modo que podemos confirmar la consistencia en nuestra matriz.

A partir de la comparación obtendremos la importancia relativa de los distintos criterios, la cual mostramos en la gráfica a continuación:

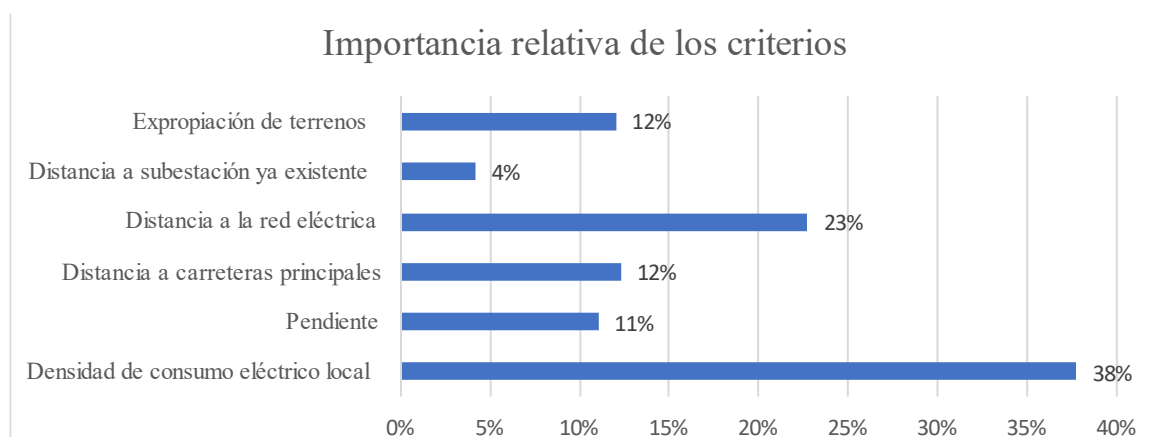


Figura 11 - Importancia relativa de los criterios

Elaborada a partir de Tabla 8

Observamos en la Figura 11 cómo a pesar de haber añadido un nuevo criterio los porcentajes no difieren significativamente de los calculados en el artículo ya mencionado. Estos datos serán usados más adelante en el trabajo cuando realicemos el análisis mediante SIG.

8 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

En este capítulo se introducen los conceptos básicos sobre Sistemas de Información Geográfica (SIG), se definen y se explican sus características principales y cómo se pueden utilizar. Además, se describen los componentes de un SIG y se discute su importancia.

8.1 Qué son los SIG

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un *software* diseñado para capturar, almacenar, analizar y visualizar datos geográficos. Estos datos geográficos pueden incluir información sobre ubicaciones, características físicas y sociales del terreno, así como información relacionada con la administración de recursos naturales y la planificación territorial. Los SIG utilizan técnicas de análisis espacial para comprender las relaciones y patrones entre los datos geográficos, lo que permite tomar decisiones informadas y respaldadas por evidencia en una variedad de campos, desde la planificación urbana hasta la gestión de desastres y el seguimiento de la biodiversidad. Se puede encontrar también por las siglas (GIS) en inglés “*Geographic Information System*”.

Tal y como comenta (Sutton, 2009) los sistemas de información geográfica son una tecnología relativamente moderna, comienzos en 1970, cuando estaban al alcance únicamente de universidades y empresas debido a su precio y equipos necesarios para ejecutarlo. Hoy en día con un ordenador personal y desde casa se puede acceder a un *software* de SIG.

Como señala en su libro (Puebla, 2014) los SIG permiten gestionar y analizar la información espacial, de modo que se han convertido en la alta tecnología de geógrafos y otros profesionales que trabajan sobre el terreno. Son herramientas de multipropósitos con aplicaciones en campos tan dispares como la planificación urbana, la gestión catastral, la ordenación del territorio, el medio ambiente, la planificación del transporte, el mantenimiento y la gestión de redes públicas, el análisis de mercados...

Estas características hacen que sea la tecnología ideal para usar en este estudio. Nos va a permitir evaluar el territorio de una forma sencilla.

8.2 Funcionamiento de un SIG

Como describe (Puebla, 2014) la información en los SIG se encuentra descompuesta por capas o estratos de información (Figura 12). Se puede elegir sobre que capa trabajar según las necesidades del momento, aun así, la gran ventaja de los SIG es la capacidad para relacionar distintas capas entre sí, permitiendo operaciones entre ellas, esto concede a los sistemas unas sorprendentes capacidades de análisis.

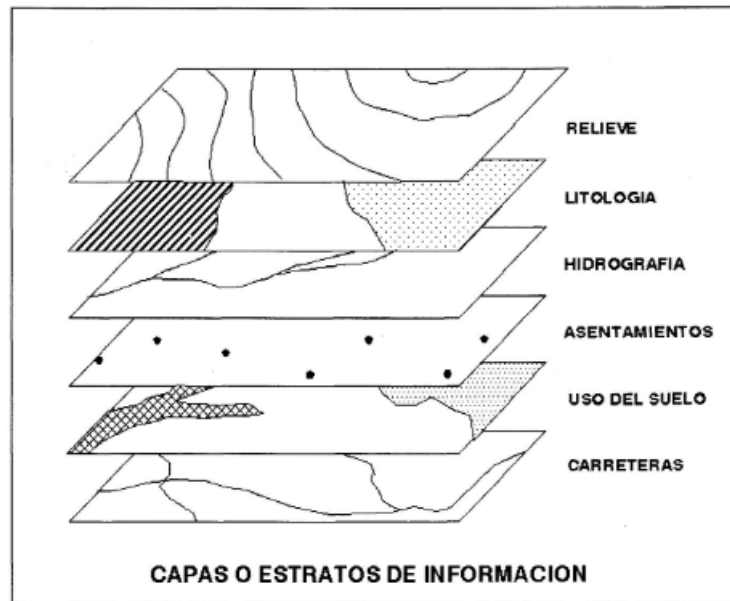


Figura 12 - Capas o estratos de información en un SIG

Fuente: (Puebla, 2014)

Se pueden añadir tantas capas como datos de información cartográfica de distintos tipos tengamos y queramos usar. El contar con diversas capas de información y la posibilidad de manipularlas nos permite obtener un conjunto de resultados e interpretaciones que no obtendríamos analizando cada una de las capas de manera individual (Bonham-Carter, 1994).

(Cutta, 2019) nos expone dos formas de representar la información en los SIG, de manera vectorial o ráster.

8.2.1 Modelo vectorial

De forma vectorial como es expuesto por (Sutton, 2009) se pueden representar las distintas características de una capa representado su forma geométrica como una interconexión de vértices. Estos vértices se localizan usando los ejes X e Y en caso de estar estudiando el espacio en dos dimensiones o X, Y y Z en caso de estar en tres dimensiones.

Existen varios casos: cuando la característica es un único vértice, hablamos de una característica puntual (Figura 13), en caso de existir dos o más vértices siendo el último y el primero distinto hablamos de una línea poligonal (Figura 14) y cuando existen tres o más vértices y el último es igual al primero hablamos de un polígono (Figura 15).

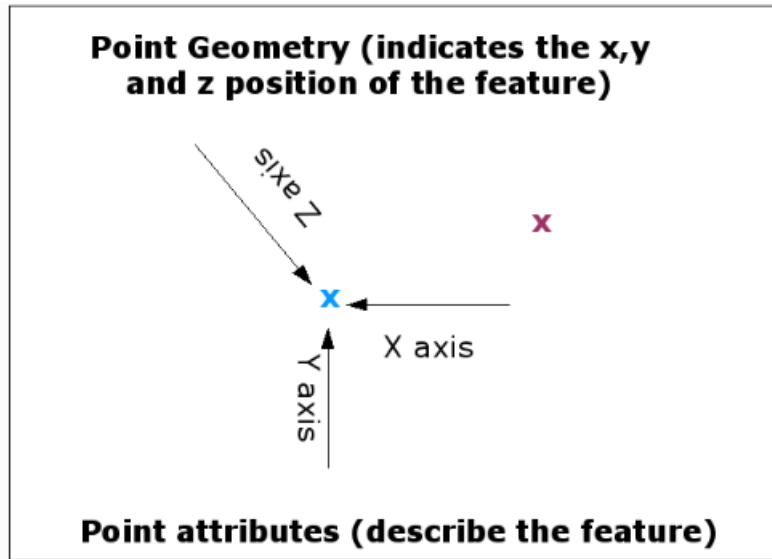


Figura 13 - Vector puntual característico

Fuente: (Sutton, 2009)

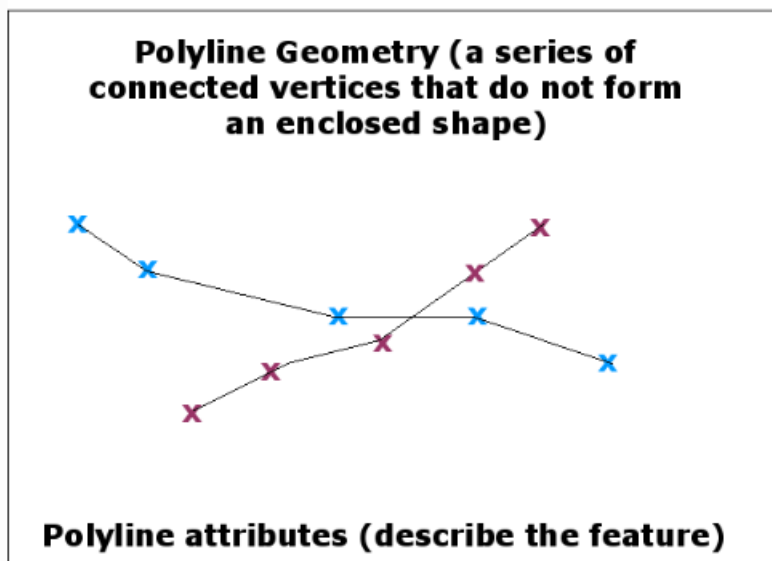


Figura 14 - Característica en forma de línea poligonal

Fuente: (Sutton, 2009)

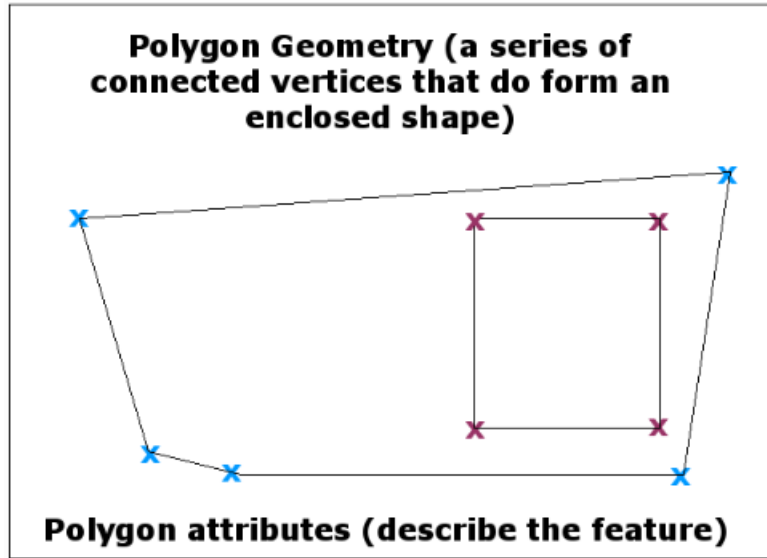


Figura 15 - Característica poligonal

Fuente: (Sutton, 2009)

8.2.2 Modelo ráster

Mientras que en el modelo vectorial es usada la geometría para representar los puntos, la forma ráster usa una estructura matricial (Figura 16). Se realiza una matriz de píxeles, donde cada unidad, también llamada celda, contiene un valor que representa el valor representativo del área cubierta (Sutton, 2009).

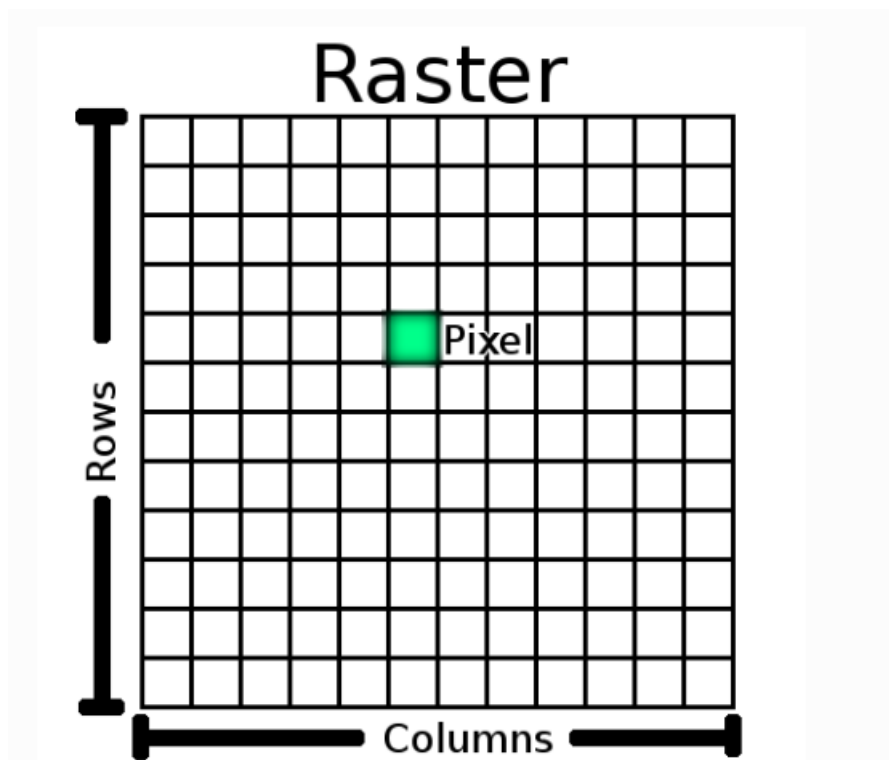


Figura 16 – Representación de una capa de rasterización señalizando una celda

Fuente: (Sutton, 2009)

Usamos la forma rasterizada cuando queremos representar información continua a lo largo de un área y no puede ser fácilmente en áreas vectorizadas. Se puede combinar los datos rasterizados para añadir más información a una capa vectorial. Esta será la forma usada para nuestra solución final, contaremos con nuestra región de estudio rasterizada en distintas celdas y cada una de ella contará con una puntuación en función de los criterios.

8.3 QGIS

Existen diversos programas que nos permiten trabajar con sistemas de información geográfica, para este trabajo se ha seleccionado el programa QGIS (QGIS Association, 2023).

Como es mencionado por (Cutta, 2019) QGIS es un *software* gratuito y de código abierto, el cual permite crear, manipular y visualizar información espacial. Con información espacial nos referimos a localizaciones normalmente definidas de forma vectorial o en forma de mapa de bits lo que es conocido como ráster.

Tal y como se definen a sí mismos en su página oficial (QGIS Association, 2023) son un proyecto impulsado por voluntarios y se encuentran abiertos a contribuciones ya sea como corrección de errores, reportes de los mismo, aportes de documentación o apoyo al resto de usuarios.

9 IMPLEMENTACIÓN DEL TRABAJO

Mediante el sistema de información geográfica elegido QGIS, procederemos desglosar los pasos a seguir para encontrar la mejor localización a una subestación eléctrica. Aplicaremos los criterios definidos en apartados anteriores a los datos de la región seleccionada. (Amores, 2018).

El procedimiento se muestra en la Figura 17. En primer lugar, aplicaremos por capas los criterios puntuables, en verde se encuentran los que nos interesa maximizar y en naranja los que nos conviene minimizar. Obtendremos con este paso un mapa puntuado al que aplicaremos los criterios excluyentes, estos multiplican por 0 o 1 el mapa puntuado, eliminando las localizaciones que no los cumplen. Finalmente seleccionaremos las zonas de mayor puntuación, estudiándolas mediante una ortofotografía eligiendo la solución final.

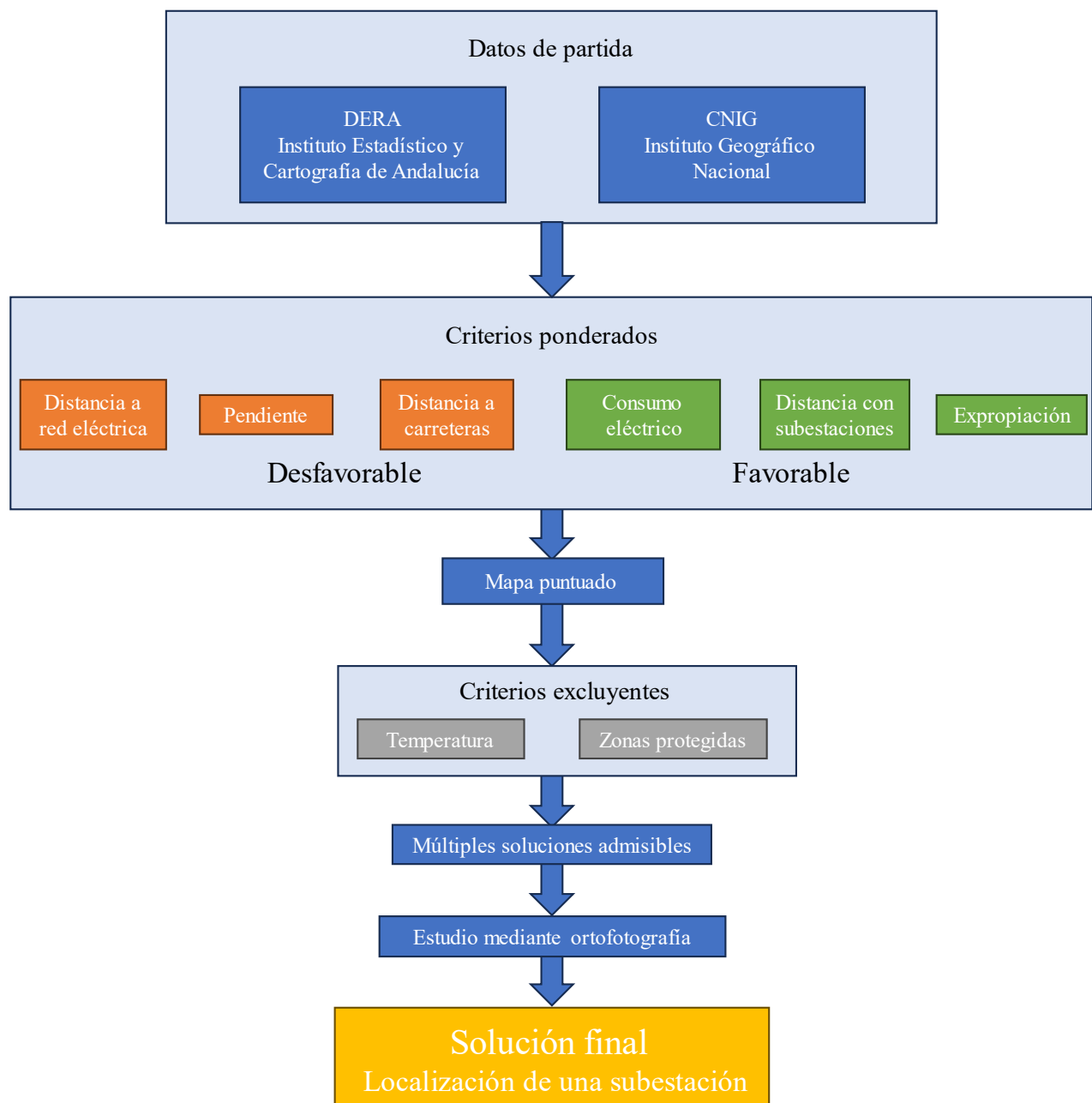


Figura 17 – Procedimiento para la elaboración del trabajo

El resultado final contará de un mapa rasterizado, dividido en celdas, con una puntuación en función de los criterios para cada una de ella. El ráster final contará con un paso de malla de 25 metros, este tamaño nos lo marca la capa de pendiente, capa usada como base y obtenida a partir de un modelo digital del terreno de 25x25 metros.

9.1 Datos de partida

Para poder aplicar los criterios definidos en el apartado 7, en primer lugar, debemos de contar con los valores para esos criterios en nuestra área de estudio.


Principalmente los datos han sido obtenidos del (Instituto Estadístico y Cartografía de Andalucía, 2023) en su portal de Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA) (Figura 18).

Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA) es un repertorio de bases cartográficas de diferente naturaleza geométrica (puntos, líneas, polígonos, imágenes raster) referidas al territorio andaluz.

Se presenta en bloques temáticos (relieve, hidrografía, transportes y comunicaciones, divisiones administrativas, etc) que permiten el acceso centralizado a información de muy distinta procedencia con garantía de actualización, coherencia geométrica y continuidad territorial.

Así mismo, se acompaña de dos bloques de datos espaciales que permiten contextualizar a Andalucía en el mundo y en su entorno más inmediato, además de un bloque de toponimia para usar en la maquetación de mapas.

Todo ello facilita a investigadores, profesionales, docentes y técnicos elaborar sus propias salidas cartográficas, su uso en funciones analíticas complejas y la generación de productos y aplicaciones.




- Organismo: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.
- Ámbito: Regional.

Actualizaciones:

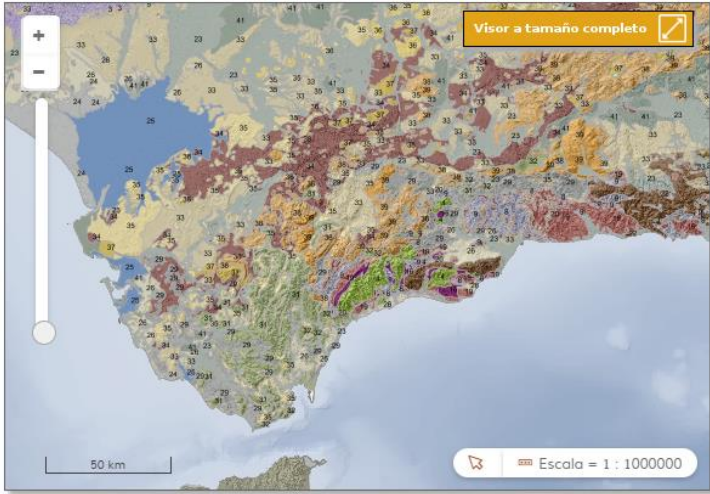
- Última actualización: 30/01/2023
- Registro de actualizaciones

Metodología:

- Informe metodológico estandarizado

Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA) 

- Nota divulgativa
- Documentos



Nota: para la visualización se recomienda utilizar Google Chrome (versión 56 o superior) o Mozilla Firefox (versión 45 o superior).

- Descarga de información
- Servicios de visualización (WMS) y descarga (WFS)
- Mapas provinciales (.pdf)

Figura 18 - Portal DERA

Fuente: (Instituto Estadístico y Cartografía de Andalucía, 2023)

Se puede acceder de manera gratuita, la información se encuentra dividida en dieciséis grupos en función de su naturaleza. En este trabajo los grupos usados han sido:

- Grupo 4-Medio físico: en este grupo se encuentra el mapa de temperatura media anual en Andalucía.
- Grupo 6-Usos del Suelo: mediante la capa de usos del suelo hemos seleccionado los industriales.
- Grupo 9-Transporte y Comunicaciones: contiene el mapa de la red de carreteras andaluzas.
- Grupo 10-Infraestructuras Energéticas y Medioambiente: de este grupo hemos usado tanto el mapa de subestaciones eléctricas como el de líneas eléctricas.
- Grupo 11-Patrimonio: se han usado los distintos mapas de zonas protegidas en Andalucía.

- Grupo 13-Limites Administrativos: en el encontramos mapas de términos municipales, provincias y comarcas agrarias.

Los datos se pueden descargar en diversos formatos, para este trabajo el formato de entrada ha sido .shp (ESRI *Shapefile*) para las capas vectoriales y .tif (*Tagged Image File*) para las capas tipo ráster.

También se han usado datos pertenecientes al (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023), dependiente del Instituto Geográfico Nacional (Figura 19), como por ejemplo el modelo digital de elevaciones con paso de malla de 25x25 metros y ortofotografías de la solución final.



Figura 19 – Centro de descargas perteneciente al Centro Nacional de Información Geográfica

Fuente: (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023)

La mayoría de los mapas usados de fondo pertenecen al a (OpenStreetMap, 2023), se trata de un mapa online de código abierto, con datos proporcionados por su comunidad, a la que puede pertenecer cualquier persona. Cada comunidad local usa imágenes áreas, dispositivos GPS, mapas y otras fuentes de datos verificando que los datos de OSM son precisos y verificados.

Existe un complemento para QGIS de Open Street Map, permitiéndonos tener una capa online con este mapa.

El sistema de referencias de coordenadas usado será el ETRS89 / UTM zone 30N correspondiente con el ID EPSG: 25830, durante todo el proceso deberemos de fijarnos en la esquina inferior derecha del programa, donde se especifica el sistema usado por la capa. En caso de que una capa no coincida será necesario modificarlo.

Nuestros datos descargados en su mayoría son de Andalucía al completo, será necesario ir recortando las capas para quedarnos únicamente con la comarca de La Campiña.

Para obtener la capa base de La Campiña obtendremos del grupo número 13 del (Instituto Estadístico y Cartografía de Andalucía, 2023) el cual corresponde a los límites administrativos (Figura 20). De este grupo usaremos la capa de comarca agraria para poder recortar la comarca de La Campiña, usando la herramienta “Cortar”.

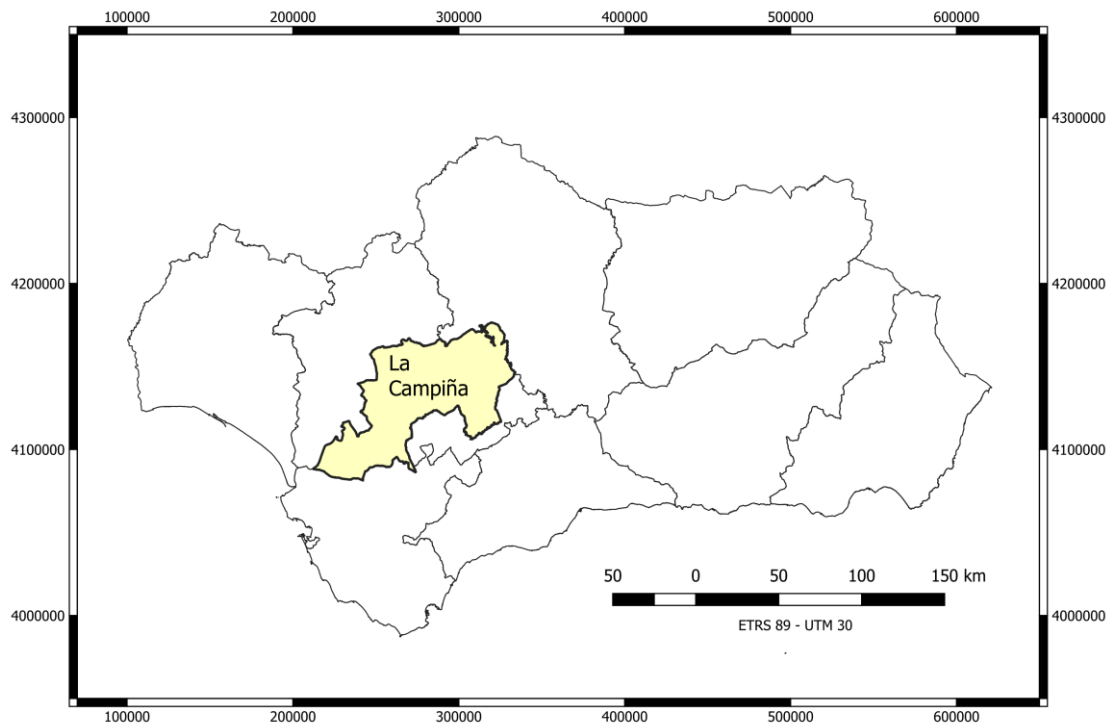


Figura 20 - Comarcas agrarias en Andalucía con La Campiña seleccionada

9.2 *Análisis multicriterio*

Para llegar a una buena solución realizaremos un análisis multicriterio, ponderando cada criterio según su peso relativo, calculado en el apartado 7.3. Nuestra mejor localización será aquella que maximice la suma de criterios ponderado. También debemos de tener en cuenta los criterios excluyentes, los cuales multiplican la solución final por 0 por 1 en función de si se puede ubicar o no.

Cabe destacar que todas las tablas usadas para puntuar los criterios se interpretan como intervalos semiabiertos del tipo: $a < x \leq b$

9.2.1 *Pendiente*

Para este criterio se ha descargado un modelo digital de elevaciones con paso de malla de 25 metros proporcionado por el (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023).

Para establecer un contexto general se ha elaborado en primer lugar (Figura 21), un modelo de pendientes de Andalucía con datos descargados de (Instituto Estadístico y Cartografía de Andalucía, 2023). Esta primera figura cuenta con un paso de malla de 250 metros, ya que para un paso de malla de 25 metros para toda Andalucía necesitaría una potencia de computación mayor a la disponible.

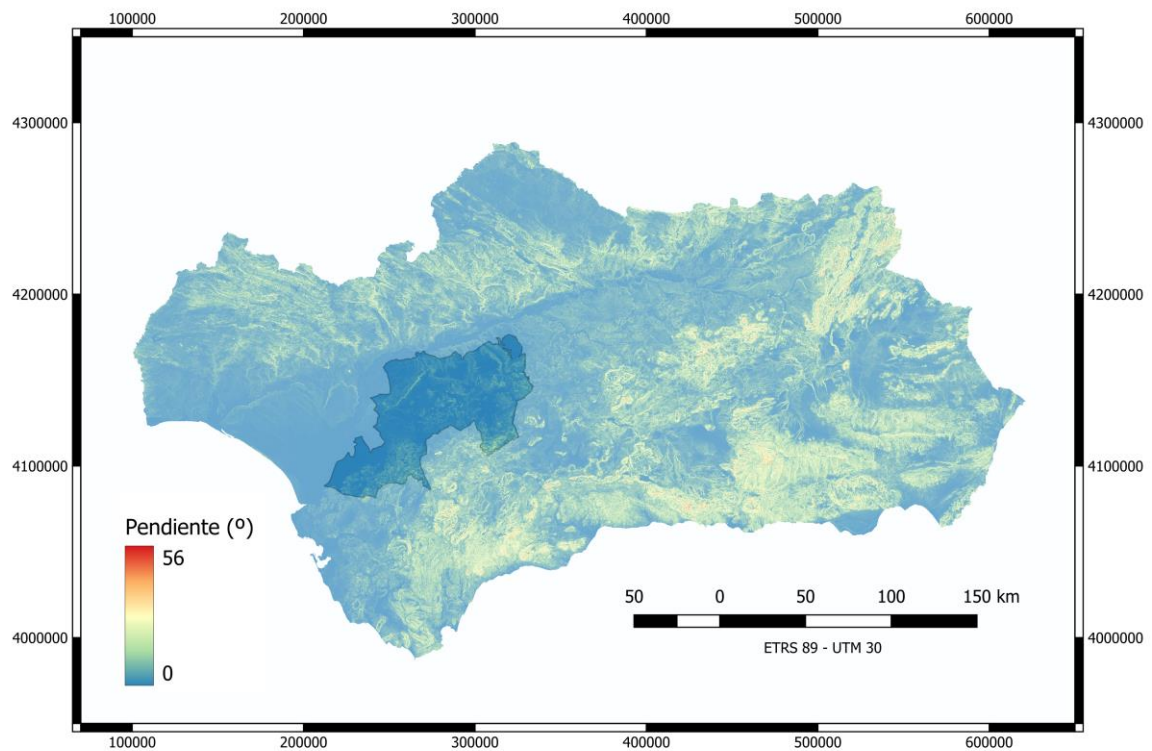


Figura 21 - Modelo de pendientes para Andalucía

Las capas descargas del Centro Nacional de Información Geográfica se encuentran en una codificación no valida en QGIS. Para el correcto funcionamiento de estas capas será necesario cambiar el sistema de referencia de coordenadas asignado para cada capa por “EPSG:25830-ETRS89 / UTM zone 30N” (Figura 22).

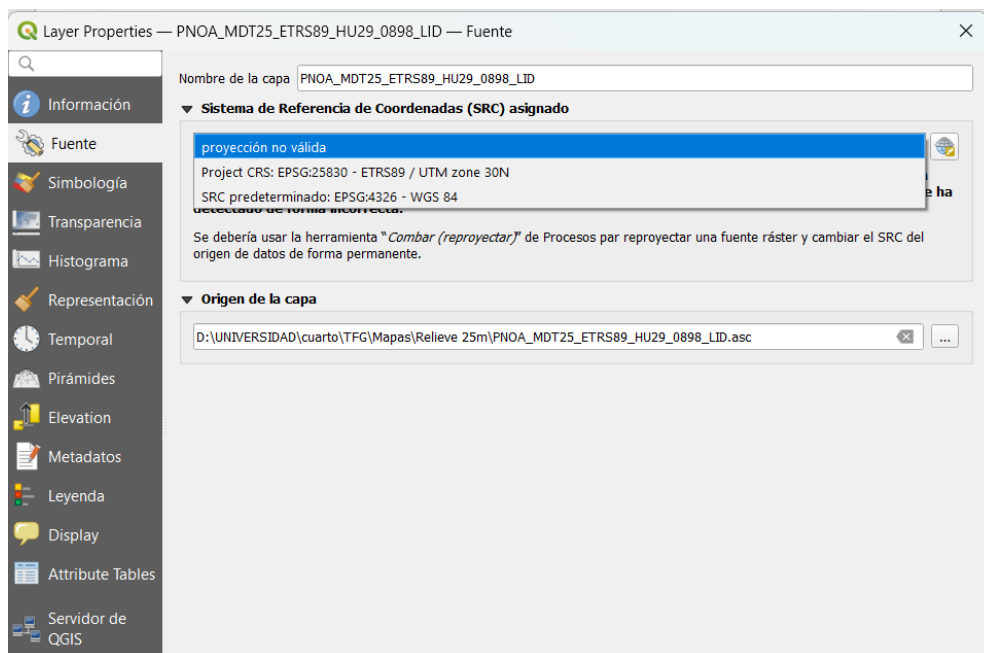


Figura 22 - Sistema de referencia de coordenadas asignado

Una vez asignado el sistema de coordenadas correcto, contaremos con un conjunto de capas ráster formando un mosaico (Figura 23), las cuales mediante la herramienta “Combinar” uniremos creando un único ráster (Figura 24).

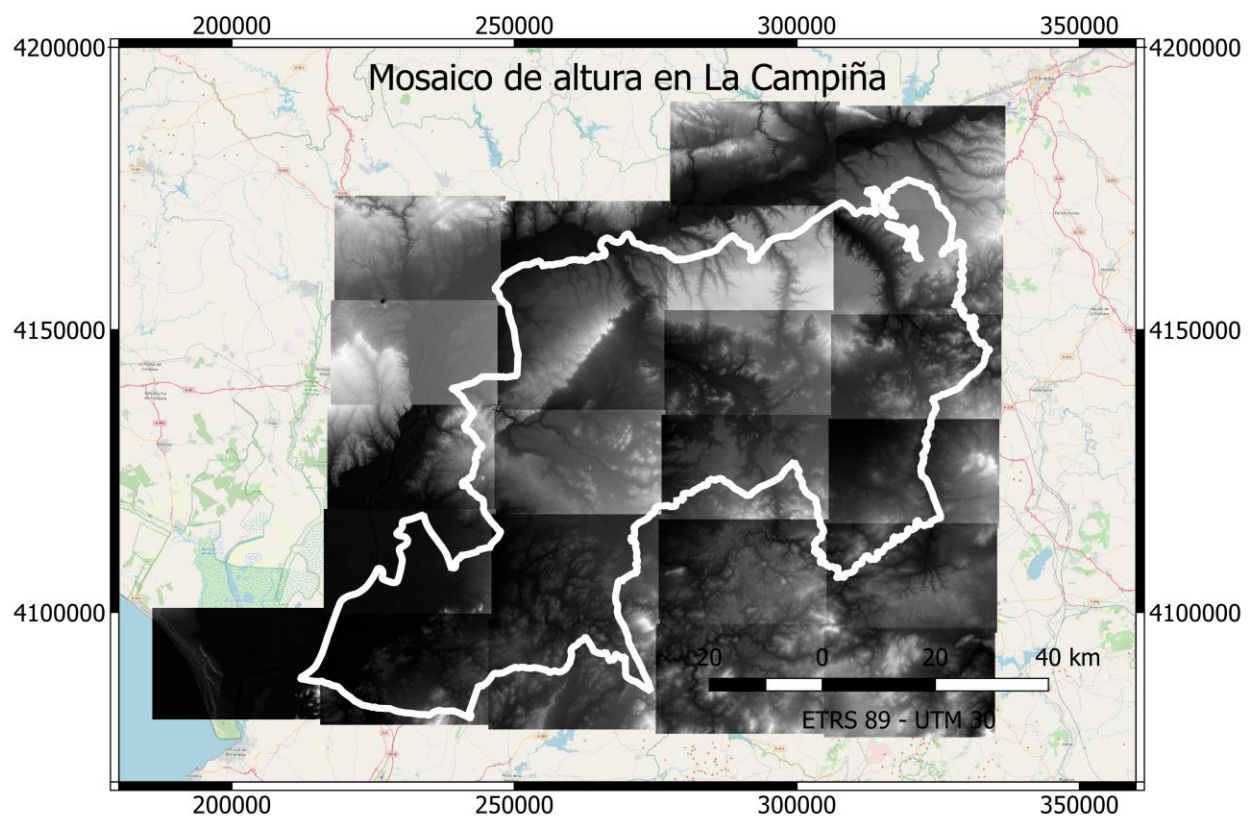


Figura 23 – Mapa de mosaico sin combinar de altura en La Campiña
Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

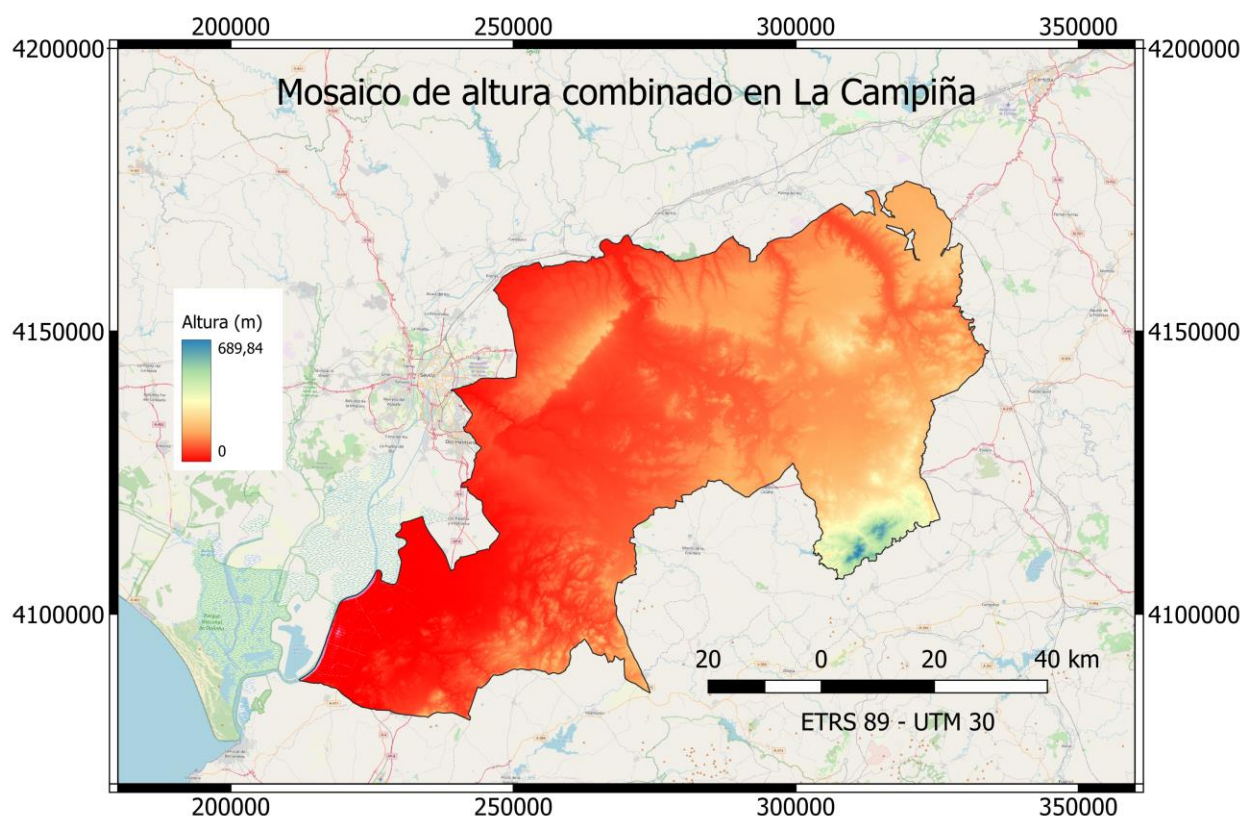


Figura 24 - Mosaico de altura combinado en La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Combinadas mediante la herramienta “Análisis del terreno ráster” y con ayuda del algoritmo pendiente crearemos un mapa ráster de pendientes a partir del modelo de altura del terreno. Nuestras celdas cuyos valores de altura estaban metros pasaran a tener valores de pendiente en grados.

Reclasificaremos la capa para poder hacer uso de nuestra tabla de valores (Tabla 10), para las reclasificaciones haremos uso de la herramienta “Reclasificar por tabla” e introduciremos nuestra tabla de puntuación añadiendo filas (Figura 25 y Figura 26). Esta tabla como se ha indicado anteriormente QGIS la interpreta como intervalos semiabiertos.

Pendiente (°)	0-1	1-7	7-13	13-18	18-23	23-28	28-30	> 30
Puntuación	8	7	6	5	4	3	2	1

Tabla 10 - Puntuación respecto a la inclinación del terreno

Fuente: (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021)

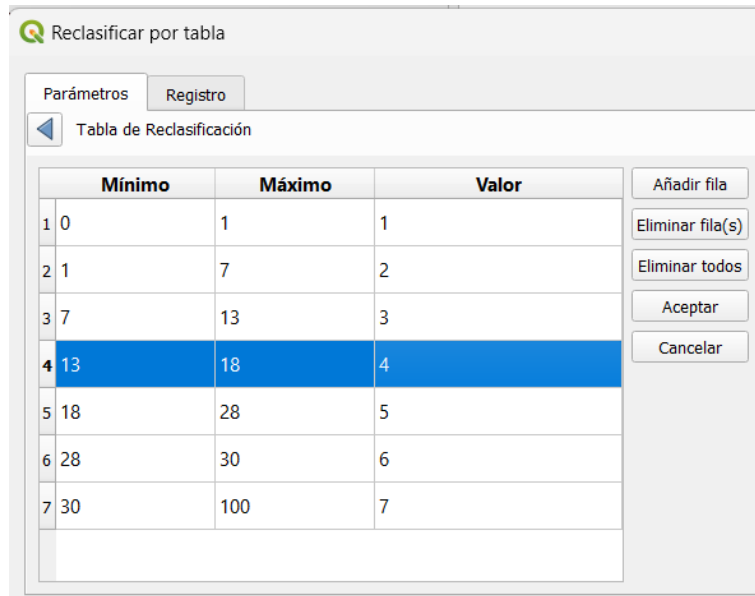


Figura 25 - Tabla de valores introducida en QGIS

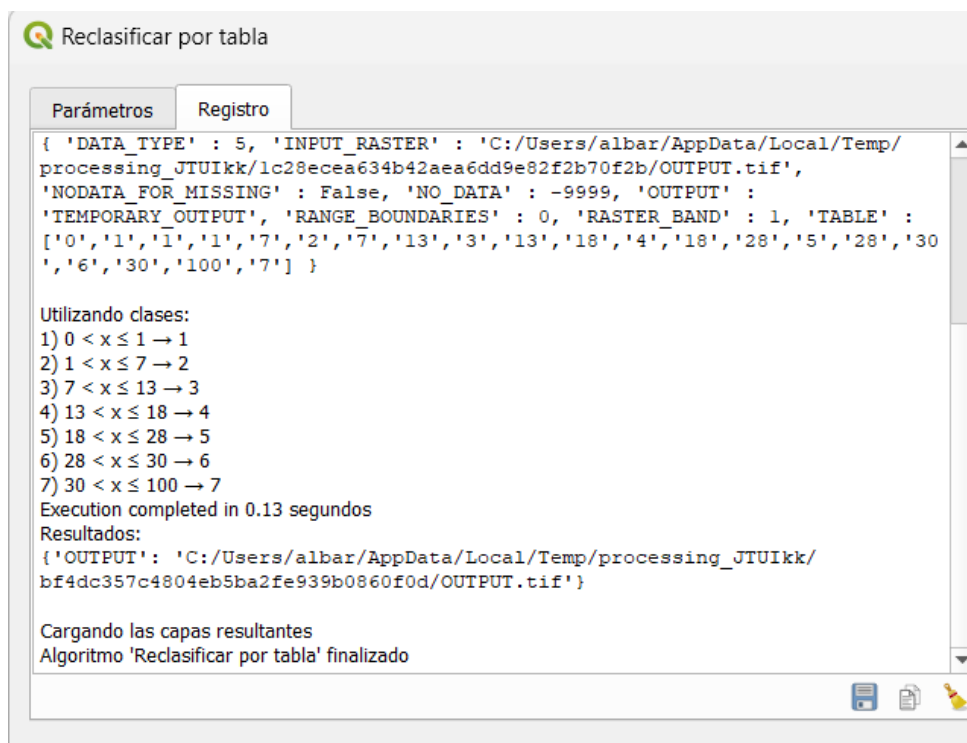


Figura 26 - Registro del algoritmo reclasificar

Una vez reclasificado, recortado usando la comarca de La Campiña y coloreado en función de los valores de la tabla, nos queda el siguiente mapa (Figura 27).

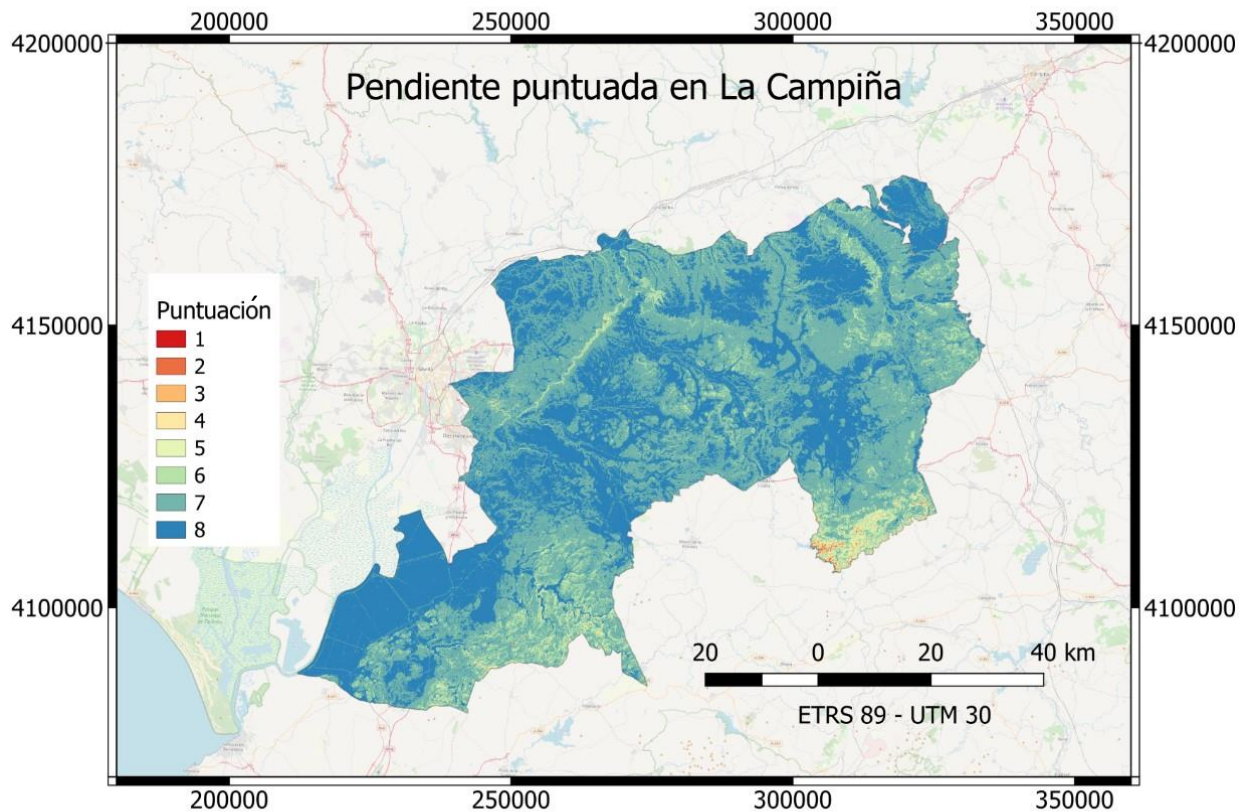


Figura 27 - Mapa rasterizado de pendiente en La Campiña
Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Este mapa rasterizado de 25x25 será la capa que usaremos de extensión de salida al rasterizar el resto de las capas vectoriales, será la capa que marque la disposición de las celdas en el resultado final.

Se observa una zona de mayor pendiente correspondiente con la sierra sur y una zona muy llana coloreada en azul intenso correspondiente al bajo del Guadalquivir

9.2.2 Densidad de consumo eléctrico local

Para valorar el consumo en cada celda, al no contar con el dato de demanda desagregado, será necesario realizar una estimación. Para ello contaremos con: La malla estadística de población, la demanda residencial por municipio, el número de habitantes en cada municipio y la extensión de cada municipio.

La estimación de la demanda sigue el siguiente esquema de la Figura 28.

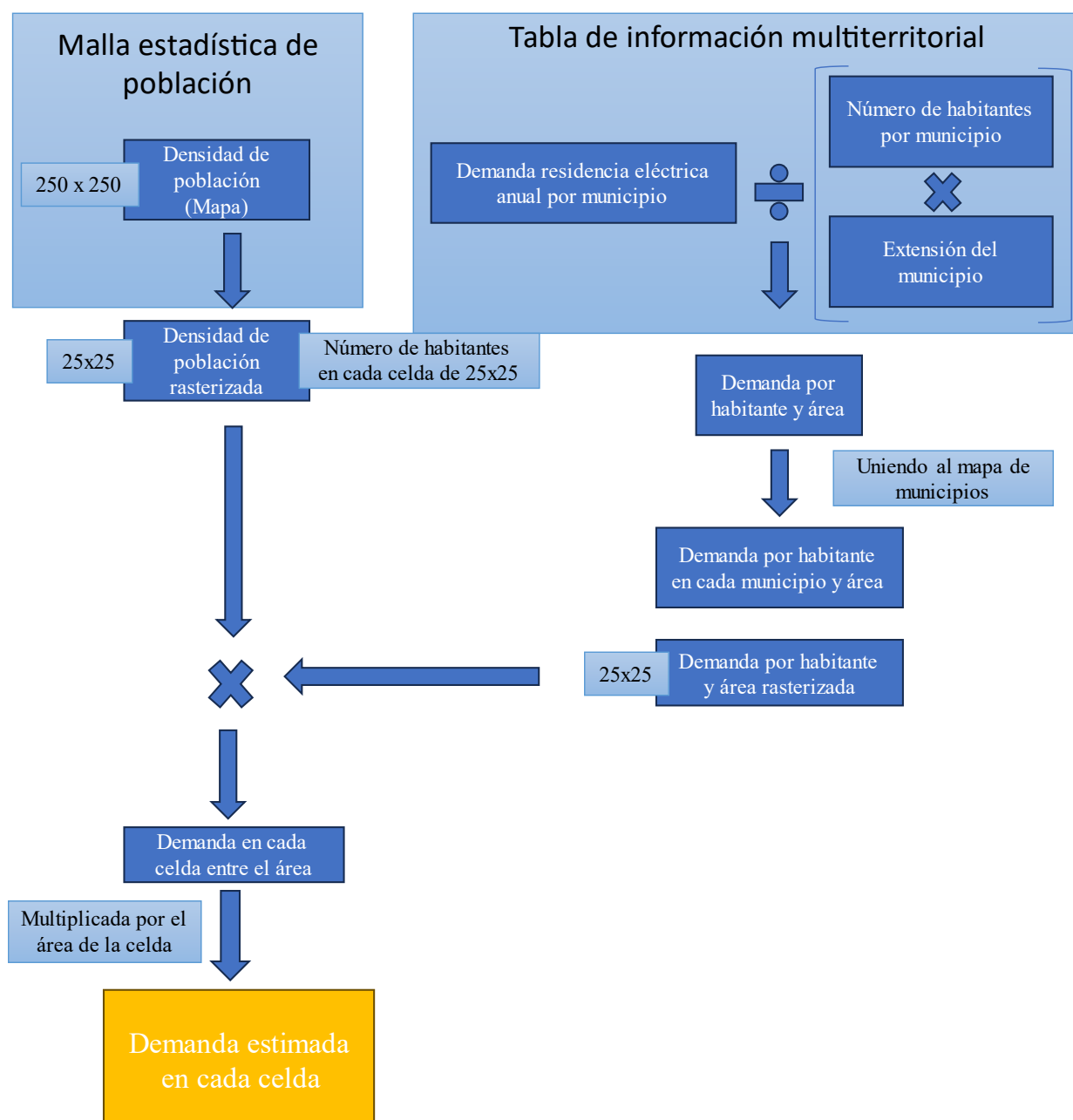


Figura 28 - Pasos para obtener la demanda estimada en cada celda

La demanda la hemos obtenido de (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2022). En su sistema de información multiterritorial viene desglosada la demanda eléctrica por municipios en una tabla de datos. Esta tabla también nos proporciona el número de habitantes en cada municipio y el área del municipio, datos que usaremos más adelante.

En la tabla se reflejan dos consumos: el consumo total por municipio y el consumo residencial por municipio. Al ser nuestra estimación a través de la densidad de población hemos escogido la demanda residencial. Como la demanda total está influenciada mayormente por la industria, no está correlacionada con la densidad de población.

La densidad de población la podemos encontrar en mallas de 250 x 250 m en (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2021) (Figura 29). No es posible encontrar un dato más desagregado debido al secreto estadístico el cual obliga a difundir la información estadística de forma que no se pueda identificar a quien corresponde el dato en particular.

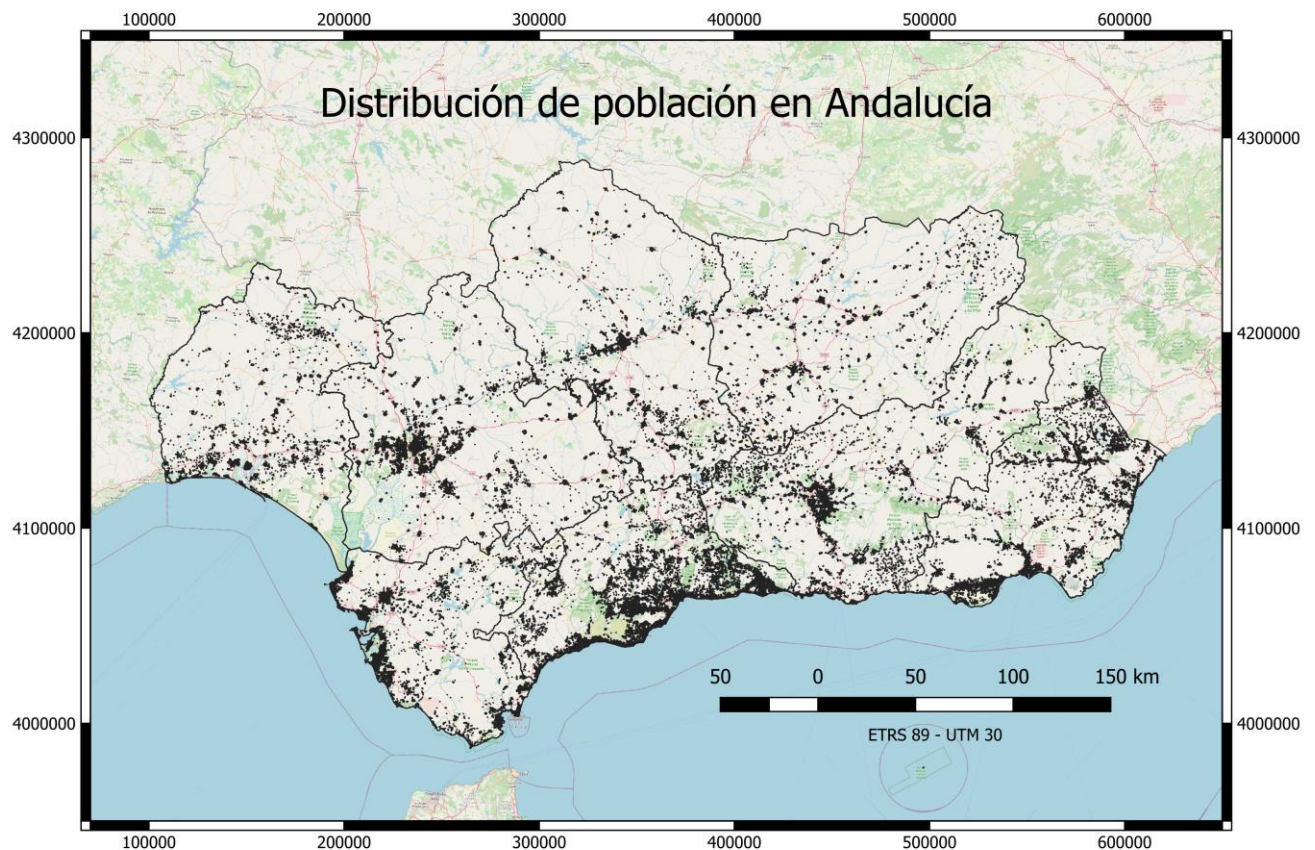


Figura 29 - Distribución de población en Andalucía

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Con estos dos datos y con el objetivo de poder valorar cada celda de 25x25, con la tabla de información por municipio, hemos seguido el siguiente procedimiento, donde primero calculamos:

$$Demanda/extensionHab = \frac{Demanda\ municipal\ residencial\ (MWh)}{Extensión\ del\ municipio\ (km^2) \times número\ de\ habitantes}$$

Este nuevo dato lo uniremos a la tabla de datos descargada del (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2022). Se añadirá generando una nueva columna.

Una vez creada la columna uniremos la tabla de datos al mapa de municipios obtenido de (Instituto Estadístico y Cartografía de Andalucía, 2023) usando la herramienta “Unión” y a través del código de municipio.

El mapa de municipios lo recortaremos dejando solo los pertenecientes a nuestra comarca de estudio. Hasta este momento hemos estado trabajando con mapas vectoriales, será necesario rasterizar tanto el mapa de municipios (Figura 30) como la malla de población (Figura 31), usando como plantilla el mapa de pendientes.

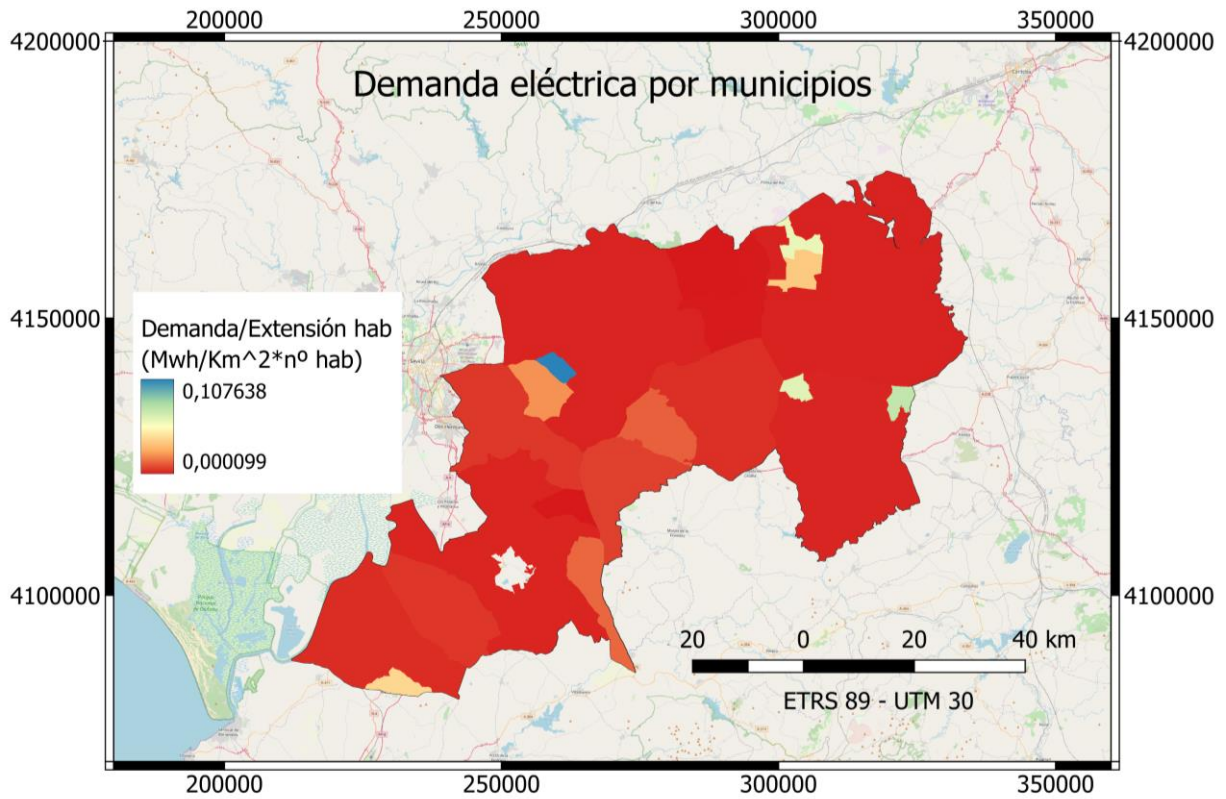


Figura 30 - Demanda eléctrica por municipio

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

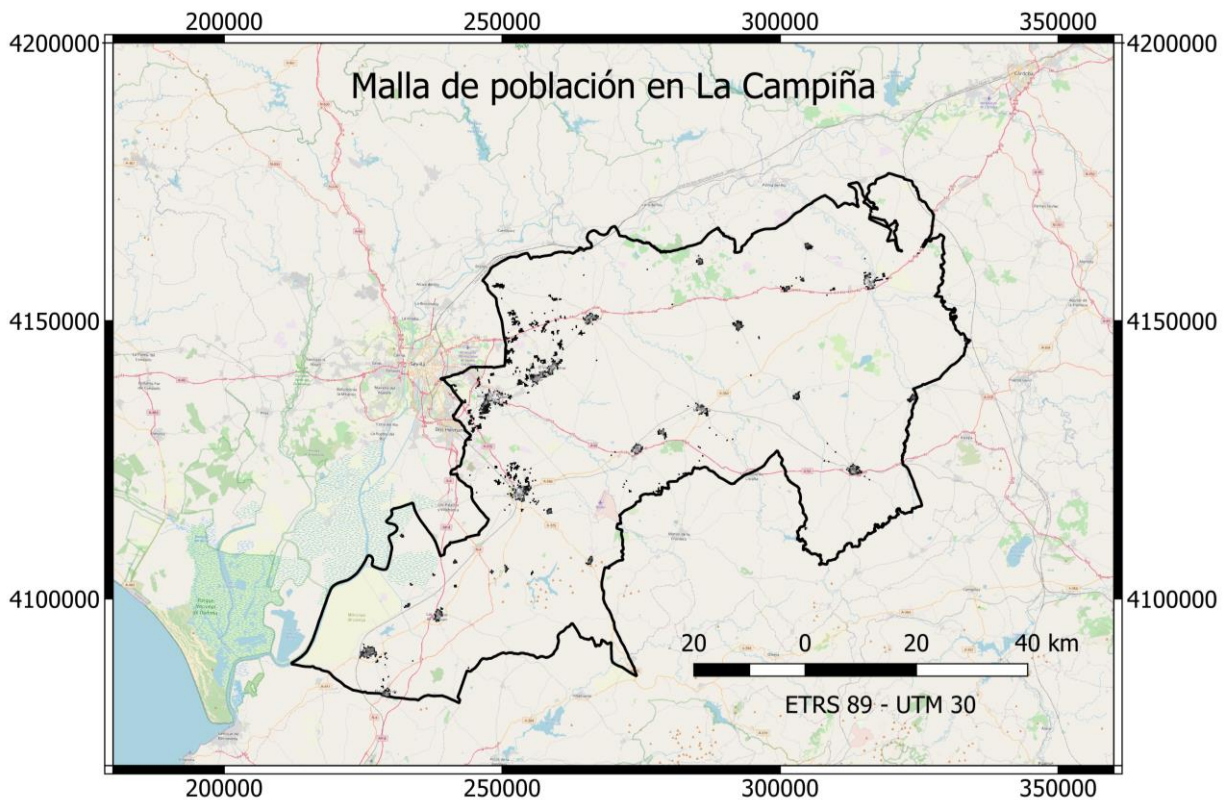


Figura 31 - Malla de población recortada a La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Se observa cómo la población se aglutina en distintos núcleos, al tratarse de una comarca con tradición de agricultura apreciamos grandes extensiones de terrenos sin población.

Una vez rasterizados los dos mapas crearemos uno nuevo realizando el siguiente cálculo, mediante la calculadora ráster:

$$Demanda\ estimada = \frac{Demanda}{ExtensiónHab} \left(\frac{MWh}{km^2 \times hab} \right) \times habitantes\ malla\ (hab) \times 0,000625\ (km^2)$$

Multiplicamos el valor obtenido anteriormente “Demanda/ExtensiónHab” por el número de habitantes en cada celda y su área (25x25 metros), dando como resultado el consumo para cada celda en MWh anuales. Multiplicaremos por 1000 para poder obtener kWh anuales, de esta forma será más fácil de operar con los resultados obtenidos.

El resultado de demanda estimada tendrá un valor en cada celda de nuestro mapa ráster, en kWh anuales.

Nuestra área de estudio no se corresponde en términos de demanda con el área de (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021), además, nuestra demanda se encuentra en términos de celdas de 625 m² y la usada en el artículo en km². No podremos usar su tabla de puntuación, crearemos la nuestra propia.

El valor máximo obtenido es 58,64 kWh anuales por celda, se ha decidido puntuar las celdas dividiendo esa máxima puntuación entre 7. De esta forma crearemos ocho intervalos de puntuación entre el 0 y 58,64. Es el mismo procedimiento seguido por (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021) pero con distintos datos.

Demanda estimada (kWh anuales por celda)	Puntuación
0-7,33	1
7,33-14,66	2
14,66-21,99	3
21,99-29,32	4
29,32-36,65	5
36,65-43,98	6
43,98-51,31	7
51,31-58,64	8

Tabla 11 - Puntuación para la demanda eléctrica

Una vez reclasificado y puntuado el mapa según la Tabla 11 obtenemos el siguiente resultado (Figura 32)

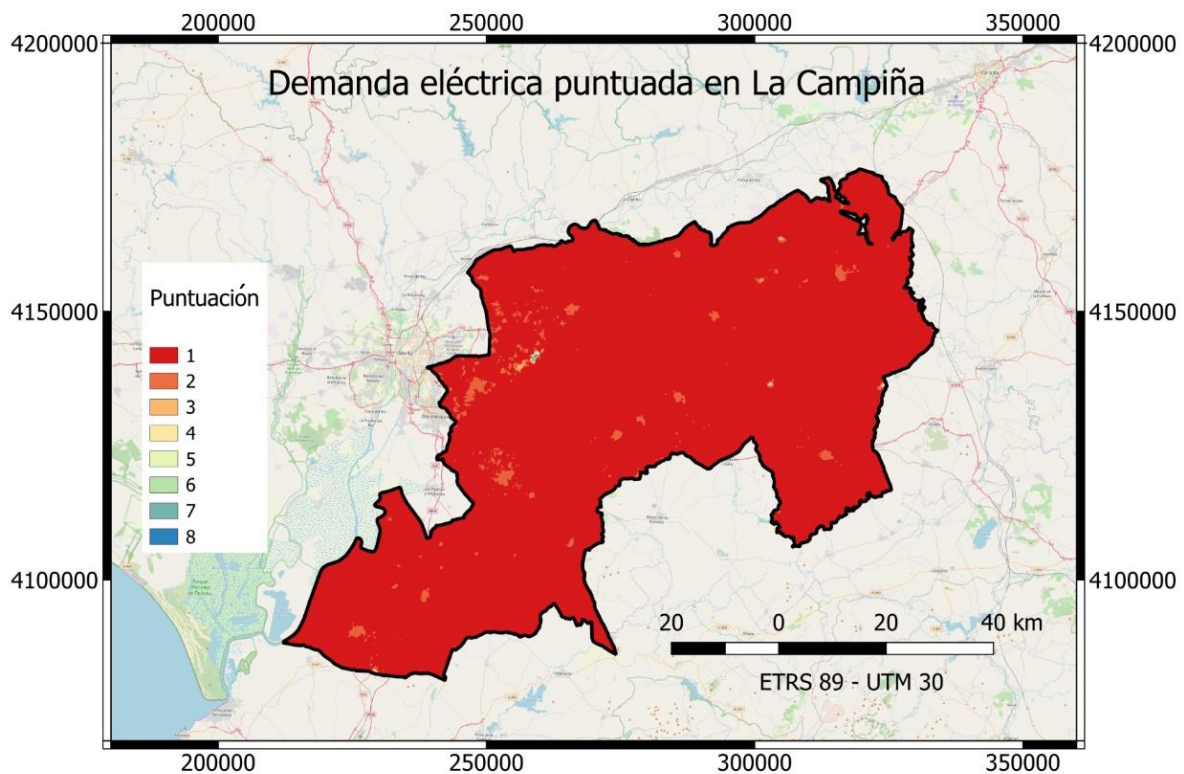


Figura 32 - Demanda eléctrica puntuada en La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Se observa una demanda superior en los términos municipal de Mairena del Alcor y el Viso del Alcor. El mapa se encuentra coloreado en su mayoría de rojo debido a que en las celdas en las cuales no hay población su demanda es considerada como 0.

9.2.3 Distancia a carreteras principales

Los datos de la red de carretera han sido obtenidos de (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2021), se encuentran clasificadas por jerarquía (Figura 33).

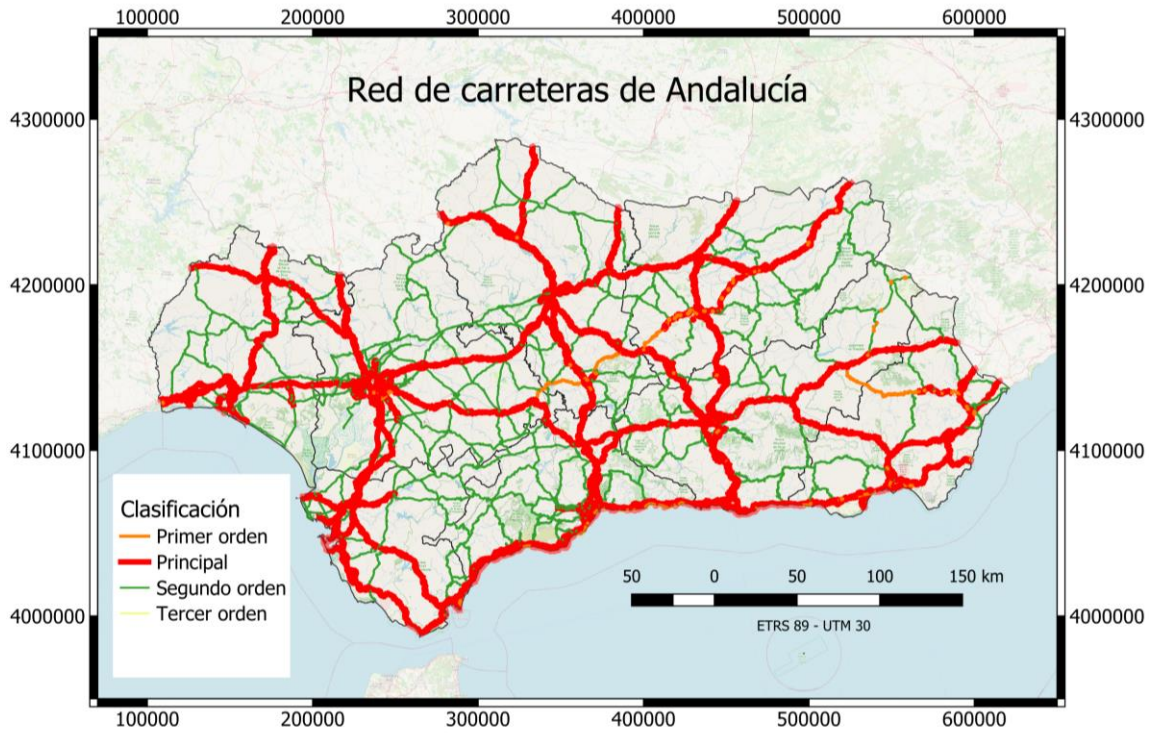


Figura 33 - Mapa de carreteras de Andalucía

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

A partir de esta clasificación hemos realizado un filtro quedándonos únicamente con las principales, primer orden y segundo orden (Figura 34).

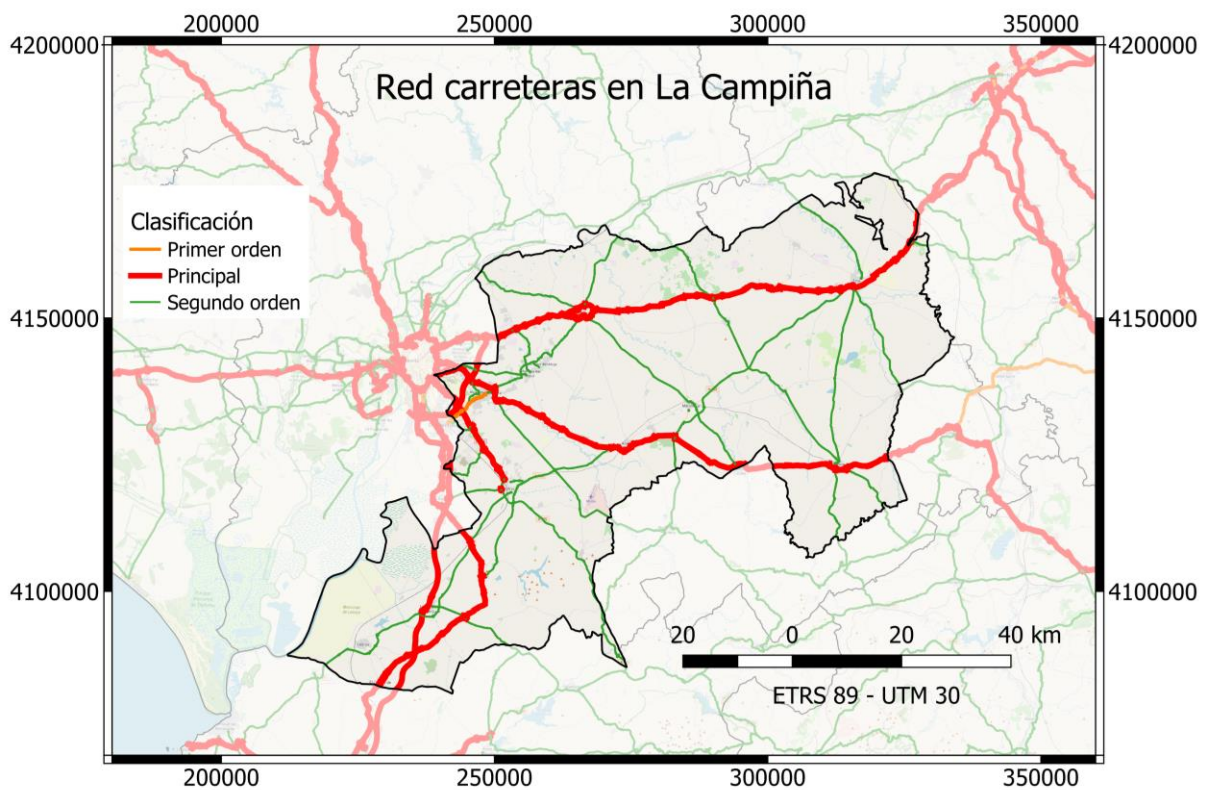


Figura 34 - Mapa de carreteras en La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Una vez realizado el filtro puntuaremos las distintas áreas de influencias, *buffers*, en función de la distancia a la carretera más cercana. Usaremos para ello la Tabla 12.

Se usará un *buffer* de seguridad de 20 metros evitando una puntuación positiva justo encima de una carretera, emplazamiento no valido para nuestra subestación.

Distancia (km)	0-0,3	0,3-0,9	0,9-1,6	1,6-2,1	2,1-3,5	3,5-4	4-6	>6
Puntuación	8	7	6	5	4	3	2	1

Tabla 12 - Puntuación respecto a la distancia de las carreteras principales

Fuente: (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021)

Este mapa se encuentra en formato vectorial, para realizar los cálculos finales será necesario rasterizarlo usando el mapa de pendientes como plantilla. Usaremos la herramienta “Rasterizar” con tamaño de celda de 25x25 metros y como extensión de salida la capa de pendiente.

Repetiremos este proceso en todas las capas vectoriales del trabajo para que las celdas al rasterizarlas sean coincidentes.

Una vez recortado, rasterizado y puntuado obtendríamos el siguiente mapa (Figura 35 y Figura 36)

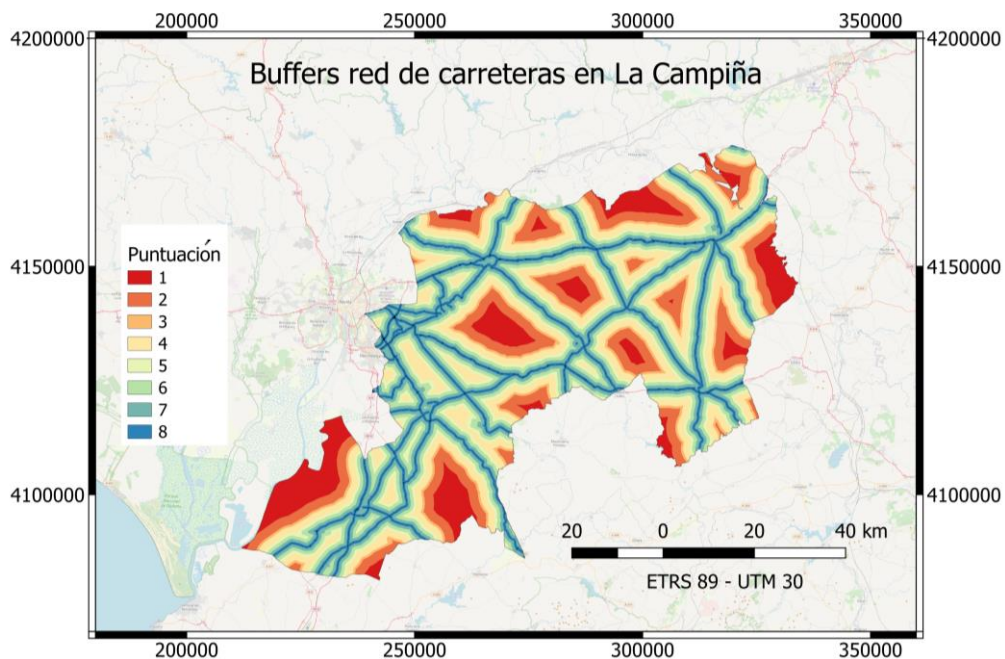


Figura 35 - *Buffers* respecto a las carreteras en La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

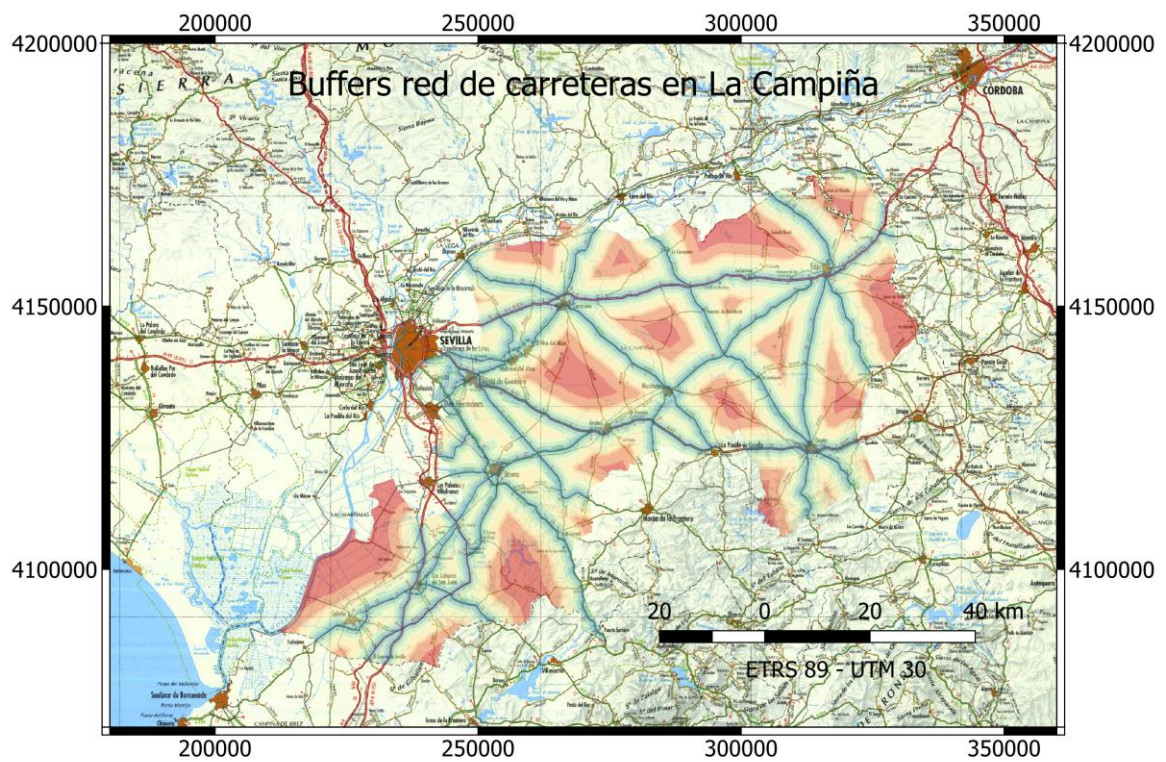


Figura 36 - *Buffers* de carreteras en La Campiña respecto a un mapa topográfico

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023)

Se aprecia una comunicación muy buena entre los municipios de Osuna, Lebrija, Utrera, Arahal, Marchena, Carmona y Écija.

9.2.4 Distancia a la red eléctrica

La red eléctrica andaluza ha sido descargada a través de (ideAndalucia, 2023), se encuentra clasificada en función de su tensión en kV (Figura 37).

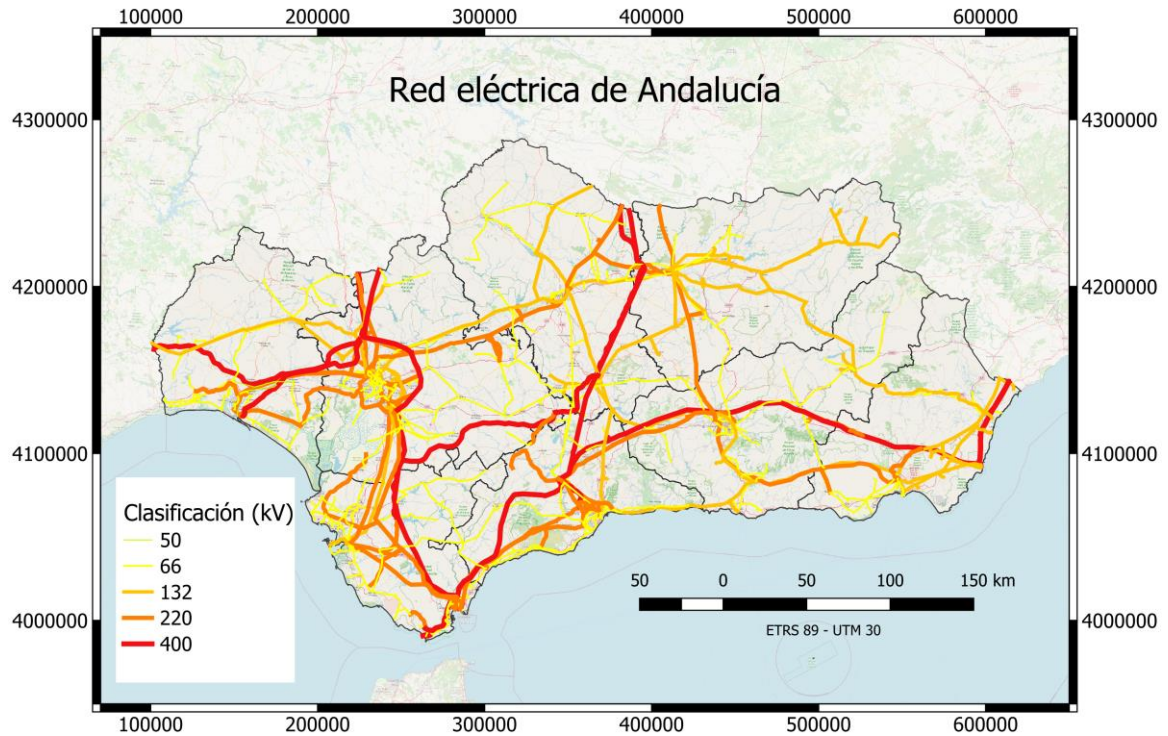


Figura 37 - Mapa red eléctrica en Andalucía

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Una vez cargado en QGIS la hemos recortado a la forma de la región seleccionada y hemos filtrado por líneas de alta tensión, quedándonos únicamente con las de 132, 200 y 400 kV (Figura 38).

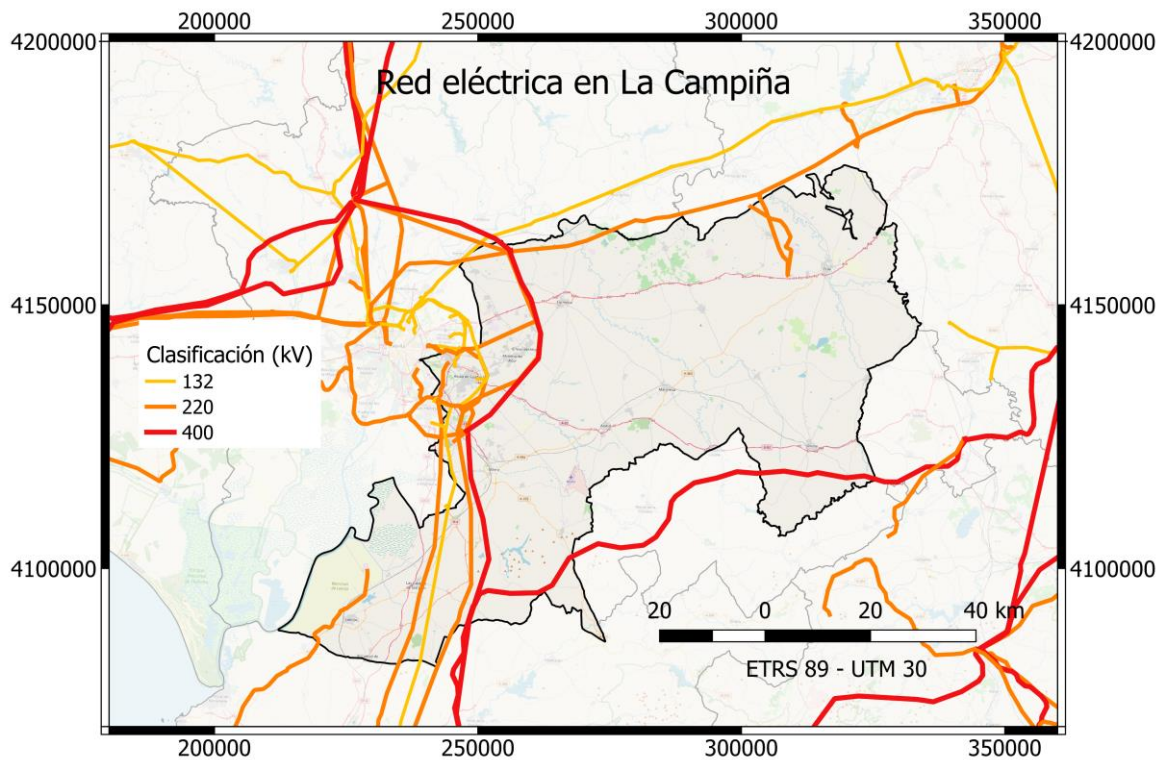


Figura 38 - Mapa red eléctrica en La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Una vez realizado el filtro hemos creado los *buffers* para puntuar las áreas en función de la distancia a cada línea, usando la puntuación mostrada en la Tabla 13.

Se usará un *buffer* de 20 metros de seguridad para garantizar que la subestación no se sitúa justo debajo de un tendido eléctrico.

Distancia (km)	0-4,4	4,4-7,8	7,8-11	11-13,8	13,8-17,25	17,25-20,7	20,7-24	>24
Puntuación	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabla 13 - Puntuación en función de la distancia a la red eléctrica

Fuente: (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021)

Recortado a tamaño de la comarca, puntuado y rasterizado el mapa resultante sería el mostrado en la Figura 39 y en la Figura 40. La línea negra contenida en la franja azul representa el *buffer* de seguridad de 20 metros.

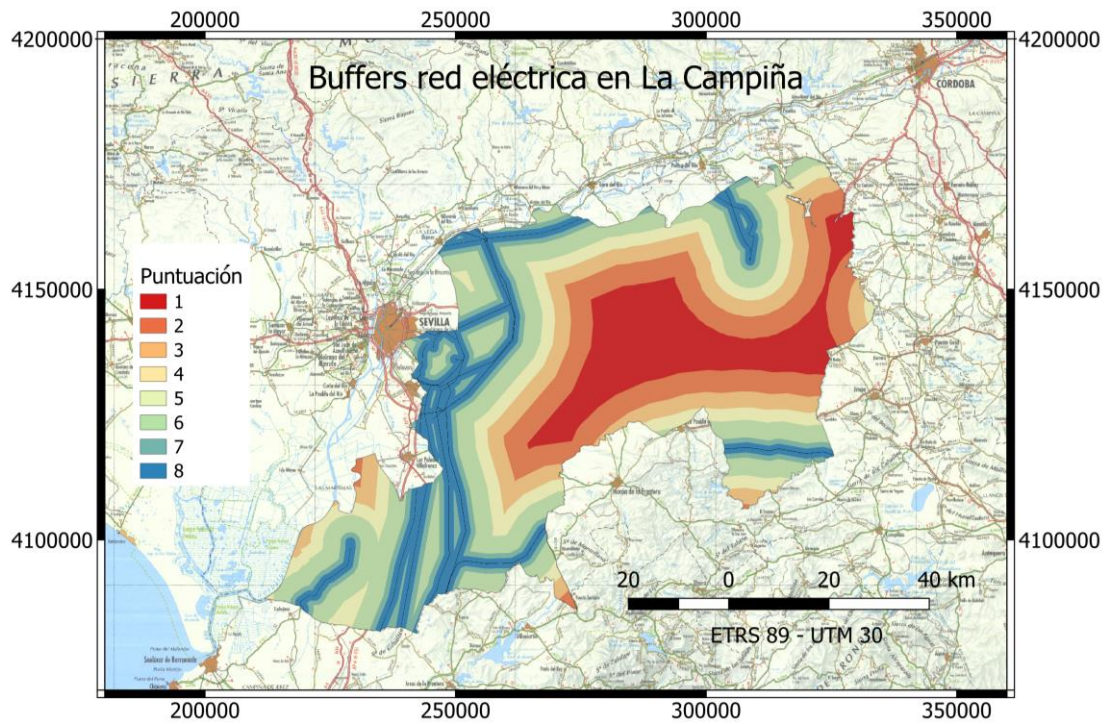


Figura 39 - Buffers respecto a líneas eléctricas de alta tensión en La Campiña
Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

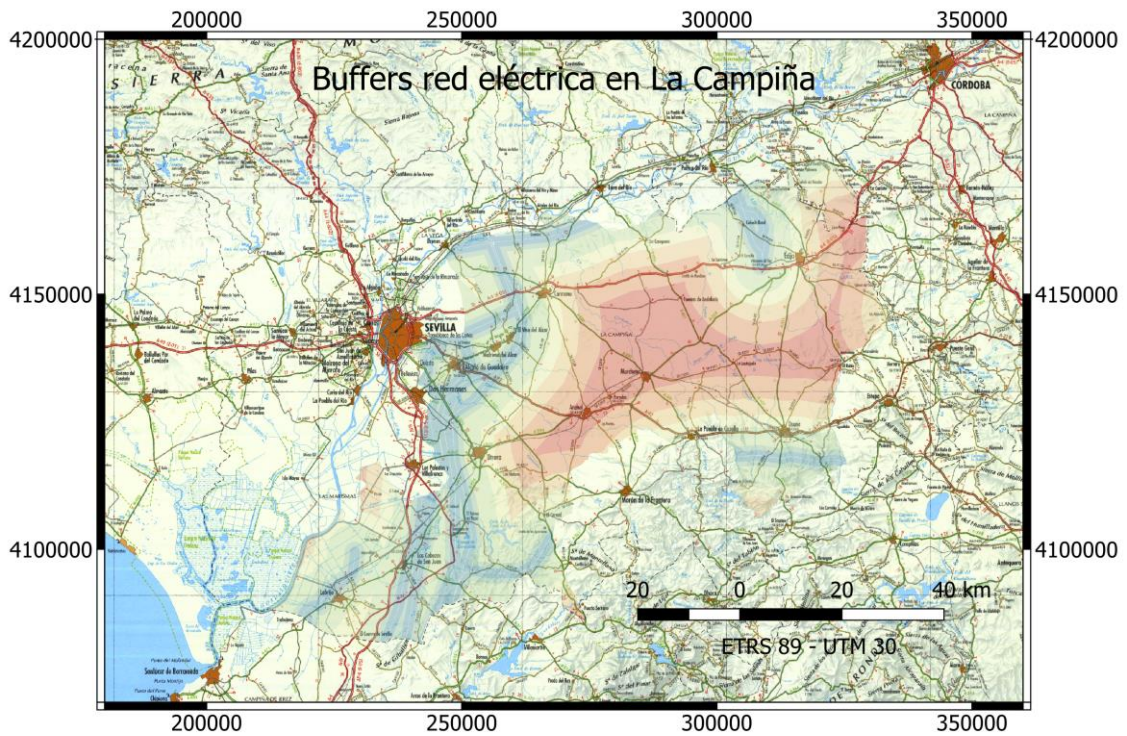


Figura 40 - Buffers de líneas eléctricas en La Campiña respecto a un mapa topográfico de la zona
Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Se distingue una zona con mala comunicación alrededor de Marchena y Arahál, contrastando con una muy buena comunicación en los municipios periféricos a Sevilla, también vemos una franja azul partiendo de Sevilla a Cádiz.

9.2.5 Distancia a subestaciones ya existentes

Los datos de las subestaciones existentes han sido descargados de (ideAndalucia, 2023), las distintas subestaciones son representadas de manera puntual en el mapa (Figura 41 y Figura 42).

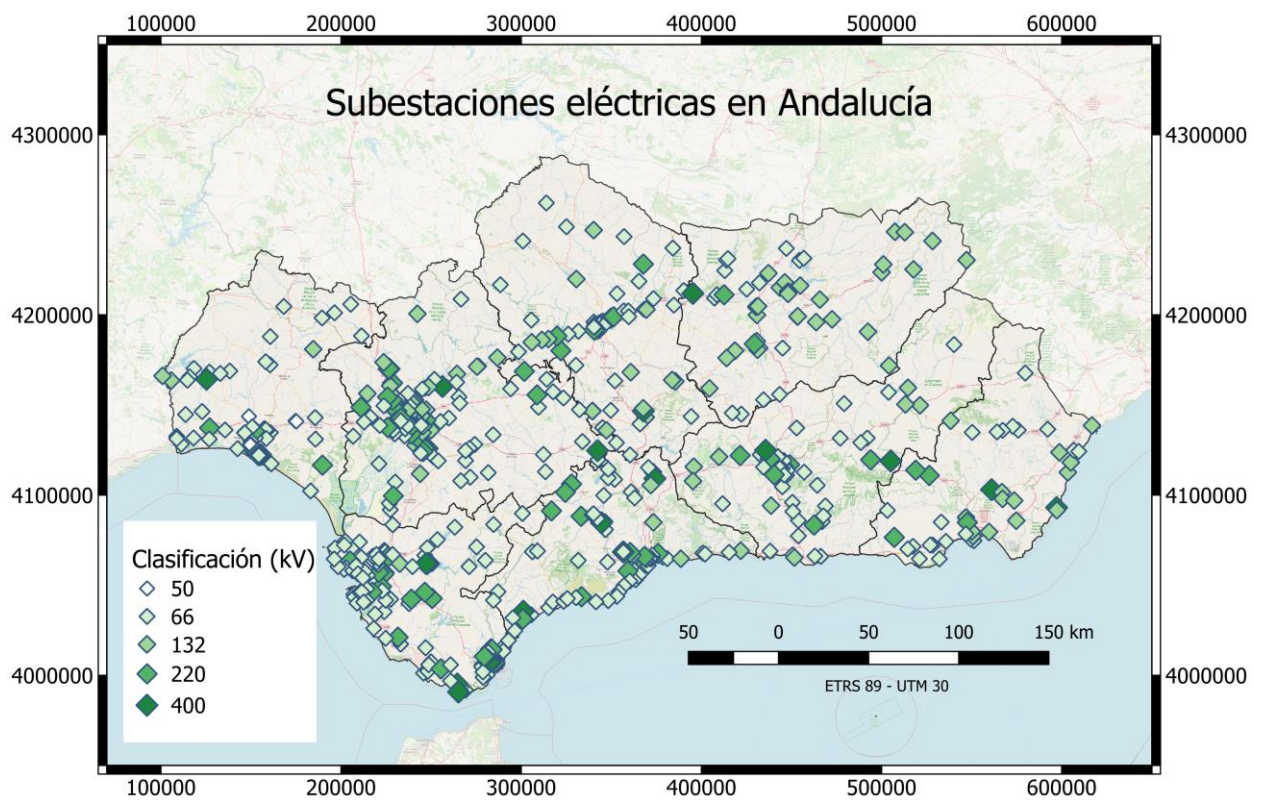


Figura 41 – Mapa de subestaciones en Andalucía

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

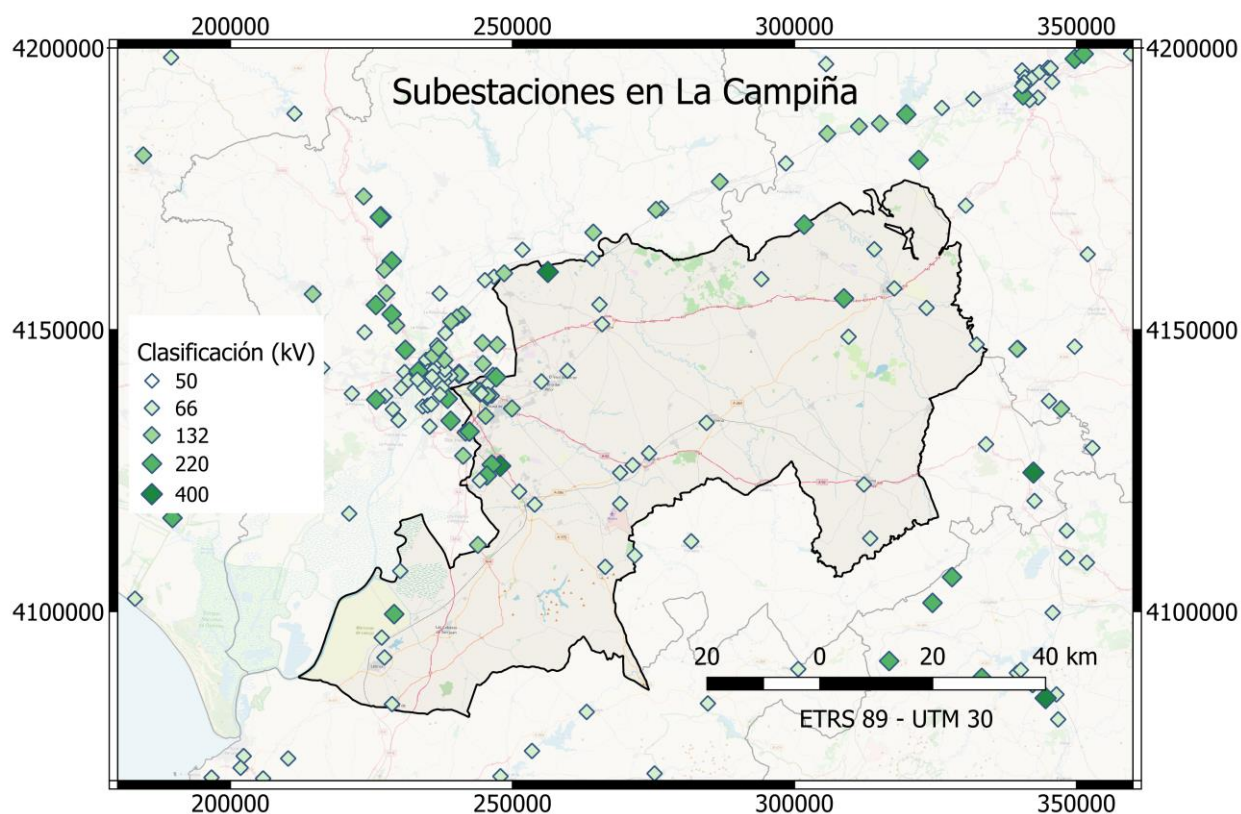


Figura 42 – Subestaciones eléctricas en La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Al usar la puntuación propuesta por (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021) en la Tabla 14, como su región es más amplia y con un menor número de subestaciones llegamos a la conclusión de que no es una escala apropiada. Al llegar a la puntuación 3 ya cubre toda el área del mapa (Figura 43).

Distancia (km)	0-8,8	8,8-15,6	15,6-22	22-27,6	27,6-34,5	34,5-41,4	41,4-48	>48
Puntuación	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabla 14 – Puntuación en función de la distancia a una subestación

Fuente: (Zambrano-Asanza, Chumbi, & Franco, 2021)

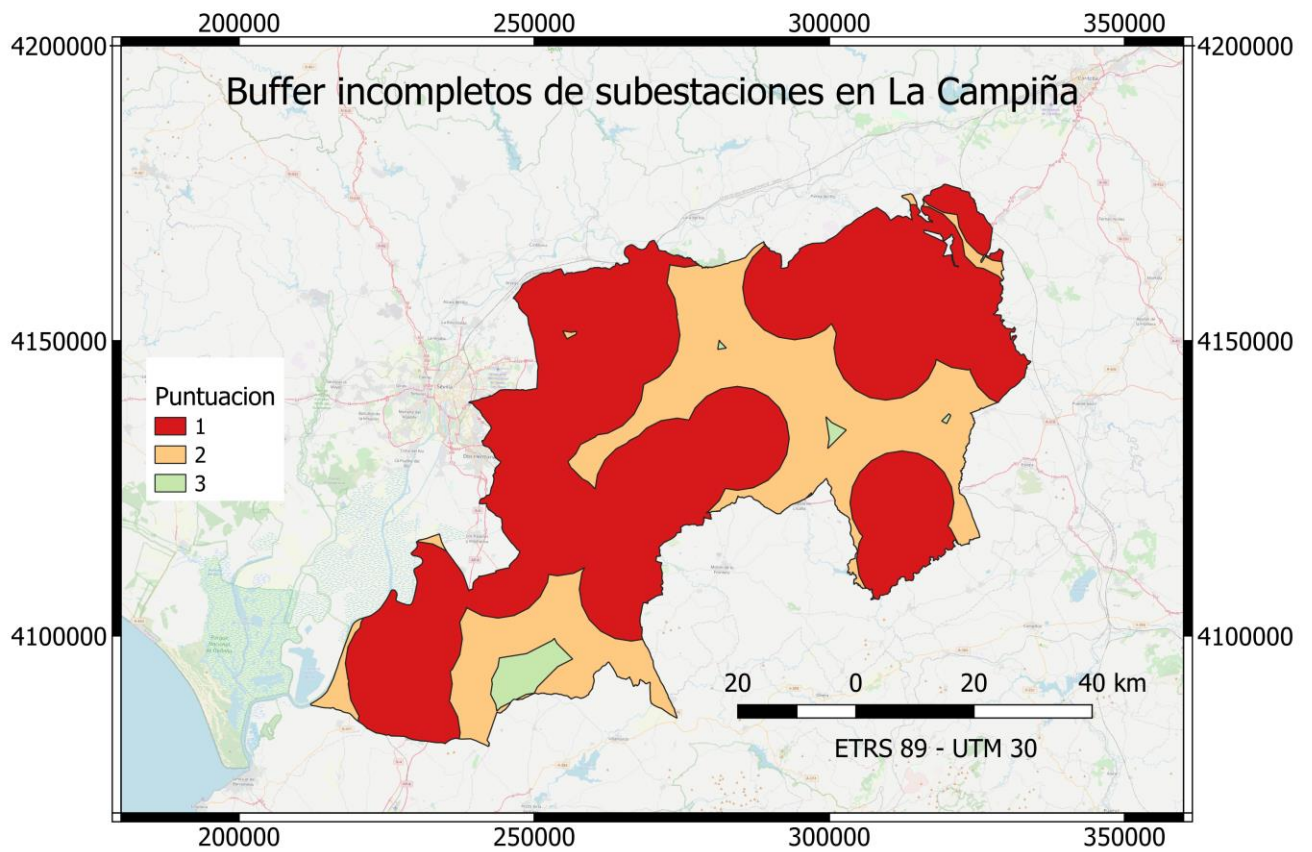


Figura 43 – *Buffers* incompletos de subestaciones en La Campiña
 Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Hemos aplicado una reducción de escala, dividiendo todas las distancias a la mitad obteniendo la Tabla 15 de puntuación. Al aplicarla en la Figura 44 se puede observar cómo se puntúa nuestra región usando todo el intervalo de la nueva escala.

Distancia (km)	0-4,4	4,4-7,8	7,8-11	11-13,8	13,8-17,25	17,25-20,7	20,7-24	> 24
Puntuación	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabla 15 – Puntuación tras reducir la distancia a la mitad

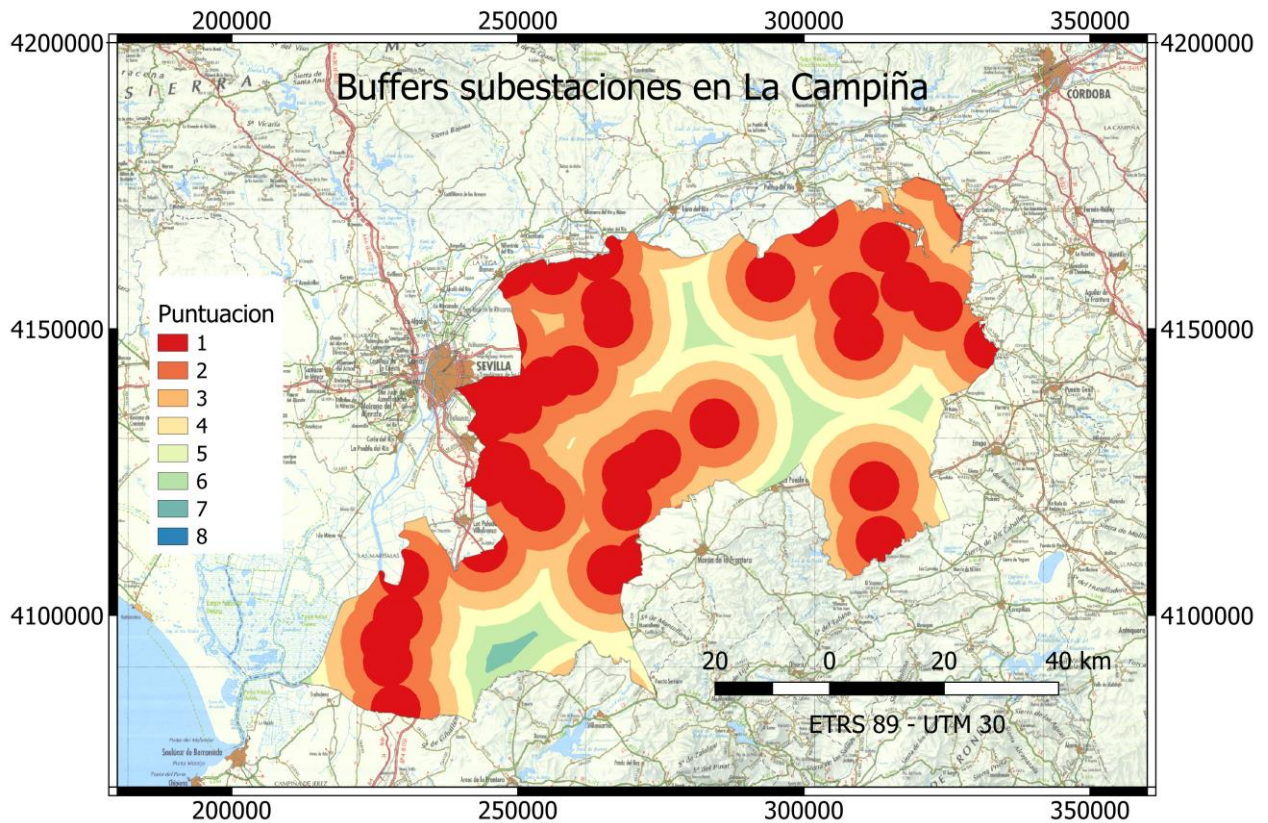


Figura 44 - *Buffers* de subestaciones en La Campiña nuevo criterio
Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

9.2.6 Expropiación de terrenos

Con este criterio pretendemos “agilizar la construcción de nuestra subestación a nivel burocrático”. Para ello hemos descargado la capa de usos de suelo en Andalucía del (ideAndalucia, 2023) y hemos filtrado seleccionando únicamente los industriales (Figura 45 y Figura 46).

La clasificación industrial de un suelo facilitará los permisos necesarios para llevar a cabo nuestro proyecto. Este criterio es puntuable, no excluyente, aunque se encuentre puntuado de 0 a 1.

Los suelos industriales contarán con una puntuación de 1 para este criterio, la máxima posible. El resto de los suelos serán puntuados 0 no obteniendo valoración para este criterio, pero siguen obteniendo del resto.

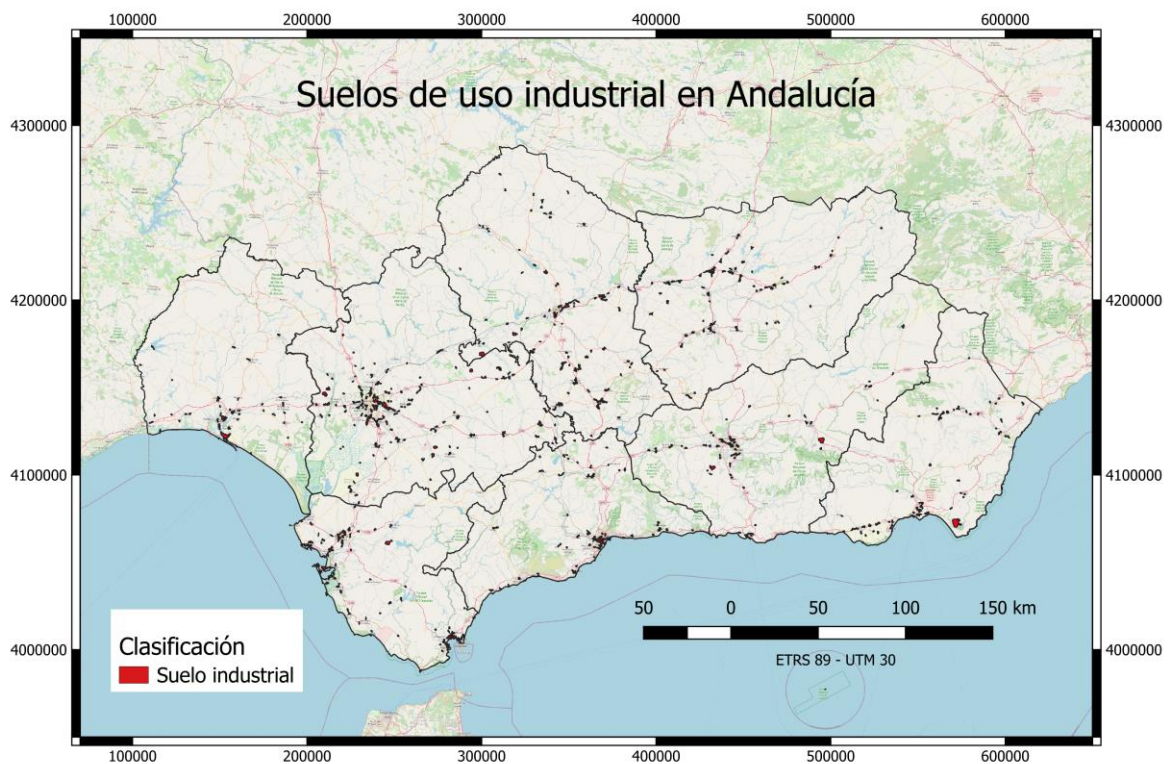


Figura 45 - Suelos industriales en Andalucía

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

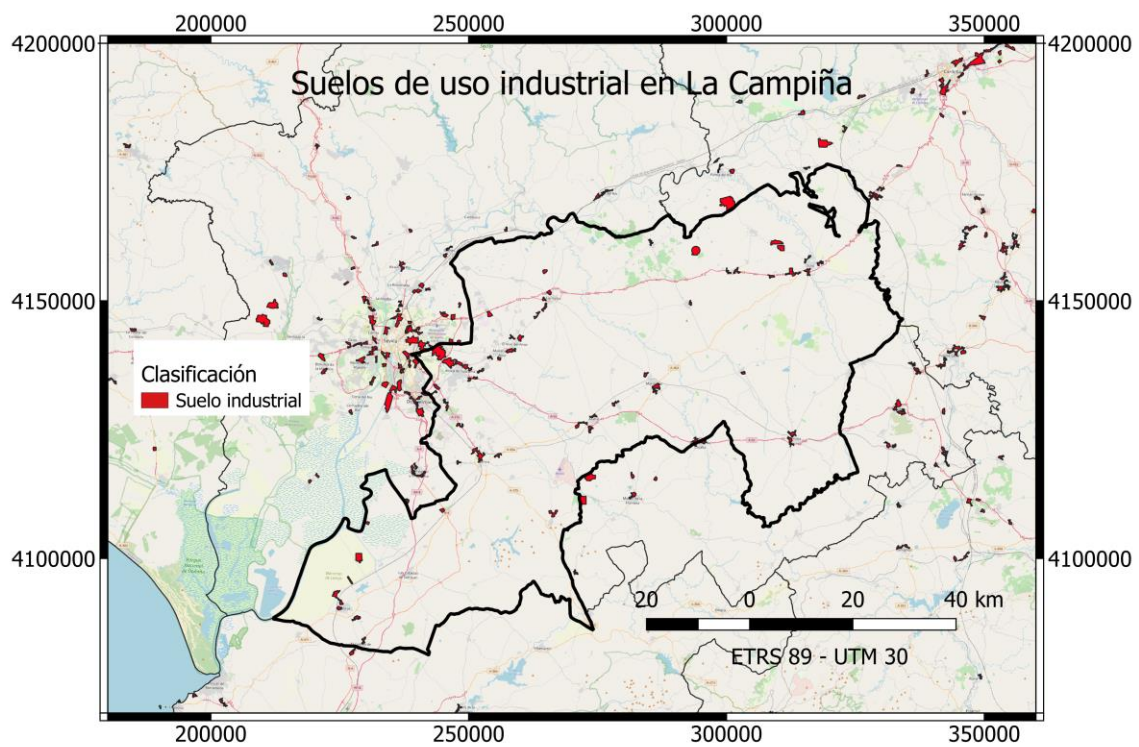


Figura 46 - Suelos industriales en La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

9.3 Función objetivo

Una vez aplicado los criterios puntuables en nuestra región de estudio, contaremos con distintas capas cada una con sus criterios puntuados y todas recortadas a la región de La Campiña. Buscaremos superponer todas las capas para evaluar soluciones teniendo en cuenta todos los criterios y su importancia relativa (Tabla 16). Buscando maximizar nuestra función objetivo.

IMPORTANCIA RELATIVA		
1	Densidad de consumo eléctrico local	38%
2	Pendiente	11%
3	Distancia a carreteras principales	12%
4	Distancia a la red eléctrica	23%
5	Distancia a subestación ya existente	4%
6	Expropiación de terrenos	12%
TOTAL		100%

Tabla 16 - Tabla de importancia relativa para los criterios

En cada celda deberemos de realizar la siguiente multiplicación:

$$\begin{aligned}
 Puntuacion = & Expropiación \times 12 + \frac{Distancia\ a\ subestación}{8} \times 4 + \frac{Distancia\ a\ red\ eléctrica}{8} \times 23 \\
 & + \frac{Distancia\ a\ carretera}{8} \times 12 + \frac{Pendiente}{8} \times 11 + \frac{Densidad\ consumo}{8} \times 38
 \end{aligned}$$

Nuestras celdas objetivo serán las de mayor valor de puntuación obtenida. En caso de cumplirse todos los criterios con su puntuación mayor se obtendría el valor de 100.

Para realizar este proceso en QGIS nos ayudaremos de la calculadora ráster. En un archivo cargaremos todas las capas con los distintos criterios, realizaremos la suma ponderada de todos los criterios, se obtendrá como resultado una capa nueva a la cual llamaremos “Puntuación”, resultando de la siguiente forma (Figura 47).

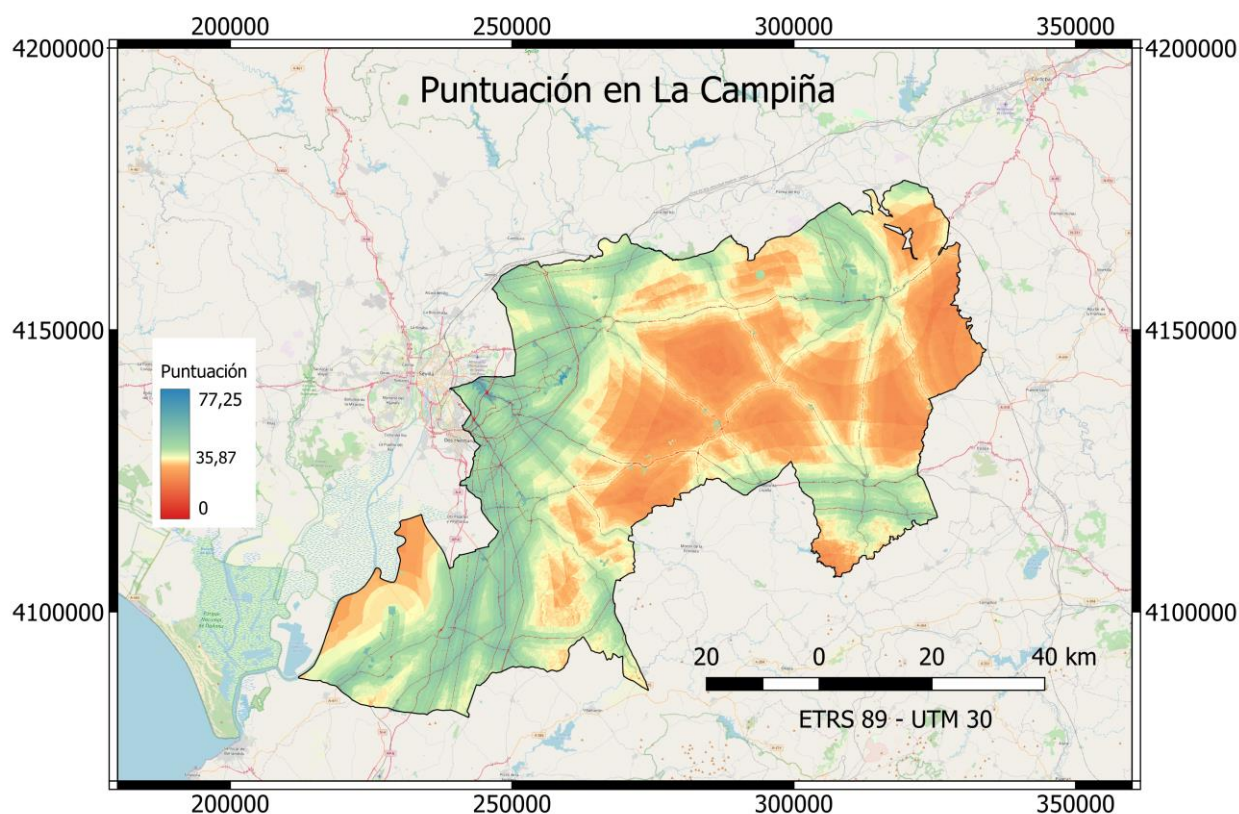


Figura 47 - Mapa de puntuación para La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Se observa una puntuación máxima de 77,25 sobre 100, para poder evaluar correctamente la comarca debemos aplicar los criterios excluyentes. Son aquellos que multiplican por 0 o 1 nuestra solución final.

9.3.1 Temperatura

Hemos descargado de (ideAndalucia, 2023) la capa de temperaturas medias anuales registradas en Andalucía entre 1971 y el año 2000 en formato vectorial. La temperatura es un criterio excluyente, si la media anual es superior a 20 grados o inferior a -25 no será un emplazamiento válido para nuestra subestación.

El mapa de temperatura para Andalucía una vez clasificado y coloreado tendría el siguiente aspecto (Figura 48).

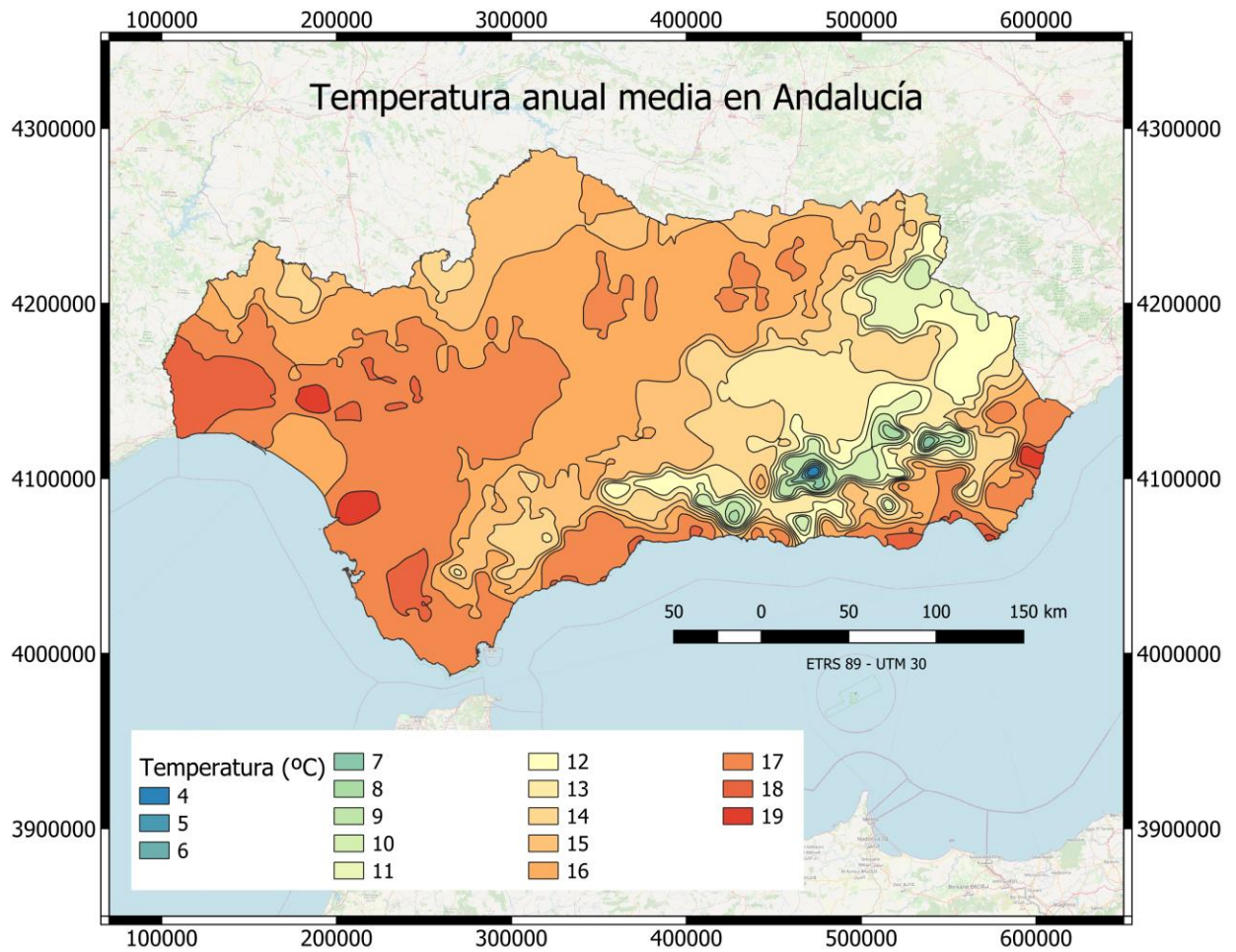


Figura 48 - Mapa de temperatura media anual para Andalucía
 Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Ampliando la zona de La Campiña (Figura 49) se aprecia cómo todos los puntos se encuentran entre 16 y 19 grados de media, toda nuestra comarca es apta para el emplazamiento de nuestra subestación según la temperatura.

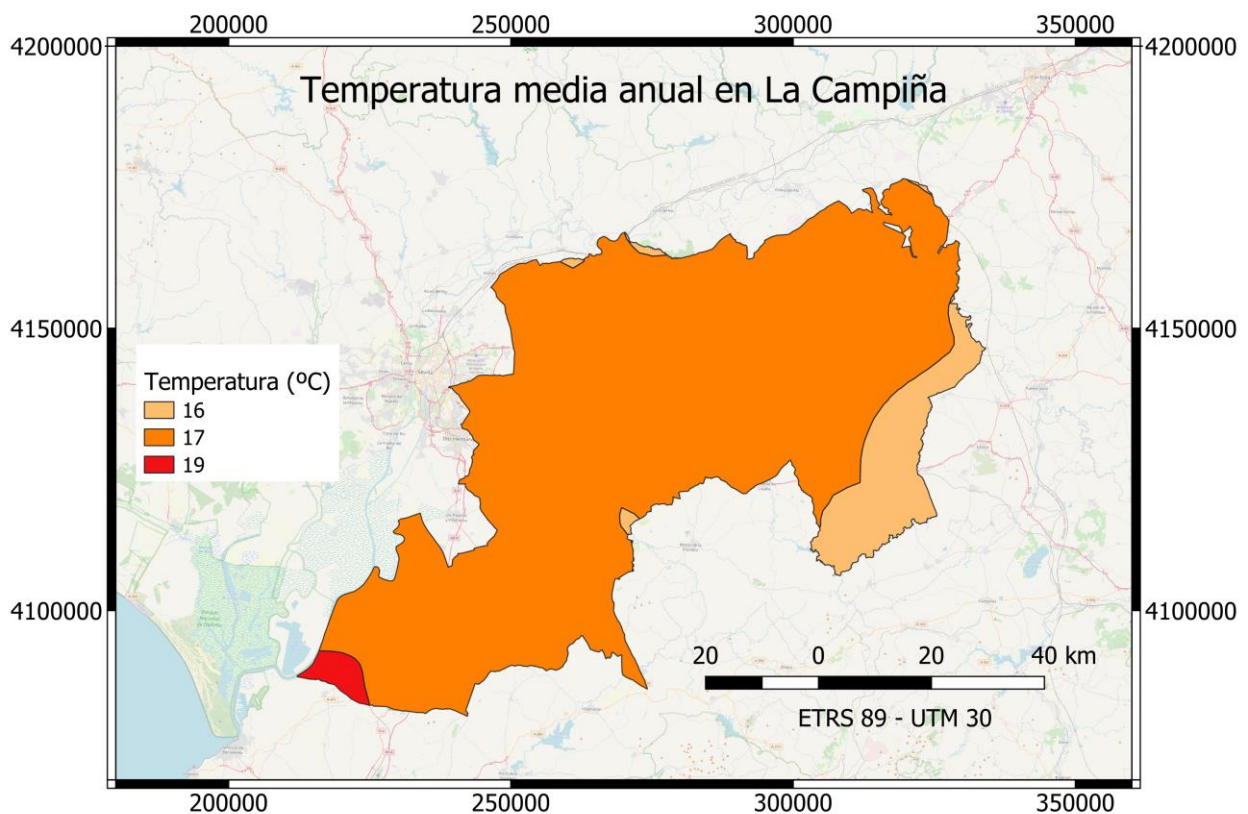


Figura 49 - Mapa de temperatura media anual para La Campiña
Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

9.3.2 Espacios protegidos

Con el objetivo de evitar la construcción de la subestación sobre un espacio protegido se ha decidido penalizar todas las áreas protegidas de nuestra comarca, eliminándolas de posibles ubicaciones para el emplazamiento. A través de (ideAndalucía, 2023) se han descargado una serie de capas que contienen espacios protegidos, las cuales son:

- **Enp_FiguraProteccion:** contiene información de los Espacios Naturales Protegidos de Andalucía con figura de protección establecida en la normativa estatal o autonómica (Parques Nacionales, Parques Naturales, Parajes Naturales, Parques Periurbanos, Monumentos Naturales, Reservas Naturales, Reservas Naturales Concertadas y Paisajes Protegidos). Este conjunto de datos procede del catálogo de información espacial de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).
- **Enp_RegimenProteccion.** contiene información de los Espacios Naturales Protegidos de Andalucía en régimen de protección (Zonas de Protección de las Reservas Naturales, de los Monumentos Naturales y de los Parques Nacionales de Doñana y Sierra de las Nieves). Este conjunto de datos procede del catálogo de información espacial de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).
- **ReservaBiosfera.** contiene las Reservas de la Biosfera de Andalucía, incluye la Intercontinental del Mediterráneo (Andalucía /España/ Marruecos). Procede de la capa de reservas existentes en España. Se seleccionan por su interés científico, basándose en una serie de criterios que determinan si un espacio se incluye en el Programa. Este conjunto de datos procede del catálogo de información espacial de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).

- **EspecialProteccion.** contiene información acerca de la localización y la tipología de los espacios del Plan Especial Protección del Medio Físico, existentes en Andalucía. Estos planes tienen como objetivo establecer las medidas necesarias en el orden urbanístico para asegurar la protección de los valores medioambientales de cada provincia. Todos aquellos espacios que estén acogidos a este tipo de planes tienen que ser respetados con todas las garantías en los planes y normas urbanísticas locales de cada provincia. Los datos proceden de la Dirección General de Desarrollo Territorial de la antigua Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.
- **BienesProtegidos_pol.** contiene información acerca de los Bienes de Interés Cultural (BIC) y Bienes de Catalogación General (CG) declarados en Andalucía. Los datos proceden de la Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico, y se encuentran inscritos en el Catálogo General de Patrimonio Histórico Andaluz

Una vez cargadas estas capas en QGIS las hemos unido (Figura 50). Posteriormente se han recortado al tamaño de la comarca para finalmente ser rasterizadas resultando el siguiente mapa (Figura 51). En verde se encuentran las localizaciones aptas para el emplazamiento de nuestra subestación y en negro las no aptas.

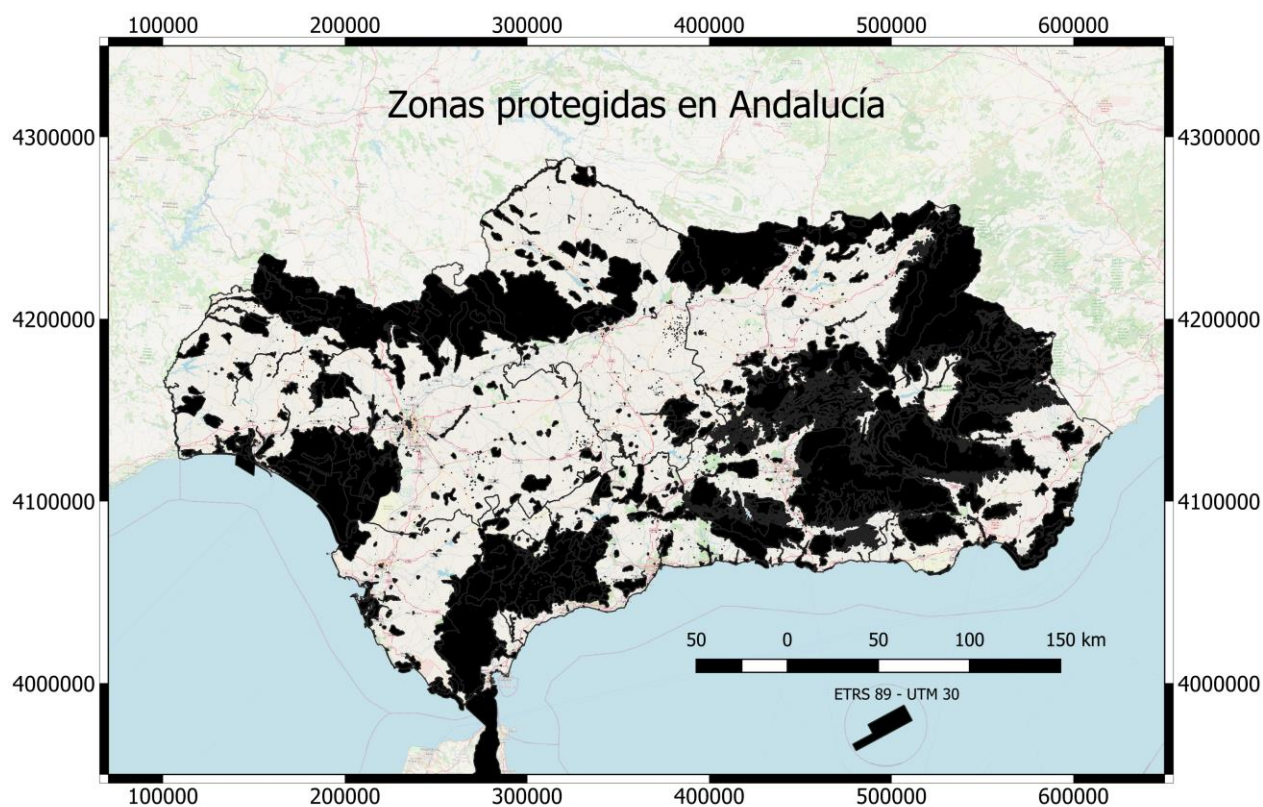


Figura 50 - Zonas protegidas en Andalucía

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

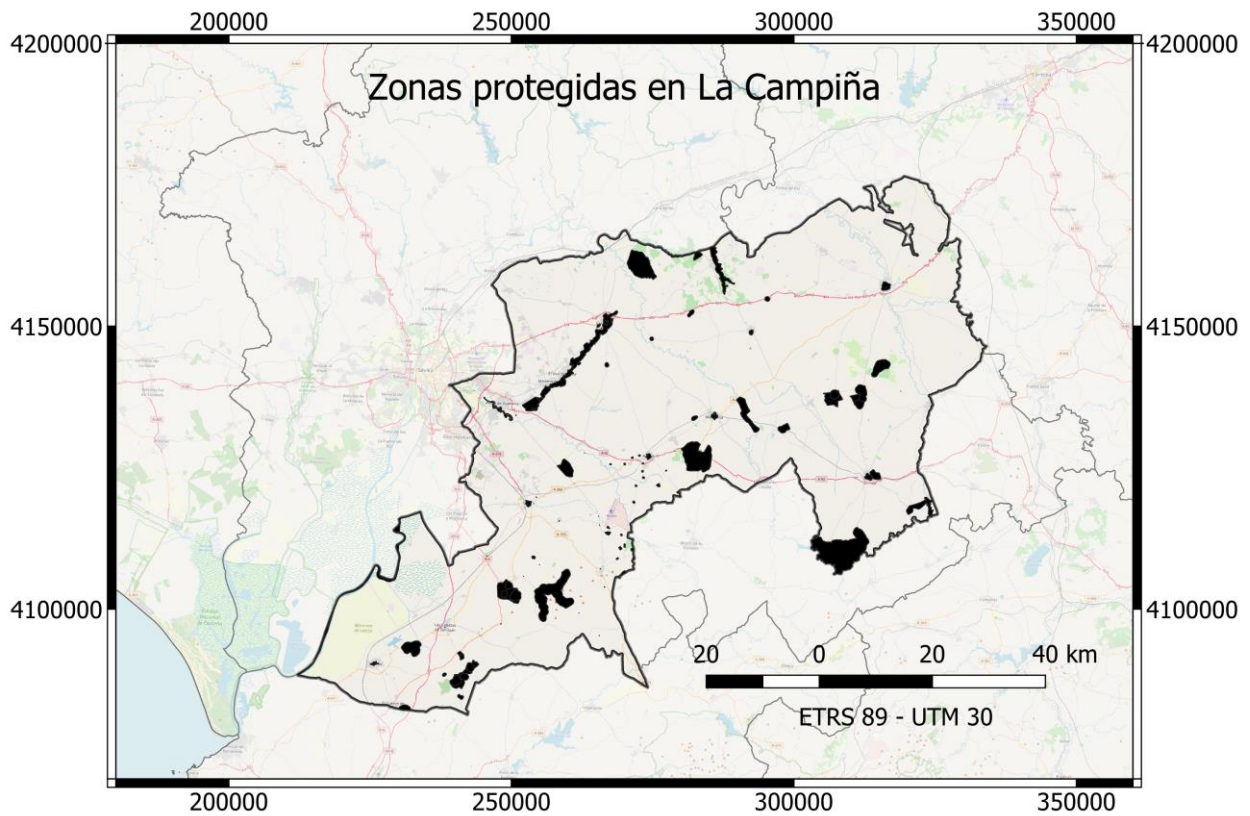


Figura 51 - Zonas protegidas en La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Las zonas en negro multiplicaran por 0 nuestra solución final, eliminándolas de posibles ubicaciones para nuestra subestación.

9.3.3 Puntuación final

Únicamente deberemos de multiplicar la capa zonas protegidas (Figura 51) por la capa de puntuación (Figura 47). Con esta multiplicación estaremos eliminando las zonas protegidas como posibles soluciones, el resultado queda reflejado en la Figura 52.

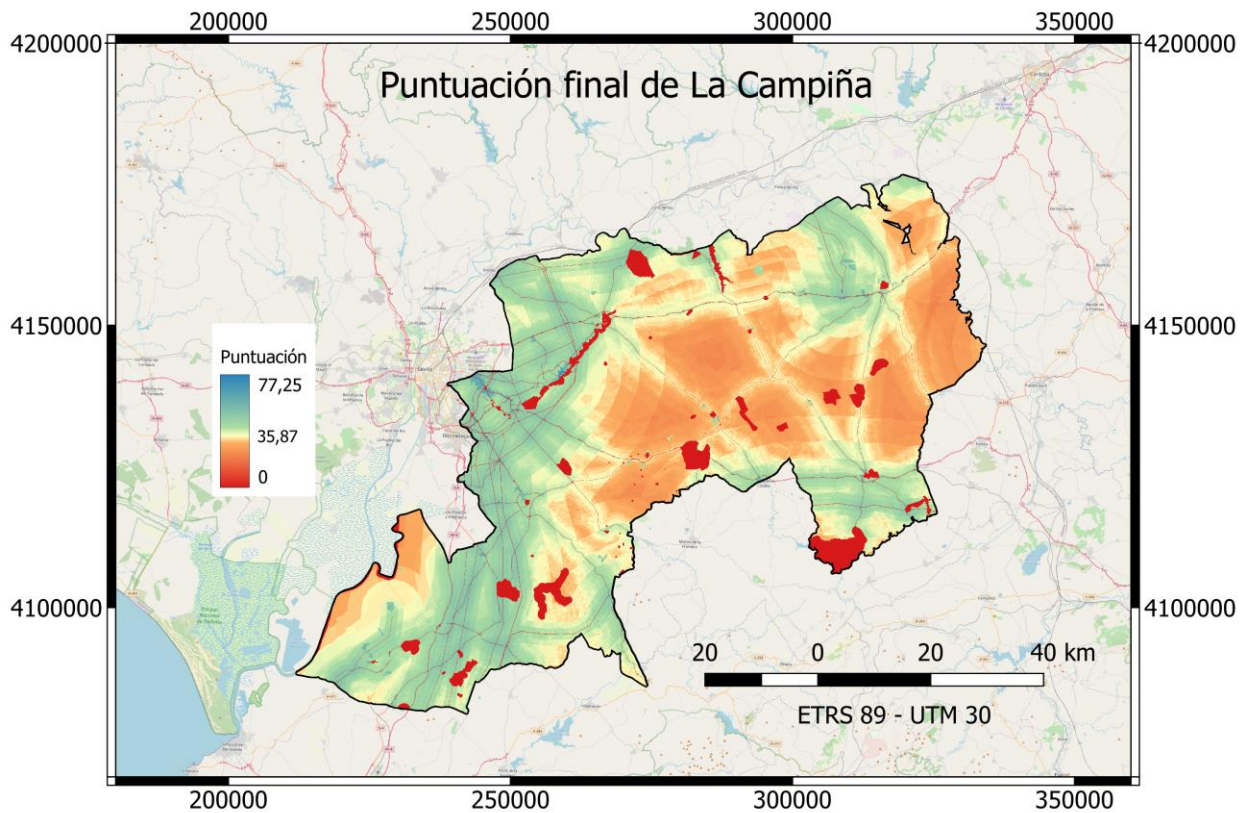


Figura 52 - Mapa final de puntuación para La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)

Los valores más azulados corresponden con las zonas de mayor puntuación. Todos los valores tomados por las celdas se encuentran situados en el Anexo 2 ordenados de menor a mayor. Hemos obtenido del orden de 600 valores a lo largo del área de La Campiña, siguiendo la distribución mostrada en la Figura 53.

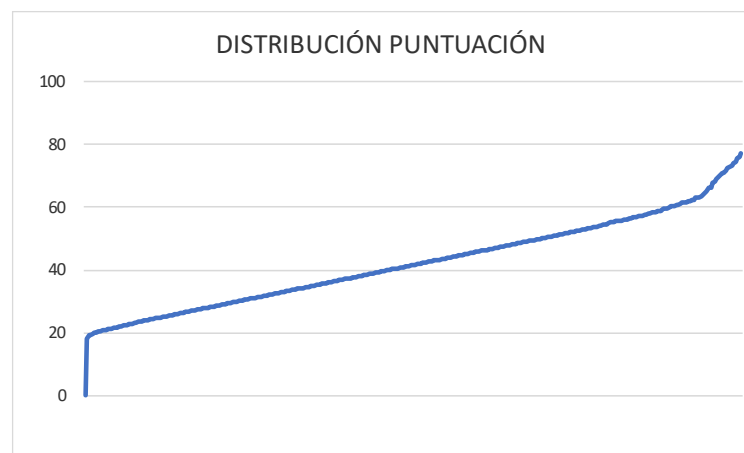


Figura 53 - Distribución de puntuación en la comarca de La Campiña

Fuente: elaboración propia

Obteniendo el histograma, cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados, se aprecia cómo la gran mayoría de puntuaciones se encuentran entre 20% y 60% (Figura 54).

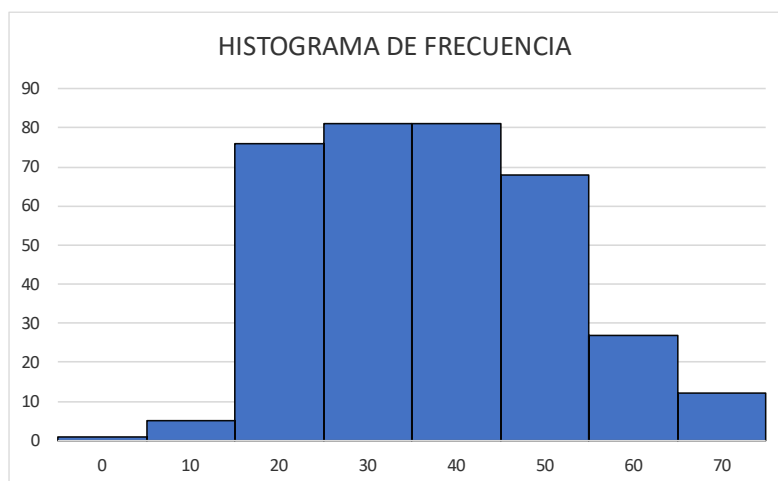


Figura 54 - Histograma para los valores de puntuación

Fuente: elaboración propia

Los valores de mayor puntuación son los más interesantes para ubicar nuestra subestación. Para poder trabajar sobre ellos será necesario reclasificar el mapa, para quedarnos únicamente con los valores superiores al 75% en puntuación, Esta reclasificación la obtendremos con la herramienta “Reclasificar por tabla” y asignando una puntuación de 0 a los valores entre 0 y 75%.

9.4 Resultado final

Una vez realizada la reclasificación del 75%, localizamos tres zonas (Figura 55). Las tres se encuentran en el término municipal del Viso del Alcor. Para poder localizarlas con mayor exactitud hemos usado un mapa topográfico perteneciente al (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023) (Figura 56). El ámbito de este trabajo no contempla la calificación del suelo ni permisos necesarios para poder completar la construcción.

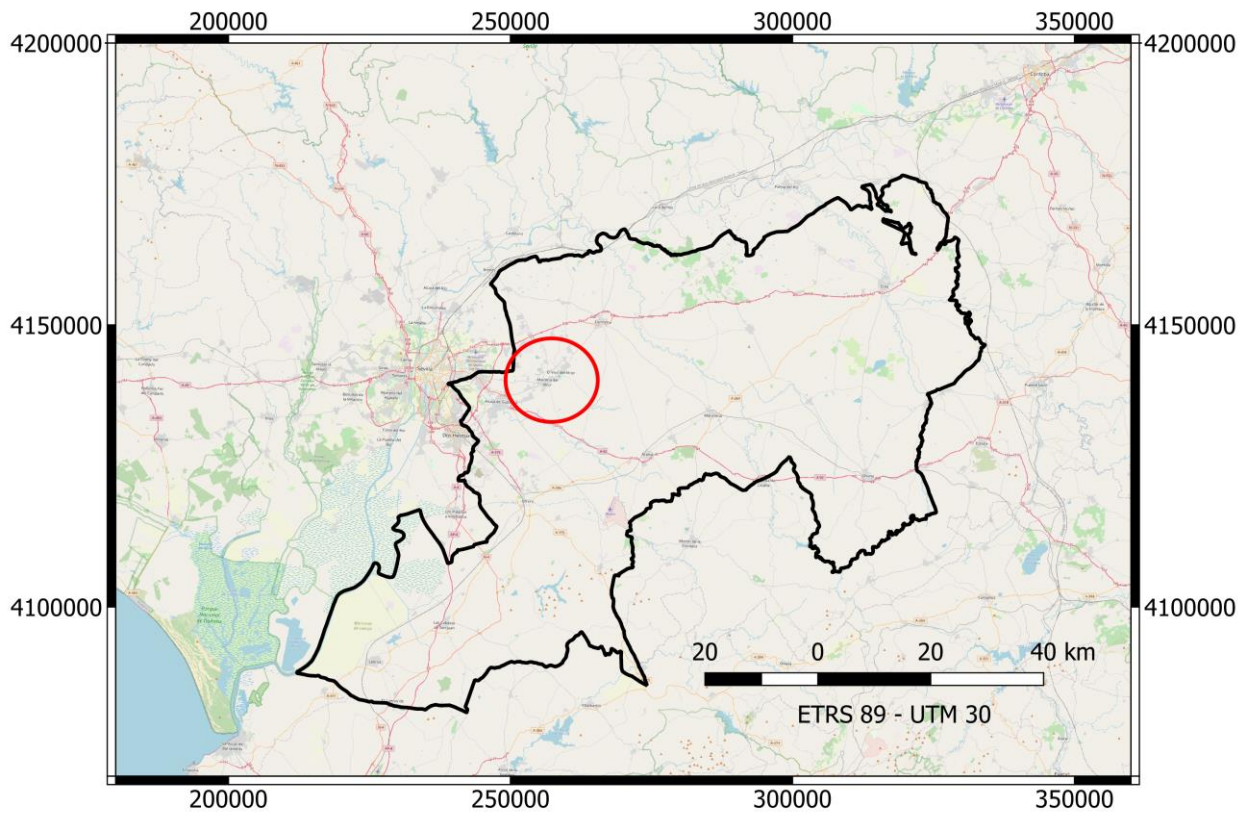


Figura 55 - Mayor puntuación en La Campiña

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2023)



Figura 56 - Puntuación más elevada en El Viso del Alcor

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023)

Al ser el criterio más de mayor peso la demanda y estar directamente relacionado con la densidad de población. Nuestras mejores soluciones se encuentran sobre núcleos de población, deberemos de buscar un hueco libre para poder situar nuestra subestación.

Una vez situados en la zona de mayor puntuación, hemos descargado una ortofotografía también del (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023). De esta forma podemos analizar de manera visual las localizaciones, garantizando que se cumplen todos los criterios mencionados anteriormente. Se ha dividido en tres zonas las posibles ubicaciones (Figura 57).

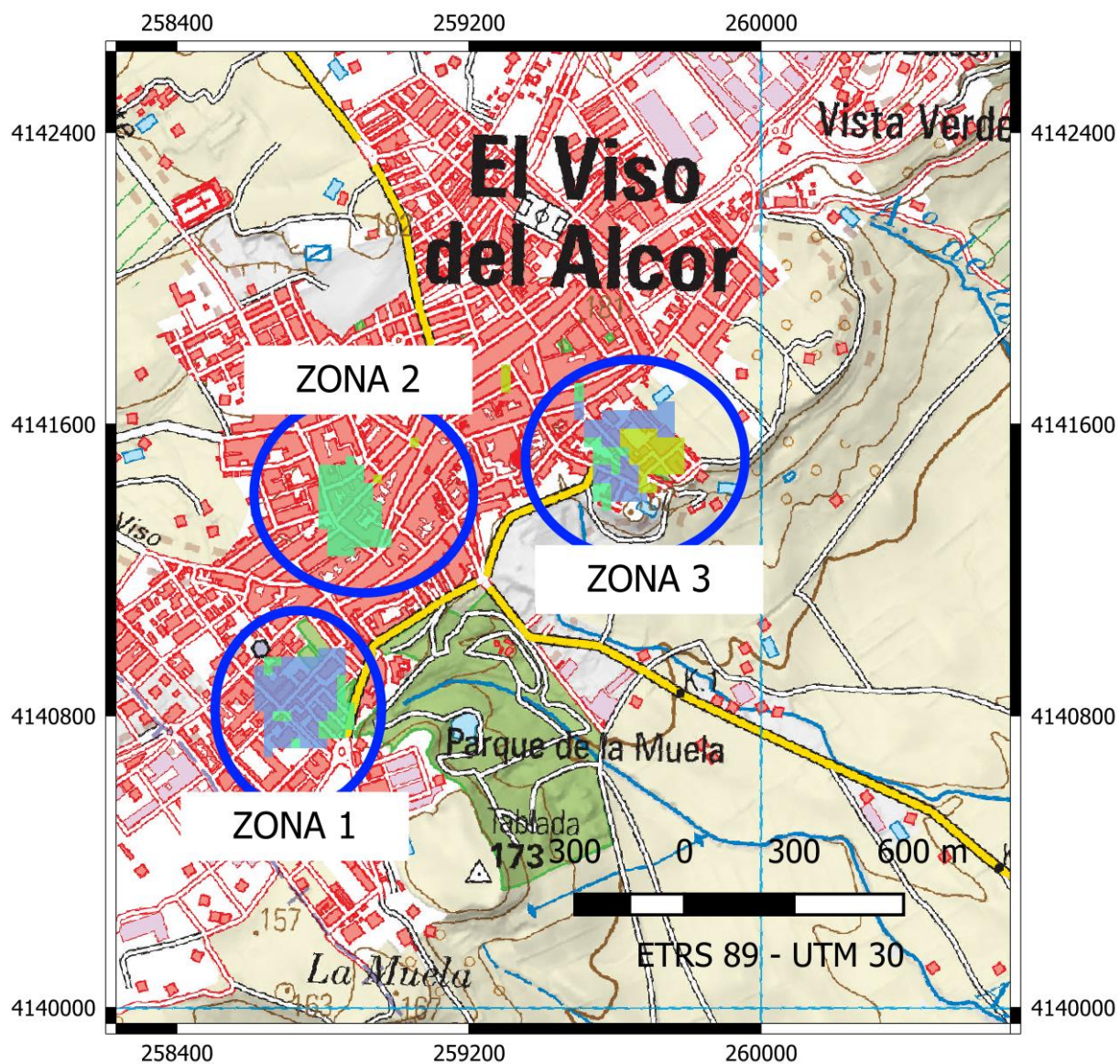


Figura 57 - Zonas de estudio

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023)

9.4.1 Estudio zona 1

La Figura 58 corresponde a la zona 1. Se encuentra en una zona con demasiadas construcciones, se observa un descampado usado como aparcamiento, pero no cumple con la superficie mínima de 2000 m² establecida en los criterios. Su área es de 1500 m².



Figura 58 – Primera zona de estudio

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023)

9.4.2 Estudio zona 2

La zona 2 (Figura 59) también se encuentra llena de edificios y el único descampado libre no es apto para la construcción de nuestra subestación.



Figura 59 – Segunda zona de estudio

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023)

9.4.3 Estudio zona 3

Esta tercera zona, (Figura 60), muy próxima a las otras dos se encuentra a las afueras del Viso del Alcor, contiene a un fragmento de parcela vacío idóneo para la construcción de nuestra subestación. Lo localizamos señalado en rojo y cumple con el criterio de área mínima para el proyecto. Sería nuestra solución final, con una puntuación de 77,25 sobre 100.



Figura 60 – Tercera zona de estudio

Fuente: elaboración propia. Cartografía base (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023)

La subestación localizada en este emplazamiento sería de tipo reductora. La electricidad llegaría a alta tensión, una vez en ella haciendo uso de los transformadores, se reduciría hasta poder hacerla apta para el consumo doméstico, abasteciendo a la población situada a su alrededor.

10 CONCLUSIÓN

El estudio de la ubicación para una subestación eléctrica es un paso fundamental al inicio del proyecto de construcción. Una correcta elección de los criterios puede significar encontrar opciones de ubicaciones cercanas a la más idónea.

El uso de un sistema de información geográfica nos ayuda a poder trabajar con diversos criterios y evaluar un amplio número de posibles ubicaciones. En caso de cambios de valores en algunos criterios o cambios de criterios, fácilmente se puede modificar el resultado obtenido permitiendo una flexibilidad y rapidez en el método. Esto se traduce en una reducción de plazos en los proyectos.

La correcta ubicación de una subestación garantiza el éxito tanto al corto plazo en su construcción y puesta en marcha como al largo plazo en su utilidad y explotación, incluyendo incluso una posible última fase de finalización de la explotación.

Los datos geográficos usados en el análisis se encuentran en internet de forma libre y gratuita, tanto del Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica el cual contiene datos a nivel nacional como el portal DERA perteneciente a la Junta de Andalucía. Así mismo el programa empleado (QGIS), también es libre y de código abierto.

El trabajo ha pretendido demostrar la utilidad del método para la construcción de una subestación, proponiendo una alternativa en la toma de decisiones. Es preciso recalcar que para estudios reales se tienen en consideración parámetros muchos más complejos (estudios estadísticos de la demanda, valoración económica de los terrenos, impactos sobre la población, etc.) requieren un mayor presupuesto y se escapan del ámbito de este trabajo.

REFERENCIAS

- AENOR. (2002). UNE-EN 60076-3:2002. Transformadores de potencia. Parte 3: Niveles de aislamiento, ensayos dieléctricos y distancias de aislamiento en el aire.
- AENOR. (2013). UNE-EN 60076-1:2013. Transformadores de potencia. Parte 1: Generalidades.
- Agencia Andaluza de la Energía . (2023). *Distribución*. Recuperado el 10 de abril de 2023 de <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/informacion-energetica/infraestructuras-energeticas/energia-electrica/distribucion>
- Amores, A. (2018). *Escenarios de demanda de energía final a 2030*. Deloitte. Recuperado el 9 de marzo de 2023 de <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/strategy/articulos/escenarios-energia-demanda-final.html>
- Areatecnología. (2023). *Cálculo sección de los cables*. Recuperado el 10 de febrero de 2023 de <https://www.areatecnologia.com/electricidad/secciones-de-cables.html>
- Arrayás , M., & Trueba, J. (2007). *Electromagnetismo, circuitos y semiconductores*. Madrid: Dykinson.
- Basonia. (2010). *Estudio de impacto ambiental de la subestación eléctrica a 220kV Luminabaso y línea eléctrica a 220kV Luminabaso Abadiano-Sidenor*. Red Electrica Española.
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists*. Oxford: Pergamon.
- Cadavid, H., Aponte, G., Mora, A., Bolaños, H., Pérez, R., & Escobar, A. (2001). Medición y Simulación de Campos Eléctricos y Magnéticos de Baja Frecuencia en Líneas y Subestaciones. *Gralta (Laboratorio de Alta Tensión Universidad del Valle)*.
- Chen, H. (2021). Substation Location Selection Using GIS and Improved Matter-Element Extension Method. *Journal of Physics*.
- Cutta, A. (2019). *QGIS Quick Start Guide*. Birmingham: Packt Publishing.
- Daskin, M. S. (2013). *Networkk and discrete location: models, algorithms, and applications*. Wiley.
- Elige tu energía. (2023). *Operador del sistema eléctrico español*. Recuperado el 10 de febrero de 2023 de <https://eligetuenergia.com/operador-luz/>
- Enatrel. (2017). *Estudio de impacto ambiental subestación central y línea 138 kV doble circuito*.
- Endesa Fundación. (2022). *El transformador eléctrico*. Recuperado el 23 de marzo de 2023 de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico>
- Endesa Fundación. (2022). *Transporte de electricidad*. Recuperado el 24 de marzo de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/transporte-de-electricidad>
- Europa Press. (2017). Iberdrola invierte 8,5 millones en la construcción de una nueva subestación eléctrica de 2.000 metros cuadrados en Ávila.
- Fernandez Yagües, J. L. (2023). *Resistencia Eléctrica*. Fisicalab. Recuperado el 28 de febrero de 2023 de <https://www.fisicalab.com/apartado/resistencia-electrica-conductor>
- Gobierno de España . (1995). Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales. Boletín Oficial del Estado.
- Gobierno de España . (2000). RD 1955/2000. Regulación de las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimiento de autorización de instalaciones de energía eléctrica. Boletín Oficial del Estado .
- Gobierno de España . (2001). RD 1066/2001. Condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas. Boletín Oficial del Estado .

- Gobierno de España . (2002). RD 842/2002. Reglamento electrotécnico para baja tensión. Boletín Oficial del Estado .
- Gobierno de España . (2014). RD 337/2014. Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias. Boletín Oficial del Estado .
- Gobierno de España. (2013). Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico. Boletín Oficial del Estado.
- Gobierno de España. (2022). Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Boletín Oficial del Estado.
- Gobierno de España. (2023). *Energía Eléctrica*. Madrid: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.
- Gómez-Esteban, P. (2010). *El Tamiz*. Recuperado el 23 de febrero de 2023 de <https://eltamiz.com/2010/01/13/electricidad-i-efecto-joule/>
- Guía de Andalucía. (2023). *Reseñas patrimoniales en el plan de ordenación de territorio de Andalucía*.
- hc-energía. (2013). *Señalización en subestaciones eléctricas*. Recuperado el 16 de marzo de 2023 de <http://www.nosia.com/clientes/hc-energia/>
- ideAndalucia. (2023). *Infraestructura de Datos Espaciales de Andalucía*. Recuperado el 23 de febrero de 2023 de <https://www.ideandalucia.es/portal/>
- Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2021). *Datos espaciales de mallas estadísticas*. Recuperado el 22 de marzo de 2023 de <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/datosespacialesestadisticos/index.htm>
- Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2022). *Sistema de Información Multiterritorial de Andalucía (SIMA)*. Recuperado el 10 de abril de 2023 de https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/badea/informe/anal?CodOper=b3_151&idNode=23204
- Instituto Estadístico y Cartografía de Andalucía. (2023). *Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA)*. Recuperado el 18 de enero de 2023 de <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/>
- Junta de Andalucía. (2014). *Decreto 36/2014, de 11 de febrero, por el cual se regula el ejercicio de las competencias de la Administración de la Junta de Andalucía en materia de Ordenación del Territorio y Urbanismo*. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía. (2016). Ley 6/2016, de 1 de agosto, por la que se modifica la Ley 7/2002, de 17 de diciembre, de Ordenación Urbanística de Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía.
- Krieg, T., & Finn, J. (2019). *Substations*. Springer.
- LACASE. (2021). *La campiña sevillana*. Recuperado el 10 de marzo de 2023 de <https://lacampinasevillana.es/la-campina-sevillana/>
- Liu, Z., Yan, L., & Xu, J. (2013). Selecting Location of Transformer Substation Bases on FAHP. *Sensor & Transducers*, 369-374.
- Mehane, B., & Kane, V. (2013). GIS for enhance electric utility performance. *Artech House*.
- Molina, J. M. (2004). *Diseño de subestación transformadora*.
- OpenStreetMap*. (2023). Recuperado el 12 de junio de 2023 de <https://www.openstreetmap.org/>
- Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). (2023). *Centro de descargas*. Recuperado el 13 de marzo de 2023 de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Puebla, J. G. (2014). *SIG: Sistema de Información Geográfica*. Madrid: SISTEMAS EDITORIAL.
- QGIS Association. (2023). *QGIS Geographic Information System*. Recuperado el 17 de mayo de 2023 de

<https://www.qgis.org>

- REE. (2022). *El sistema eléctrico español: Avance 2021*. Red Eléctrica Española.
- REE. (2022). *Operación del sistema eléctrico*. Recuperado el 15 de marzo de 2023 de <https://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico>
- REE. (2023). *Seguimiento de la demanda de energía eléctrica*. Recuperado el 12 de marzo de 2023 de <https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/demandaqh/total/2023-02-26>
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process : planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill.
- Sistema Español de Inventario de Emisiones. (20 de enero de 2020). *Uso de SF6 en los equipos eléctricos*. Recuperado el 10 de febrero de 2023 de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/060507-sf6-equip-electr_tcm30-468197
- Sunfield. (2020). *Comercializadoras de la Electricidad en España*. Recuperado el 10 de febrero de 2023 de <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/comercializadoras-electricidad-espana/>
- Sutton, T. (2009). *A Gentle Introduction to GIS*. Recuperado el 27 de mayo de 2023 de https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/gentle_gis_introduction/preamble.html
- Um, S. (2021). Comprehensive Evaluation Index Framework and Evaluation Method for Substation Site Selection. *Journal of Physics*, 1887, 012034.
- Vargas, J. (2020). *Ingeniería de subestaciones*. Recuperado el 10 de febrero de 2023 de <https://ingenieriadesubestaciones.com/tipos-de-subestaciones-electricas/>
- Willis, H. (2004). *Power distribution planning reference book*. CRC Press.
- Zambrano-Asanza, S., Chumbi, W., & Franco. (2021). Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Systems for Identifying Ideal Locations for New Substations. *Journal of control, automation & electrical systems*, 1305-1316.