

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis multicriterio para la localización, en
Andalucía, de una central hidroeléctrica a través de
un sistema de información geográfica

Autor: Pablo Infante Gómez

Tutor: José Lázaro Amaro Mellado

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

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

**Análisis multicriterio para la localización, en
Andalucía, de una central hidroeléctrica a través
de un sistema de información geográfica**

Autor:

Pablo Infante Gómez

Tutor:

José Lázaro Amaro Mellado

Profesor asociado

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Análisis multicriterio para la localización, en Andalucía, de una central hidroeléctrica a través de un sistema de información geográfica.

Autor: Pablo Infante Gómez

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, 2021

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

*A mi familia, a la que se lo
debo todo.*

A mi tutor.

Resumen

En la actualidad, la importancia de las fuentes de energía renovables es cada vez mayor, y esto es debido a que se presentan como una solución limpia y eficiente frente a los principales problemas de las fuentes no renovables: efectos medioambientales negativos y recursos limitados.

Motivado por este auge de las energías renovables, y a la vez por la necesidad de responder a la alta demanda de electricidad con la generación de energías limpias, este trabajo persigue analizar el lugar idóneo para ubicar una central hidroeléctrica en la región de Andalucía, al sur de España.

Para el desarrollo de este trabajo se ha planteado un análisis multicriterio según una serie de factores. Como herramienta informática para su resolución se ha utilizado un sistema de información geográfica y datos libres disponibles a través de la Web. Dicha herramienta nos permite operar con datos representados cartográficamente, analizarlos y tomar decisiones en función del análisis realizado.

Abstract

Nowadays, renewable energy sources are becoming increasingly important, and this is because they are presented as a clean and efficient solution against the main problems of non-renewables sources: negative environmental effects and limited sources.

Induced by this renewable energy boom, and at the same time by the necessity to respond to the high demand for electricity with clean energy generation, this work aims at analysing the best place to locate a hydroelectric power plant in Andalucía, south Spain.

For the development of this work, a multi-criteria analysis has been carried out according to a series of factors. In addition, an open-source geographic information system and free data available on the Web have been used as a computer tool for its resolution. This tool allows us to operate with cartographically represented data, analyse them and make decisions based on the analysis carried out.

Aclaración

El trabajo aquí expuesto no trata de constituir una herramienta práctica que genere una solución real al problema planteado. Para ello, habría que tener en cuenta múltiples factores que no se han tenido en cuenta debido a su complejidad y también sería necesario un análisis más riguroso y detallado.

Se trata, por tanto, de un ejercicio metodológico que tiene como objetivo remarcar la utilidad de los sistemas de información geográfica para aportar soluciones a problemas de determinación geográfica de emplazamientos idóneos.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Aclaración	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xviii
Notación	xx
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivos</i>	2
1.2 <i>Estructura del trabajo</i>	2
2 Centrales Hidroeléctricas	4
2.1 <i>Definición central hidroeléctrica</i>	4
2.2 <i>Componentes principales</i>	4
2.2.1 Azud y presa	4
2.2.2 Toma de agua, aliviaderos y conducciones	7
2.2.3 Cámara de carga, tubería forzada y chimenea de equilibrio	7
2.2.4 Sala de máquinas, turbinas, generador y transformador	8
2.3 <i>Tipos de centrales hidroeléctricas</i>	10
2.3.1 Según la potencia instalada	10
2.3.2 Según el modo de operación	10
3 Funcionamiento de centrales hidroeléctricas	14
3.1 <i>Diseño de un aprovechamiento hidroeléctrico</i>	15
3.1.1 Parámetros fundamentales	15
3.1.2 Determinación del caudal de equipamiento	16
3.1.3 Potencia Nominal	18
4 Contexto fuentes renovables en Europa y España	19
4.1 <i>Energías renovables dentro del marco europeo</i>	19
4.2 <i>Energía Hidráulica en España</i>	21
5 Legislación sobre centrales hidroeléctricas en España	23
6 Criterios para la ubicación de una central hidroeléctrica	27
7 Sistemas de Información Geográfica	29
7.1 <i>Introducción histórica de los SIG</i>	29
7.2 <i>Definición</i>	30
7.3 <i>Modelo de datos</i>	30
7.4 <i>Funcionamiento de los SIG</i>	32

8	Realización del trabajo	33
8.1	<i>Datos de partida</i>	33
8.2	<i>Análisis multicriterio</i>	34
8.2.1	Jerarquía de cauces fluviales	35
8.2.2	Capacidad de los embalses	37
8.2.3	Distancia a líneas eléctricas	38
8.2.4	Precipitaciones	39
8.2.5	Distancia a espacios protegidos	40
8.2.6	Presencia de central hidroeléctrica	41
9	Resultados	43
9.1	<i>Jerarquía de cauces fluviales</i>	44
9.2	<i>Capacidad de los embalses</i>	44
9.3	<i>Distancia a líneas eléctricas</i>	45
9.4	<i>Precipitaciones</i>	46
9.5	<i>Distancia a espacios protegidos</i>	46
9.6	<i>Presencia de central hidroeléctrica</i>	47
9.7	<i>Puntuación final</i>	48
10	Conclusiones	52
	Referencias	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes (pesos) en función de la importancia de cada criterio	34
Tabla 2. Puntuación relativa a la jerarquía de los cauces fluviales	35
Tabla 3. Puntuación relativa a la capacidad de los embalses	37
Tabla 4. Puntuación relativa a la distancia a líneas eléctricas	38
Tabla 5. Puntuación relativa a las precipitaciones	39
Tabla 6. Puntuación relativa a las distancias respecto a los espacios protegidos	40
Tabla 7. Puntuación ponderada del embalse de Guadalcaçín	50
Tabla 8. Puntuación ponderada del embalse del Barbate	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Potencia generada a través del aprovechamiento hidroeléctrico en todo el planeta	1
Figura 2 – Presa de gravedad	5
Figura 3 – Presa en arco	6
Figura 4 – Presa de contrafuertes	6
Figura 5 – Rendimiento turbinas Pelton	8
Figura 6 – Rendimiento turbinas Francis	9
Figura 7 – Rendimiento turbinas Kaplan	9
Figura 8 – Central de agua fluyente	11
Figura 9 – Central de regulación	12
Figura 10 – Central de bombeo	13
Figura 11 – Esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica	14
Figura 12 – Distribución y clasificación de las precipitaciones de una serie de 15 años	16
Figura 13 – Curva de caudales clasificados	17
Figura 14 – Porcentaje de energía consumida a partir de fuentes renovables sobre el total	20
Figura 15 – Potencia hidráulica instalada en España en 2019	21
Figura 16 – Potencia hidráulica instalada en España de 2010 a 2019	22
Figura 17 – Esquema del procedimiento de concesión de explotación	24
Figura 18 – Ejemplo de representación de la realidad mediante un modelo vectorial.	31
Figura 19 – Ejemplo de representación de la realidad mediante un modelo ráster	31
Figura 20 – Clasificación de las categorías de un campo, dentro de las propiedades de la capa	36
Figura 21 – Órdenes de jerarquía de los cauces fluviales	36
Figura 22 – Modificación simbología dentro de las propiedades de la capa	37
Figura 23 – Embalses clasificados según su capacidad	38
Figura 24 – Distancia a líneas eléctricas	39
Figura 25 – Media de precipitaciones anuales en los últimos 50 años	40
Figura 26 – Distancia a espacios protegidos	41
Figura 27 – Centrales hidroeléctricas	42
Figura 28 – Apartado <i>uniones</i> dentro del menú <i>propiedades</i>	43
Figura 29 – Embalses clasificados según la jerarquía de los ríos que los componen	44
Figura 30 – Embalses clasificados según su distancia a líneas eléctricas	45
Figura 31 – Embalses clasificados según precipitaciones	46

Figura 32 – Embalses clasificados según su distancia a espacios protegidos	47
Figura 33 – Embalses que no disponen de central hidroeléctrica	47
Figura 34 – Puntuaciones finales de cada embalse	48
Figura 35 – Núcleos de población cercanos a los embalses	49
Figura 36 – Puntuación según cercanía de los núcleos urbanos	50
Figura 37 – Solución final sobre cartografía base	51

Notación

IEA	Internacional Energy Agency
CNIG	Centro Nacional de Información Geográfica
DERA	Dato Espaciales de Referencia de Andalucía
kW	kilovatio
MW	Megavatio
Hu	Salto útil
Hn	Salto neto
Q	Caudal de equipamiento
e	Factor de eficiencia
Rt	Rendimiento de la turbina
Rg	Rendimiento del generador
Rs	Rendimiento del transformador de salida
kN	kilonewton
kV	kilovoltio
GWh	Gigavatio-hora
TWh	Teravatio-hora
SIG	Sistema Información Geográfica
ESRI	Environmental Systems Research Institute
RDPH	Reglamento del Dominio Público Hidráulico
TRLA	Texto Refundido de la Ley de Aguas
IGN	Instituto Geográfico Nacional

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mundo atraviesa por un complejo escenario energético: por un lado, existe cada vez mayor demanda de energía debido al crecimiento demográfico, tecnológico y económico en el mundo. Y por otro, la mayoría de las presentes fuentes de energía tienen recursos limitados y lo que es más importante, generan efectos medioambientales negativos que provocarán un empeoramiento de las condiciones de vida de los seres vivos del planeta Tierra en un futuro próximo.

Las fuentes de energía renovables han surgido como solución a estos problemas energéticos debido a que son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Por este motivo, todos los países están invirtiendo cada vez más dinero en las fuentes renovables provocando un importante crecimiento de estas en el mercado energético.

La fuente de energía renovable más trascendental en todo el mundo es la hidroelectricidad, pues suministra cerca del 16% de demanda global de electricidad, porcentaje mucho mayor que el de otras fuentes renovables como la solar y la eólica.

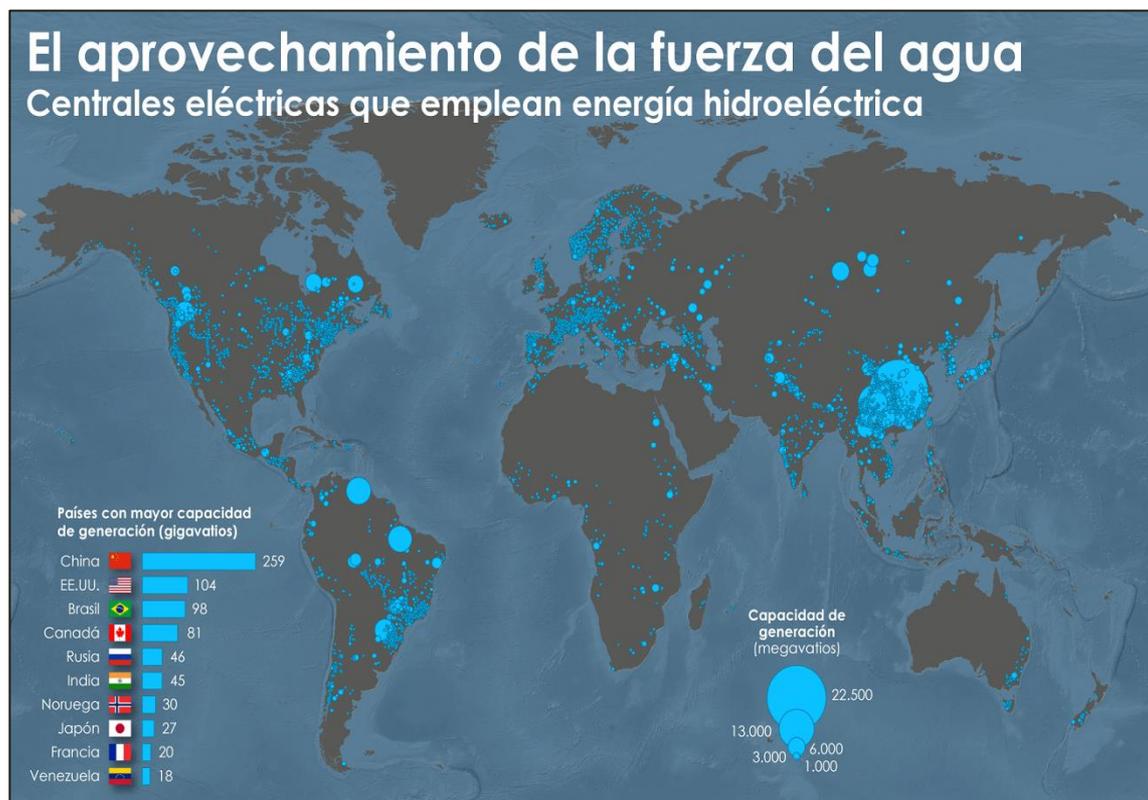


Figura 1 – Potencia generada a través del aprovechamiento hidroeléctrico en todo el planeta (World Resources Institute, 2018)

Además de lo comentado anteriormente, el proceso conocido como generación de energía hidroeléctrica, a partir del cual se convierte la energía potencial del agua en energía eléctrica, puede llegar a alcanzar una eficiencia muy elevada, próxima al 90%. Por el contrario, los procesos de conversión térmica de energía primaria como son los combustibles fósiles tienen una eficiencia que puede estar en torno al 40%. Aparte, estos últimos cuentan con un coste directo asociado al combustible de la energía no aprovechada, situación que en el caso de la energía hidroeléctrica no ocurre.

De lo comentado hasta ahora, se puede concluir que la hidroelectricidad, aparte de ser energía renovable es energía sostenible, y que contribuye a reducir tanto la pobreza como la contaminación ambiental, alcanzando de esta manera los objetivos de desarrollo sostenible.

Por todo lo expuesto, se ha considerado realizar este trabajo sobre la ubicación de una central de este tipo de fuente renovable.

1.1 Objetivos

El objetivo fundamental de este proyecto es encontrar una posible solución viable para ubicar una central hidroeléctrica a pie de presa en la región de Andalucía, al sur de España.

La solución se obtendrá en base a unos criterios que se definirán en apartados posteriores. Por lo tanto, el resultado conseguido no será una solución real sino una solución particular para los criterios aplicados.

Para tratar de cumplir estos objetivos, se utilizarán una serie de análisis y herramientas que se detallarán en posteriores capítulos. Fundamentalmente, utilizaremos un sistema de información geográfica (SIG) y datos de libre acceso. El SIG es una herramienta muy utilizada para la integración, gestión, representación y análisis de datos.

1.2 Estructura del trabajo

- **Introducción (capítulo 1)**

En este primer apartado se realiza una breve introducción sobre el problema que se va a analizar en este trabajo. A su vez, se definen los objetivos que se pretenden lograr con el desarrollo de este proyecto y la estructura que lo compone.

- **Centrales hidroeléctricas (capítulo 2)**

El segundo apartado contiene una definición de central hidroeléctrica, así como información detallada del equipamiento necesario para su correcto funcionamiento. Además, recoge dos clasificaciones de centrales hidroeléctricas según dos criterios distintos.

- **Funcionamiento de una central hidroeléctrica (capítulo 3)**

En este apartado, se profundiza en el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas y se detalla con cierto nivel técnico cómo se realiza el cálculo de la potencia nominal de dichas centrales.

- **Contexto fuentes renovables en Europa y España (capítulo 4)**

Con este apartado se trata de definir la situación actual de las fuentes renovables, y más concretamente las fuentes de energía hidráulica, dentro del marco de la Unión Europea y también dentro del ámbito nacional.

- **Legislación sobre centrales hidroeléctricas en España (capítulo 5)**

Este apartado contiene un resumen del marco normativo para la adjudicación de concesiones de agua para recursos hidroeléctricos, así como un fragmento comentado de la legislación sobre la protección de la naturaleza en aprovechamientos hidroeléctricos.

- **Criterios para la ubicación de una central hidroeléctrica (capítulo 6)**

En este apartado se detallan los criterios que van a condicionar la ubicación de la central hidroeléctrica.

- **SIG y realización del trabajo (capítulos 7 y 8)**

Antes de explicar el trabajo realizado, en el capítulo 7 se introduce la herramienta con la que se ha trabajado, los sistemas de información geográfica. Una vez definidos los SIG y haber explicado su funcionamiento, en el capítulo 8 se desarrolla todo el trabajo realizado con esta herramienta.

- **Resultados (capítulo 9)**

Este apartado recoge los resultados obtenidos tras la realización del trabajo y, después de analizarlos, propone una posible solución al problema planteado.

- **Conclusiones (capítulo 10)**

Finalmente, en este último apartado se comentan las conclusiones extraídas del trabajo realizado y los resultados obtenidos.

2 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

En este apartado se realizará una introducción a las centrales hidroeléctricas. En primer lugar, se definirá el concepto de central hidroeléctrica para posteriormente detallar los componentes y los tipos en los que se pueden clasificar según distintos criterios.

2.1 Definición central hidroeléctrica

Según (Fundación Endesa, 2021), una central hidroeléctrica se define como un conjunto de infraestructuras y equipos electromecánicos, gracias a los cuales se transforma la energía potencial de un caudal de agua en energía eléctrica. El funcionamiento de estas centrales se fundamenta en aprovechar la energía potencial gravitatoria que contiene una masa de agua debido al desnivel provocado por el cauce natural de un río o por la construcción de una presa, dicho desnivel se conoce como salto geodésico.

Dicha masa de agua descenderá por ese desnivel y se conducirá hasta una turbina hidráulica. La fuerza con la que llega provocará un giro en el eje de la turbina, transformando la energía potencial generada por la caída del agua en energía mecánica rotatoria. El eje de la turbina hidráulica está conectado a su vez a un generador de corriente alterna, el cual transformará la energía mecánica transmitida por el eje de la turbina en energía eléctrica.

2.2 Componentes principales

Una vez explicado en qué consiste una central hidroeléctrica, se va a definir en este apartado el equipamiento principal requerido para que las centrales puedan realizar la actividad para la que han sido diseñadas.

La información detallada en este apartado se ha conseguido de dos fuentes: (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006) y (Fundación Endesa, 2021).

2.2.1 Azud y presa

- **Azud:** estructura no muy alta, con forma de muro, transversal al curso del río. Está diseñado para producir un remanso de agua sin alterar notablemente el nivel del río. Su propósito es desviar parte del caudal del río hacia la toma de la central. Entre los materiales más utilizados para su construcción destacan el hormigón, ladrillos, escollera o tierra. Es capaz de resistir al empuje del agua por su propio peso, aunque en el caso de los de tierra y escollera es común anclarlos al terreno con el objetivo de incrementar su estabilidad.
- **Presa:** se trata de un muro cuyo propósito es contener el agua de un río y almacenarla en un embalse. Su construcción provoca dos niveles distintos de agua: antes y después de la contención. El desnivel se utiliza para la producción de energía. La orografía y el cauce en el que se ubica condiciona la forma de la presa. Dependiendo del material empleado, hay presas de tierra y de hormigón, donde estas últimas son las más utilizadas dada su mayor resistencia.

Según su estructura, las presas se pueden clasificar en:

- a) Presas de gravedad: son aquellas que contrarrestan la fuerza del agua con su propio peso. Por tanto, su estabilidad dependerá del esfuerzo de la superficie sobre la que se asienta. La resistencia del terreno determina la altura de las mismas. Su forma es triangular y su base es amplia, y se hace más delgada en la parte superior que se estrecha en la parte superior. Tienen una vida útil bastante prolongada en el tiempo y no necesitan mantenimiento.



Figura 2 – Presa de gravedad
(IngCivilEng, 2016)

- b) Presa en arco: destacan por la forma curva de su pared. Debido al efecto del arco, las paredes del valle reciben toda la presión generada por el agua. En determinados casos donde las condiciones son favorables, la estructura puede requerir menos hormigón que una presa de gravedad. Además, este tipo de presas tienen la peculiaridad de que suelen plantearse en estrechos valles con laderas rocosas.



Figura 3 – Presa en arco
(Iagua, 2020)

- c) Presa de contrafuertes: cuenta con una pared que soporta el agua y un conjunto de contrafuertes o pilares de forma triangular, que sujetan la pared y transmiten la carga del agua a la base. En general, se utilizan en terrenos poco estables y no son muy económicas.



Figura 4 – Presa de contrafuertes
(Masqueingenieria, 2016)

2.2.2 Toma de agua, aliviaderos y conducciones

- **Toma de agua:** se trata de la instalación que se construye para desviar parte del agua del cauce del río y así agilizar su entrada desde la presa o el azud. Es fundamental que se diseñe calculando con precisión que las pérdidas de carga causadas sean mínimas.
La toma habitualmente cuenta con una rejilla que impide la entrada de material sólido al canal y una compuerta de seguridad que se designa ataguía. En condiciones de funcionamiento estándar, esta compuerta se mantiene abierta, cerrándose exclusivamente en caso de emergencia o en el caso de que se vaya a efectuar una inspección o reparación.
- **Aliviaderos:** consisten en unas aberturas que habilitan el paso del agua desde el embalse hasta el nivel inferior del cauce del río. Están diseñados para aquellos casos en los que se produzcan avenidas y el nivel del agua en el embalse corra el riesgo de sobrepasar el máximo permitido, se evacúe agua del embalse rápidamente. De esta forma, se libera parte del agua retenida sin que recorra el interior de la sala de máquinas.
- **Conducciones:** las turbinas reciben el agua mediante un sistema complejo de canalizaciones. Para el caso de los canales, se pueden construir excavando el terreno o de manera artificial a través de estructuras de hormigón.

2.2.3 Cámara de carga, tubería forzada y chimenea de equilibrio

- **Cámara de carga:** es un depósito ubicado en el extremo del canal y a partir del cual comienza la tubería forzada.
En el momento en que la conducción entre la toma de agua y la cámara de carga se produce a presión, ésta última será cerrada y poseerá a su vez una chimenea de equilibrio, para amortiguar las variaciones de presión y protegerla de los golpes de ariete.
Durante el diseño de la geometría de la cámara se trata de evitar al máximo las pérdidas de carga y los remolinos que puedan originarse, tanto aguas arriba como en la propia cámara. Si la tubería forzada no está adecuadamente sumergida, un flujo de este tipo puede ocasionar la aparición de vórtices que arrastren aire hasta la turbina, generando una fuerte vibración que disminuiría el rendimiento de la minicentral.
Este depósito debe disponer a su vez de un aliviadero, para evacuar el agua turbinada en el cauce fluvial más próximo en caso de que la central pare.
- **Tubería forzada:** es el conducto que se encarga de transportar el agua desde la cámara de carga hasta la turbina. Debe de estar diseñada para soportar la presión que produce la columna de agua, además de la sobrepresión que genera el golpe de ariete en caso de detención brusca de la minicentral.
En función de la orografía, así como de los factores medioambientales, la instalación de esta tubería será enterrada o aérea.
- **Chimeneas de equilibrio:** se tratan de pozos de presión de las turbinas que se emplean para evitar el llamado “golpe de ariete”, el cual se genera cuando aparece una variación repentina de presión como consecuencia de la apertura o cierre rápido de las válvulas.

2.2.4 Sala de máquinas, turbinas, generador y transformador

- **Sala de máquinas:** se trata de una construcción donde se sitúa todo el equipamiento electromecánico y los elementos de regulación y control de la central.
- **Turbinas hidráulicas:** son elementos mecánicos que transforman la energía cinética y potencial que tiene asociada una masa de agua, convirtiéndola en un movimiento de rotación, que transmitido mediante un eje al generador produce energía eléctrica. Las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción.
 - a) Turbinas de acción: son aquellas que aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua para hacerlas girar (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006). Dentro de este grupo, el tipo más utilizado es la turbina Pelton.

-**Pelton.** Esta turbina se emplea en saltos elevados que tienen poco caudal. Estas turbinas disponen de un bajo coste de mantenimiento, además su rendimiento es bastante alto (superior al 90% en condiciones de diseño).

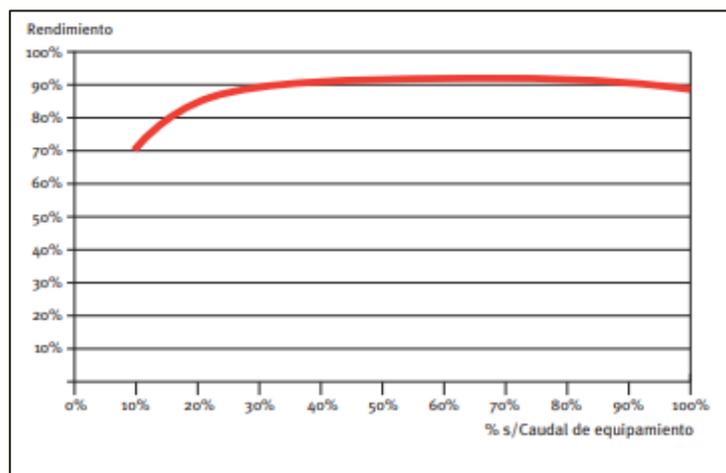


Figura 5 – Rendimiento turbinas Pelton

(Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006)

- b) Turbinas de reacción: este tipo de turbinas disponen de un diseño de rotor el cual les permite aprovechar la presión con la que llega el agua a su entrada para transformarla en energía cinética. Esto provoca que el agua a la salida del rotor tenga una presión inferior a la atmosférica. Las turbinas de reacción más utilizadas son las Francis y la Kaplan.

-**Francis.** Este tipo de turbinas se adapta muy bien a todo tipo de saltos y caudales, y dispone de un rango de funcionamiento muy amplio. En condiciones óptimas de funcionamiento, el rendimiento de las turbinas Francis es superior al 90%.

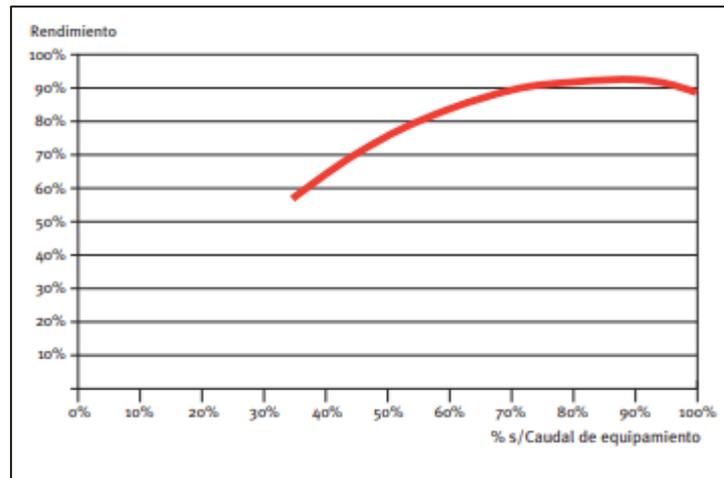


Figura 6 – Rendimiento turbinas Francis

(Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006)

-Kaplan. Este tipo de turbinas contienen un distribuidor regulable que le proporciona un mayor rango de funcionamiento con rendimientos más elevados. Esto hace que sean más complejas y, por consiguiente, que tengan un coste más elevado. El rendimiento ronda el 90% para el caudal nominal y disminuye progresivamente a medida que nos alejamos de él.

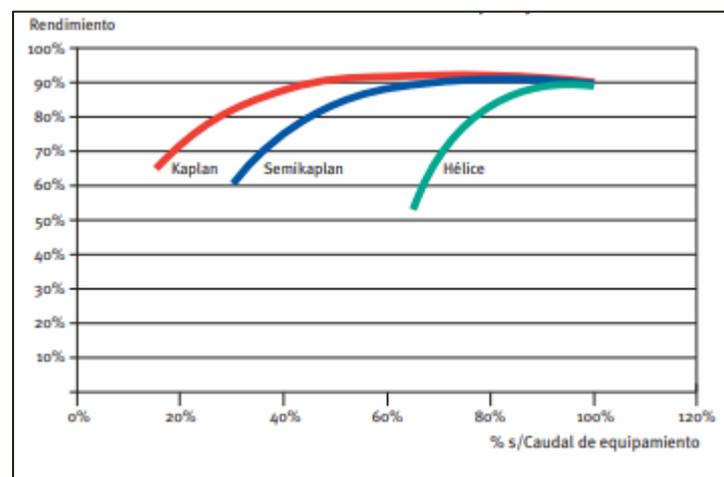


Figura 7 – Rendimiento turbinas Kaplan

(Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006)

- **Generador:** se trata de la máquina que convierte la energía mecánica de rotación de la turbina en energía eléctrica. El principio de su funcionamiento se basa en la ley de Faraday: cuando un conductor eléctrico se mueve en un campo magnético se genera una corriente eléctrica inducida en él.

El generador, o alternador, está compuesto principalmente de dos partes:

- Rotor. Su función es producir un campo magnético variable al girar arrastrado por el eje de la turbina.

- Estátor. Se trata de una pieza estática a la que se enrollan bobinas de cobre sobre las que se produce la corriente eléctrica inducida. En centrales menores de 1000 kW la tensión de trabajo del generador es de 400 ó 660 voltios. Para potencias superiores, la generación se produce en media tensión (3.000, 5.000 ó 6.000 voltios).

- **Transformador de tensión:** dispositivo eléctrico que se encarga de elevar la tensión de salida del generador al nivel de la línea eléctrica más cercana, permitiendo de esta manera el transporte de la energía eléctrica con las mínimas pérdidas posibles.

2.3 Tipos de centrales hidroeléctricas

De acuerdo con (Ministerio de agricultura, alimentación y medioambiente, 2015) las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar principalmente según dos tipos de criterios: la potencia instalada y el modo de operación.

2.3.1 Según la potencia instalada

Teniendo en cuenta su potencia, las centrales hidroeléctricas se clasificarán en dos tipos. La categorización la marcará un valor umbral de potencia instalada, el cual determinará de qué tipo se trata la central. En este caso el valor umbral es de 10 MW y los dos tipos mencionados son los definidos a continuación:

- **Centrales convencionales:** son las centrales que disponen de una potencia superior a 10 MW.
- **Minicentrales:** se trata de todas aquellas centrales que cuentan con una potencia inferior a 10 MW.

2.3.2 Según el modo de operación

Dependiendo de la función que desempeñen y las infraestructuras construidas para poder llevar a cabo dicha función, se distinguen tres tipos de centrales:

- **De agua fluyente**

Las centrales de este tipo utilizan directamente el agua que circula por el río, desviándola por un circuito hidráulico construido de manera artificial hasta la central donde se produce la energía. Finalmente, la corriente de agua es devuelta al cauce fluvial original.

El objetivo de este grupo de centrales es aprovechar el desnivel de un cauce fluvial para convertir directamente la energía potencial del trayecto en energía eléctrica.

Uno de los equipamientos diferenciales de esta clase de centrales es un azud de derivación, el cual se encarga de remansar el agua del río antes de derivarla a través del canal hasta la cámara de carga.

Como en cualquier tipo de central, existirá un edificio donde se encuentran los equipos de generación, los sistemas de regulación y control, los elementos de seguridad y las oficinas. Los transformadores y la subestación de conexión a la red suelen encontrarse anexas al exterior de la central.

En este tipo de centrales, el agua que supera la capacidad del circuito hidráulico continúa aguas abajo del río. Por tanto, no se produce ningún tipo de almacenamiento de energía ni de regulación de caudales. La desventaja de estas centrales reside en que, al no pasar el cauce completo del río por la turbina, no se aprovecha toda la energía posible, desperdiciándose la que generaría el agua que no puede desviarse del cauce fluvial.

Con respecto al régimen de funcionamiento de estas centrales, hay que destacar que funcionan durante todo el día, generando de esta manera energía eléctrica de base.

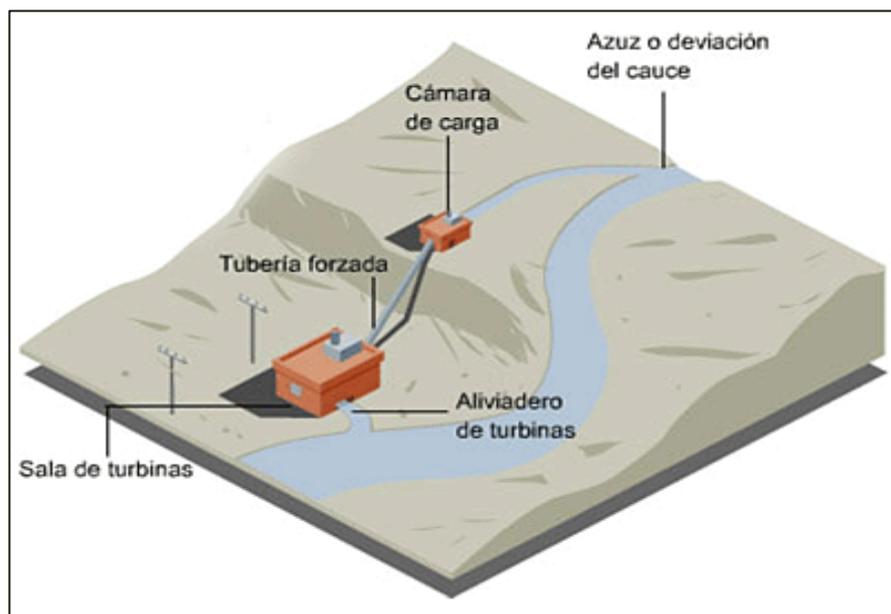


Figura 8 – Central de agua fluyente

(Junta de Andalucía, 2012)

- **De regulación**

Este tipo de infraestructuras hidroeléctricas constan de una presa y su respectivo embalse. Estos dos elementos son fundamentales ya que gracias a ellos se facilita la gestión del agua, y con ello de la energía producida. En ellos se encuentra la toma de agua y, a continuación, las compuertas de regulación, para encauzar el agua hasta la canalización de conducción a presión. Esta canalización mencionada se trata de una galería vertical llamado chimenea de equilibrio, cuya función es amortiguar las ondas de presión que se originan en las maniobras de puesta en marcha o parada rápida, y precede a la tubería forzada que conduce el agua hasta las turbinas.

En muchas ocasiones la central se construye al pie de la presa. En estos casos, la instalación es mucho más simple, ya que se integra todo el circuito hidráulico en el interior de la presa.

Al igual que pasaba en las centrales de agua fluyente, el agua que sale de las turbinas es devuelta por una conducción al río.

Una de las ventajas principales de este tipo de centrales es la facilidad de su puesta en marcha. Partiendo de una detención completa de la instalación, tarda apenas 90 segundos en alcanzar la generación de potencia máxima. Ninguna otra instalación de generación de energía que trabaje con estas potencias arranca con esta rapidez, siendo muy útil para solventar escenarios de desacople o desenganche de la red.

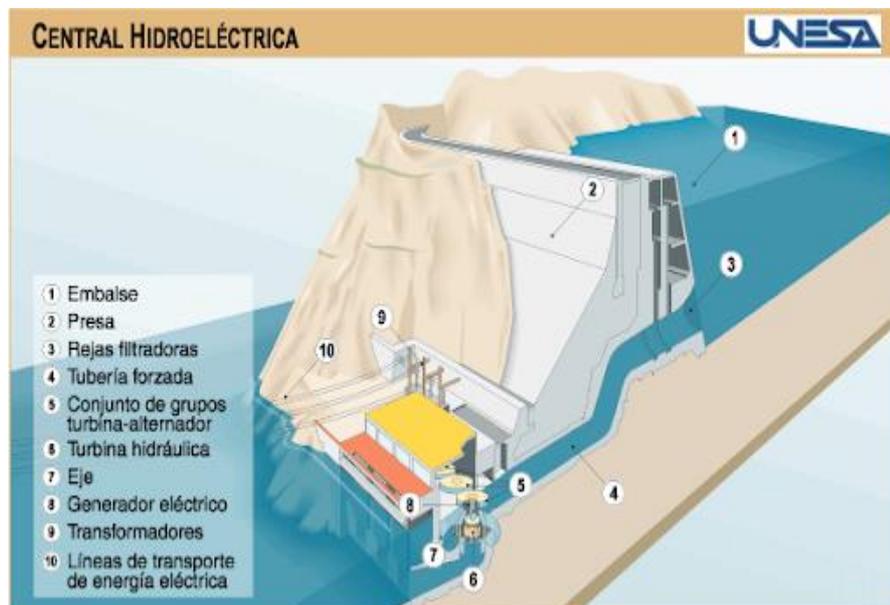


Figura 9 – Central de regulación

(Aelec, 2016)

- **De bombeo**

La demanda de electricidad varía de manera ostensible durante el día y en función de la época del año provocando un funcionamiento muy irregular del sistema eléctrico. Esta irregularidad en la demanda de electricidad ha provocado la aparición de este tipo de centrales.

Las centrales de bombeo funcionan como las centrales de regulación cuando turbinan el agua del embalse superior. La principal diferencia entre las centrales de bombeo y de regulación es que aguas abajo de la central se sitúa un depósito que suele estar formado por otra presa y su embalse, y cuya capacidad será igual o superior al embalse situado aguas arriba. Las centrales de bombeo funcionan como las centrales de regulación cuando turbinan el agua del embalse superior.

En las horas del día en las que la demanda de energía eléctrica es máxima, estas centrales operan como una central hidroeléctrica convencional: el agua cae desde el embalse superior haciendo girar las turbinas produciendo energía eléctrica y quedando almacenada en el depósito inferior. Por el contrario, durante las horas en las que la demanda es menor, el agua del depósito inferior se bombea al embalse superior para que de esta forma se pueda repetir el ciclo productivo.

Las centrales de bombeo cuando turbinan actúan como centrales de regulación, por lo que tienen la ventaja añadida de poseer un tiempo de puesta en marcha muy breve, así como una gran facilidad de regulación.



Figura 10 – Central de bombeo

(Sector electricidad, 2016)

3 FUNCIONAMIENTO DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía potencial, que posee una determinada masa de agua al ser trasladada entre dos puntos de distinto nivel o altitud, y la convierten en energía eléctrica.

Para realizar dicha transformación, se conduce un determinado caudal de agua por un circuito hidráulico que conserva el desnivel entre los dos puntos. Dentro de este circuito, el agua va ganando velocidad conforme la energía potencial se va convirtiendo progresivamente en energía cinética. El equipo que se encarga de convertir esa energía cinética en energía mecánica es la turbina hidráulica, mientras que el generador es el encargado de transformar esa energía mecánica en energía eléctrica.

En la última etapa del proceso, la masa de agua sale de la turbina y desagua al río de nuevo, sin prácticamente velocidad y con la energía potencial correspondiente a la altura del punto de desagüe.

El rendimiento global de todo el proceso descrito es muy elevado (90-95%), ya que se aprovecha prácticamente toda la energía potencial de la masa de agua. Las pérdidas de rendimiento se deben a pérdidas de carga en el circuito hidráulico, a rozamientos en la rotación del grupo hidroeléctrico y a pérdidas en los equipos eléctricos.

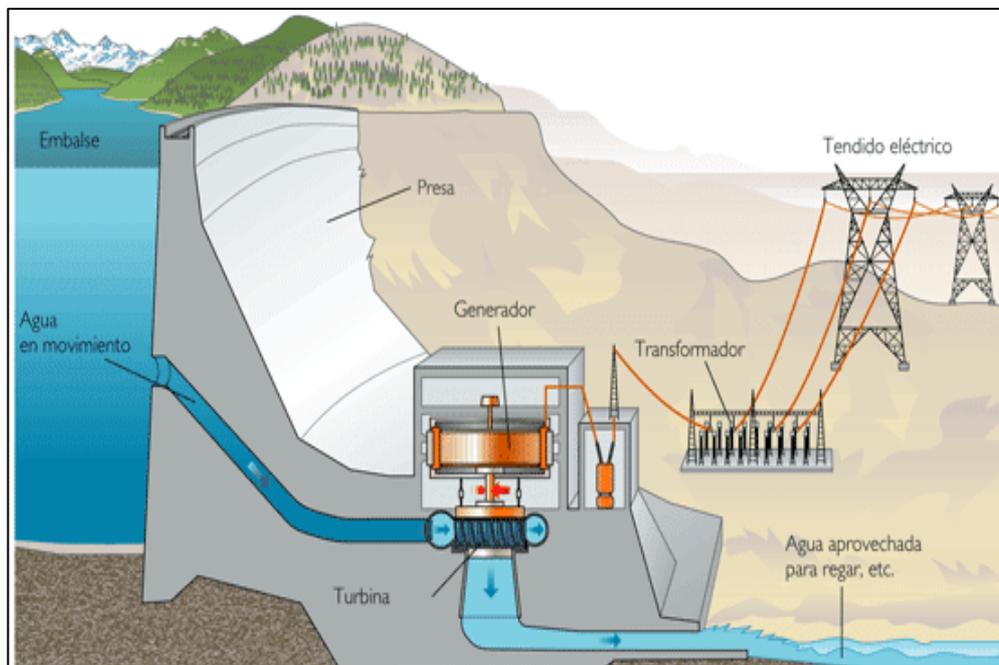


Figura 11 – Esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica
(Secretaría de Medio Ambiente del gobierno de México, 2019)

3.1 Diseño de un aprovechamiento hidroeléctrico

El desarrollo de un proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico se basa principalmente en el cálculo técnico de la cantidad de energía que se podrá generar haciendo uso de los recursos naturales disponibles y los equipos que las condiciones ambientales permitan construir. Esos valores energéticos obtenidos mediante la expresión de la potencia nominal, determinarán la viabilidad económica del proyecto y, por consiguiente, la ejecución o no del mismo.

3.1.1 Parámetros fundamentales

Para poder calcular la potencia nominal suministrada por una central hidroeléctrica es necesario conocer una serie de parámetros que son directamente proporcionales a dicha potencia y que se van a definir en el siguiente apartado (Juan José García-Egocheaga, 2005).

- **Salto útil** (H_u): es la diferencia entre el nivel de la lámina de agua en la cámara de carga y el nivel del punto de desagüe de la turbina. Este parámetro no aparece de forma explícita en el cálculo de la potencia, pero es necesario para obtener el salto neto, el cual si aparece.
- **Salto neto** (H_n): se obtiene al restar al salto útil tanto las pérdidas de carga ocasionadas por el paso del agua a través de la entrada de la cámara de carga, como de la tubería forzada y sus componentes. Una aproximación aceptable es suponer que la pérdida de carga es del orden de entre un 5% y un 10% del salto bruto, el cual se define como la diferencia de altura entre la lámina de agua en la toma y el nivel del río en el punto de desagüe del agua turbinada.
- **Caudal de equipamiento** (Q): se trata del caudal de diseño obtenido a partir de un riguroso estudio sobre el régimen de caudales del río en la zona próxima a la toma de agua, y que tiene como objetivo determinar el equipamiento a instalar, de manera que la energía generada sea la máxima posible.
- **Factor de eficiencia** (e): mide el rendimiento total de la central teniendo en cuenta los rendimientos de los distintos equipos que participan en la generación de la energía. Por tanto, el factor de eficiencia se calcula mediante el producto de los rendimientos individuales de cada equipo como muestra la siguiente expresión:

$$e = R_t * R_g * R_s$$

Siendo:

R_t = Rendimiento de la turbina

R_g = Rendimiento del generador

R_s = Rendimiento del transformador de salida

El rendimiento de la maquinaria variará en función del tipo de equipo y del fabricante. Sin embargo, se puede tomar 0,85 como valor aproximado del factor de eficiencia para una minicentral hidroeléctrica moderna.

3.1.2 Determinación del caudal de equipamiento

El caudal de equipamiento es el parámetro más complejo de obtener ya que será necesario conocer datos de caudales correspondientes a un conjunto de años lo suficientemente amplio como para abarcar años secos, normales y húmedos. Según (Juan José García-Egocheaga, 2005), estos datos referentes a los caudales se pueden conseguir principalmente mediante dos métodos. El primero es a través de una red de estaciones de aforo que recogen datos de caudales de un elevado número de ríos de España. El segundo método se empleará en el caso de que no exista una estación de aforo cercana a la central, se elabora un estudio hidrológico empleando un modelo matemático de simulación que se apoya en los datos de precipitaciones y caudales de una cuenca de similares características, obteniendo de esta forma una estimación de los caudales a lo largo de una serie de años determinados. Una vez conocidos los caudales de una serie de años, el siguiente paso será caracterizar hidrológicamente los años en los cuales se dispone de registro de caudales. Para ello se debe reunir la información de lluvias de las estaciones meteorológicas del entorno, posteriormente se realiza un cálculo correlativo de lluvias y caudales para verificar si existe relación entre la aportación de lluvias y los caudales registrados.

En la figura 12 se muestra, un ejemplo de distribución de precipitaciones para una serie de 15 años.

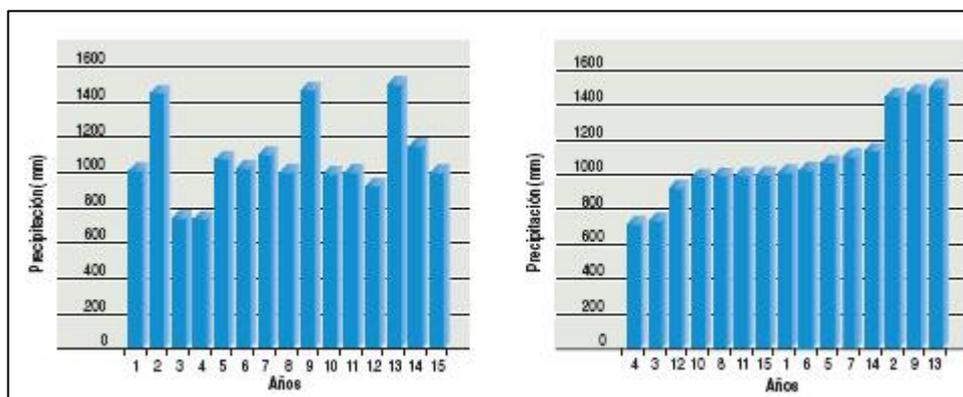


Figura 12 – Distribución y clasificación de las precipitaciones de una serie de 15 años

(Juan José García-Egocheaga, 2005)

Según (Juan José García-Egocheaga, 2005), después de determinar los años normales se cogen los caudales correspondientes a esos años y se calculan los caudales medios diarios. A raíz de estos caudales medios diarios se elabora la curva de caudales clasificados, la cual muestra el número de días del año en los que circula un caudal determinado por el río.

Para concluir, el caudal de equipamiento de la central se adquiere a partir de la curva de caudales clasificados. En dicha curva hay que restar el caudal ecológico, que se trata del caudal mínimo que debe circular por el río en el transcurso del año. El caudal ecológico suele establecerlo el Organismo de Cuenca o las Diputaciones Forales. En caso contrario, una buena aproximación es considerar el caudal ecológico igual al 10% del caudal medio interanual.

Tras haberle restado el caudal ecológico a la curva de caudales clasificados, se escoge el posible caudal de equipamiento en el intervalo de la curva comprendido entre el Q80 y el Q100, siendo el Q80 el caudal que circula por el río durante 80 días al año y el Q100 el que circula durante 100 días al año (figura 13).

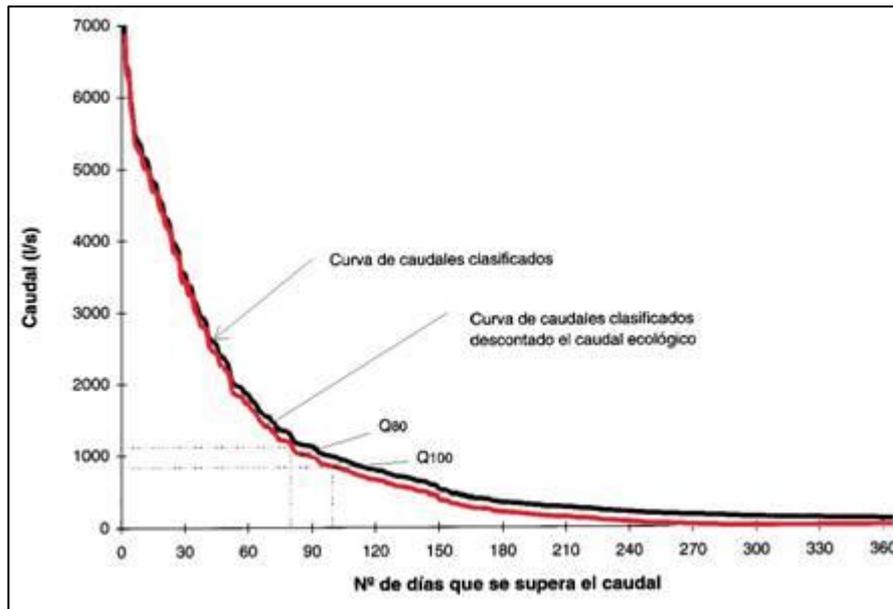


Figura 13 – Curva de caudales clasificados

(Juan José García-Egocheaga, 2005)

Por otro lado, el estudio del caudal de equipamiento también es fundamental en la selección del tipo de turbina que generará la energía eléctrica, la cual constituye otra de las fases dentro del diseño de la central hidroeléctrica.

Para poder llevar a cabo la selección mencionada, será imprescindible el conocimiento de la curva de caudales clasificados comentada anteriormente, ya que cada tipo de turbina tiene un rango de funcionamiento con un caudal máximo y otro mínimo. Dicho caudal mínimo varía según el tipo de turbina para un mismo caudal de equipamiento:

1. Para turbinas Pelton: 10% del caudal de equipamiento.
2. Para turbinas Kaplan: 25% del caudal de equipamiento.
3. Para turbinas Francis: 40% del caudal de equipamiento.

3.1.3 Potencia Nominal

Una central hidroeléctrica contiene una potencia disponible la cual varía dependiendo del caudal de agua disponible para ser turbinado y el salto existente en cada instante. Para obtener la potencia nominal, por un lado, el caudal deberá ser igual al caudal de equipamiento y por otro lado el salto de agua deberá ser igual al salto neto, parámetros que se acaban de definir en el apartado anterior.

Por lo tanto, la expresión que nos proporciona la potencia instalada en kilovatios es la siguiente:

$$P = 9,81 * Q * H_n * e$$

Es de utilidad, para conocer exactamente el origen de la expresión, que la constante de valor 9,81 que aparece, se obtiene del producto de la densidad del líquido por la aceleración de la gravedad terrestre y se mide en kilonewton (kN) por metro cúbico.

Una vez se conozca la potencia es posible calcular la producción media de la central hidroeléctrica, como el producto de la potencia en cada instante por las horas de funcionamiento.

Para la simulación del cálculo de la producción se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Como el caudal es variable en función del tiempo, la energía se calculará en períodos de tiempo en los que el caudal pueda considerarse constante.
2. Respecto al salto, se podrá considerar constante en centrales fluyentes y será variable en centrales de pie de presa (curva Q-H del embalse).

4 CONTEXTO FUENTES RENOVABLES EN EUROPA Y ESPAÑA

En este apartado se analiza la situación actual de las energías renovables, y en particular de la energía hidráulica, dentro del marco europeo y posteriormente dentro del ámbito nacional.

4.1 Energías renovables dentro del marco europeo

Según (SmartGridsInfo, 2021), en 2019 las fuentes de energía renovables representaron el 34 % del consumo bruto de electricidad en la UE, por encima del 32% en 2018.

La energía eólica e hidráulica representaron ambas más de dos tercios de la electricidad total producida a partir de fuentes renovables (35% cada una), y el 30% restante se repartió entre la energía solar (13%), los biocombustibles sólidos (8%) y otras fuentes renovables (9%). La energía solar fue la fuente que percibió el incremento más vertiginoso. En 2008 representó apenas el 1%, creciendo de solo 7,4 TWh en 2008 a 125,7 TWh en 2019.

Como puede observarse en la gráfica de la figura 13, Austria (75%) y Suecia (71%) son los Estados miembro donde mayor electricidad se consumió en 2019 a partir de energía generada de fuentes renovables. El consumo de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables también fue elevado en Dinamarca (65%), Portugal (54%) y Letonia (53%). Sin embargo, en el extremo opuesto, hubo países como Chipre, Luxemburgo y Hungría (todos al 10%), o Malta (8%) donde la proporción de electricidad procedente de fuentes renovables fue del 10% o menos.

El crecimiento de las energías renovables durante la pandemia, en parte gracias a los planes de recuperación, ha provocado que la Agencia Internacional de la Energía (IEA) actualice las previsiones que publicó en noviembre de 2020. Por ello, ha hecho público en mayo de 2021 un nuevo informe en el cual se aumenta hasta en un 25% las previsiones para 2021.

En este último informe emitido (Renewable Energy Market Update 2021, 2021), la IEA asegura en primer lugar que en 2020 la potencia total instalada de las fuentes renovables aumentó hasta 280 gigavatios, lo que supone un incremento de más del 45%, la mayor subida interanual desde 1999.

Por otro lado, también en el mismo informe, la IEA pronostica que Europa se convertirá, por detrás de china, en el segundo mercado de las energías renovables, con una subida de hasta 44 gigavatios (11%) en 2021 y hasta 49 gigavatios en 2022. Alemania seguiría siendo el Estado líder dentro de la Unión Europea, seguida de Francia, Holanda, España, Reino Unido y Turquía.

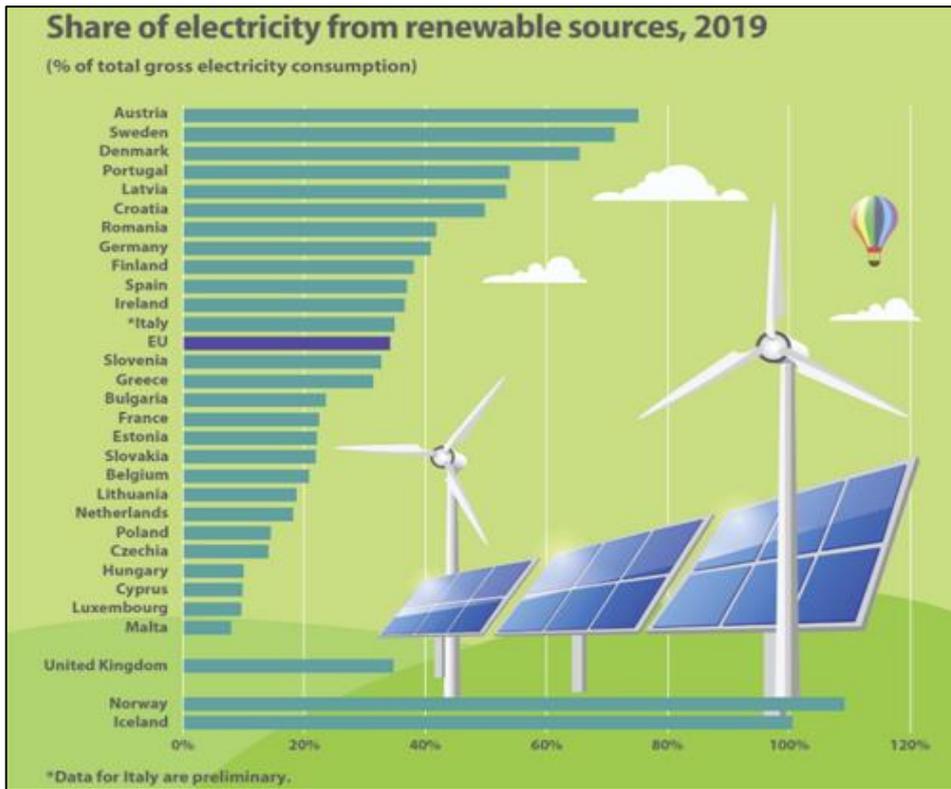


Figura 14 – Porcentaje de energía consumida a partir de fuentes renovables sobre el total (SmartGridsInfo, 2021)

4.2 Energía Hidráulica en España

Según (El Agora Diario, 2020), en España, la producción hidroeléctrica anual es muy fluctuante y está sujeta en gran parte a las precipitaciones. En años húmedos sobrepasa los 40.000 GWh, sin embargo, en años secos no alcanza los 25.000 GWh, siendo la media de los últimos años 32.500 GWh, lo que supone un 17% de la producción anual.

En la actualidad, el 88% de la producción hidráulica anual es generado por las centrales convencionales, incluidas dentro de éstas las centrales de bombeo, que equivale, de manera aproximada, a 29.000 GWh. El 12% restante es producido por las minicentrales, que equivale a 4.000 GWh. En la actualidad existen más de 1.350 centrales hidráulicas, de las cuales 1.200 son minicentrales.

En las figuras 14 y 15 se muestra la potencia hidráulica instalada en España en los últimos 10 años, así como la instalada en España en 2019 clasificada por comunidades autónomas.

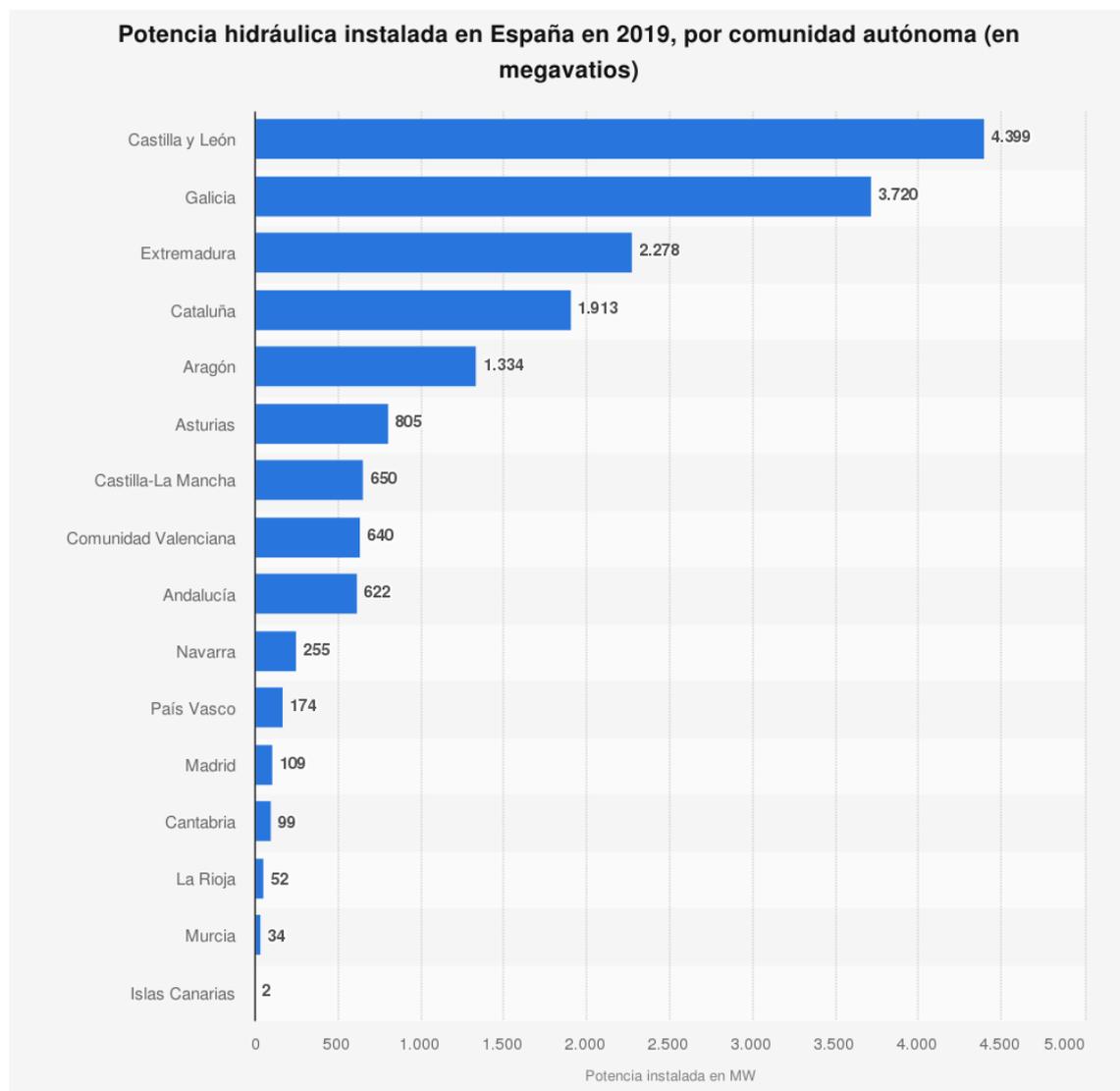


Figura 15 – Potencia hidráulica instalada en España en 2019
(Statista, 2019)

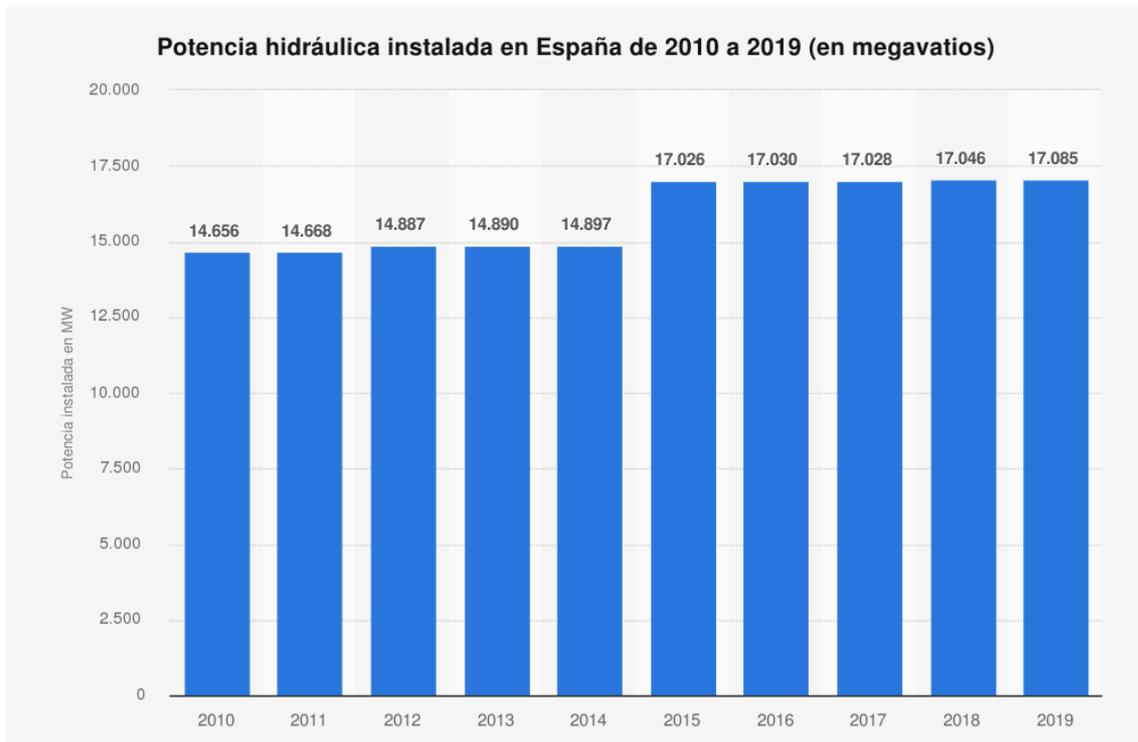


Figura 16 – Potencia hidráulica instalada en España de 2010 a 2019
(Statista, 2019)

5 LEGISLACIÓN SOBRE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN ESPAÑA

La legislación y normativa susceptible de considerarse en las diferentes fases de diseño, instalación y explotación de las Centrales Hidroeléctricas en España es muy extensa; por lo que este capítulo se centra en los dos aspectos más relevantes: de una parte, la obtención de la concesión de la explotación, y de otra parte el impacto ambiental que estas producen.

Concesiones hídricas para el aprovechamiento hidroeléctrico

El título IV del RDL 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (TRLA) y el título II del RD 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico desarrollan fundamentalmente la regulación vigente sobre usos y aprovechamientos del dominio público hidráulico.

Esta normativa viene a clasificar los usos y aprovechamientos del dominio público hidráulico de acuerdo a su exclusividad y establecen una serie de instrumentos administrativos (declaración responsable, autorización y concesión) que es necesario obtener previamente a la realización del uso o aprovechamiento.

Estos títulos son otorgados, con carácter general, por los Organismos de Cuenca o Confederaciones Hidrográficas en cuencas intercomunitarias, salvo en "casos de obras y actuaciones de interés general del Estado", que corresponderán al Ministerio con competencia en materia de aguas, actualmente el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, de acuerdo al artículo 24 a) del TRLA. En las cuencas intracomunitarias la competencia es de las administraciones autonómicas (artículos 17, 18 y 24 del TRLA). Estos órganos (Confederaciones Hidrográficas en cuencas intercomunitarias y administración autonómica en cuencas intracomunitarias) también son competentes en el control y vigilancia de los usos y aprovechamientos del dominio público hidráulico en general, incluyéndose el control del cumplimiento de lo establecido en las concesiones de toda índole.

Además del agua que forma parte del ciclo hidrológico, como se menciona en el art 2 del TRLA también son bienes de dominio público hidráulico los "terrenos conformados por los cauces de corrientes naturales, continuas y discontinuas y los lechos de lagos lagunas y embalses".

Principales etapas del procedimiento

De acuerdo al art.93 del RDPH, "el procedimiento ordinario de otorgamiento de concesiones se ajustará a los principios de publicidad y tramitación en competencia, prefiriéndose, en igualdad de condiciones, aquellos que proyecten la más racional utilización del agua y una mejor protección de su entorno".

En la siguiente figura se detallan los hitos más importantes en el procedimiento de concesión de explotación recogidos en el RD 916/1985 de 25 de mayo, RD 849/1986 de 11 de abril Art.104 y RD 249/1988 de 18 de marzo.

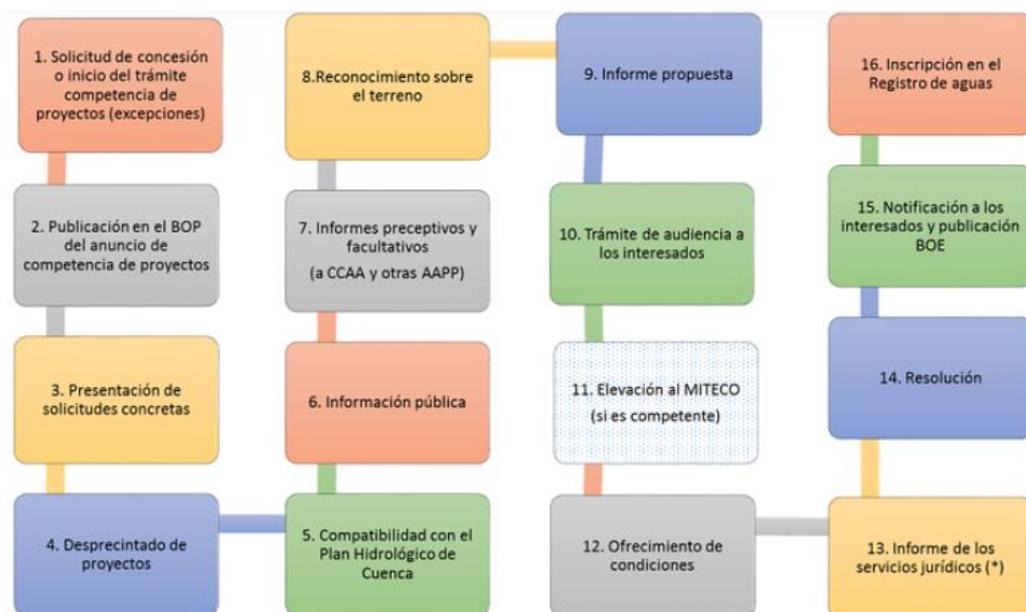


Figura 17 – Esquema del procedimiento de concesión de explotación (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021)

Para la otorgación de concesiones es fundamental tener en consideración la explotación racional conjunta de los recursos hidrológicos, tanto superficiales como subterráneos. El título de concesión no garantiza la disponibilidad de los caudales concedidos. Su otorgamiento deberá respetar, en todo momento, las perspectivas de los Planes Hidrológicos. La concesión mencionada tendrá un carácter temporal, con un plazo igual o inferior a 75 años.

La concesión será discrecional, si bien debe estar debidamente motivada y arrogada en función del interés público.

Es importante tener presente que los caudales ecológicos no pueden considerarse un uso, sino una restricción que se aplica con carácter general a los sistemas hidrológico en explotación. Si bien, se aplicará también a los caudales ecológicos la norma de preferencia del uso para abastecimiento de poblaciones recogida en el artículo 60.3 del TRLA. Estos caudales ecológicos vienen fijados en los Planes Hidrológicos de las cuencas hidrográficas.

Toda concesión otorgada debe incluir los elementos, recogidos en el artículo 102 del RDPH y en el caso de concesiones de aguas subterráneas, además los elementos especificados en el artículo 187 del RDPH. Al mismo tiempo, la concesión recogerá un condicionado general y específico, en cumplimiento del artículo 61 del TRLA y del artículo 115 del RDPH. En el caso de aguas subterráneas, el artículo 184 del RDPH.

El Organismo de cuenca puede instruir y tramitar la revisión de la concesión si se da alguno de los supuestos recogidos en el artículo 65 del TRLA como son la modificación de los supuestos que llevaron a su otorgamiento, o una nueva adecuación a los Planes Hidrológicos. La revisión supone supondría la modificación de la concesión.

En el artículo 53 del TRLA se detallan los motivos que pueden llevar a la extinción de la concesión; siendo básicamente: el término del plazo, incumplimiento de las condiciones. la no utilización del aprovechamiento durante más de tres años, la expropiación forzosa o por renuncia.

La autorización de instalaciones electromecánicas y líneas necesarias para la explotación

La autorización de la instalación electromecánica y línea eléctrica se debe tramitar a la vez que la correspondiente a la concesión hidrológica, ante los correspondientes órganos competentes de las Comunidades Autónomas en materia de industria y energía, siguiendo los procedimientos regulados por RD 1955/2000, de 1 de diciembre.

Los hitos más significativos serían:

- **Solicitud** de la concesión, acreditando fundamentalmente la capacidad legal, técnica y económica del solicitante y el proyecto o anteproyecto electromecánico y de la línea.
- **Aprobación** del proyecto, una vez obtenida la correspondiente autorización de la instalación.
- **Conexión a la red de distribución**, siguiendo el procedimiento establecido para la conexión a la red de distribución de energía eléctrica (Orden Ministerial de 05/09/85). Este trámite viene condicionado en gran medida por la distribuidora eléctrica de la región.

Principales exigencias de aplicación a la energía hidroeléctrica con arreglo a la legislación europea y Nacional sobre conservación del medio natural

La Directiva Europea de Energías Renovables, cuando hace referencia a los objetivos energéticos de la UE para 2020-2030, le concede un papel relevante a la energía hidroeléctrica. Según datos de 2011, la UE tenía en ese momento 23.000 instalaciones de energía hidroeléctrica; de las cuales la mayoría (91%) eran pequeñas centrales hidroeléctricas de menos de 10MW, que generaban tan solo un 13% de la producción. Una industria muy atomizada repartida por el territorio.

Si bien las instalaciones hidroeléctricas se encuentran frecuentemente en zonas de montaña, su afección ambiental se da sobre todo en los cauces fluviales y lagos. Esta afección suele ser inversamente proporcional a la entidad del sistema fluvial o lacustre.

Las políticas sobre biodiversidad y conservación del medio ambiente de la UE se fundamentan en las Directivas sobre los hábitats (*Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres*) y sobre las aves (*Directiva 2009/147/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de noviembre de 2009 relativa a la conservación de las aves silvestres*). El objetivo principal de las estas Directivas es garantizar que las especies y ecosistemas que protegen se mantengan y/o restituyan en un estado de conservación óptimo para en su área de distribución.

En este sentido estas Directivas de protección de la naturaleza de la UE demandan a los países miembros que apliquen dos tipos cardinales de medidas; de una parte la nominación y conservación de espacios clave para la protección de especies y ecosistemas, siendo estos espacios naturales los que ; constituyen la Red Natura 2000. Y de otra el desarrollo de un régimen adecuado de protección de todas las especies incluidas en la Directiva sobre hábitats.

Una instalación hidroeléctrica, como las consideradas en este trabajo, pueden tener una afección muy dispar sobre las especies y los ecosistemas, dependiendo fundamentalmente de las características del sistema fluvial o lacustre. Además, hay que tener presente que las afecciones pueden producirse en cualquier fase del ciclo de vida de una instalación hidroeléctrica, desde su construcción inicial hasta su renovación, pasando por funcionamiento y gestión diarios, incluso durante su desmantelamiento.

De forma simplificada las principales afecciones sobre las especies y los ecosistemas que puede producir una instalación hidroeléctrica serían:

- Transformaciones en la morfología del río y sus ecosistemas.
- Lesiones y muerte de animales y plantas.
- Alteración sustancial de los ciclos de inundaciones estacionales
- Alteraciones del régimen de caudales ecológicos
- Transformaciones del régimen de caudales por centrales hidrológicas de punta
- Contaminación química y térmica.
- Frenos a la migración y propagación de especies protegidas.
- Desplazamiento y perturbaciones
- Modificación de la dinámica sedimentaria.
- Otros efectos sobre especies y ecosistemas terrestres contiguos.

En el ámbito nacional, las minicentrales hidroeléctricas deben someterse a una Evaluación de Impacto Ambiental simplificada, al estar incluidas en el listado de proyectos del Anexo II de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Estas infraestructuras se encuentran recogidas en el Grupo 4: *“Industria energética, apartado d) Instalaciones para la producción de energía hidroeléctrica y b) Construcciones para la transmisión de energía eléctrica con un voltaje igual o superior a 15 kV que tenga una longitud superior a 3 kilómetros”*.

El Estudio de Impacto Ambiental, como parte integrante del proceso de Evaluación recogido en la normativa ambiental vigente, tiene como objeto conocer los efectos ambientales producidos por las distintas operaciones consideradas en la instalación de la Central Hidroeléctrica: fases de ejecución (construcción, puesta en marcha y disposición final de las instalaciones), funcionamiento y de abandono.

6 CRITERIOS PARA LA UBICACIÓN DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

En este capítulo, se van a definir los parámetros que se han considerado más adecuados para determinar la mejor ubicación posible de una central hidroeléctrica en la región de Andalucía, al sur de España.

Es conveniente recalcar que algunos criterios expuestos en este apartado no están fundamentados en ningún marco normativo. Estos han sido elegidos por criterio propio (aplicando la lógica y tratando de obtener la mayor rentabilidad económica junto con las mejores medidas de seguridad posibles); y otros han sido considerados a partir de otras referencias como (Universidad Politécnica de Madrid, 2015).

- **Presencia cercana de centrales hidroeléctricas:** la proximidad de dos centrales hidroeléctricas incumpliría el principal objetivo que se busca con este trabajo, ya que no se trataría de una ubicación óptima, ya que sus áreas de influencia podrían solaparse.
- **Jerarquía de cauces fluviales:** se trata de un sistema de clasificación de cursos fluviales, el cual se basa en la forma que tiene el río de ramificarse dentro de cualquier cuenca hidrográfica. Los tipos se han clasificado siguiendo un orden dentro de una jerarquía que se precisa a continuación: los ríos de primer orden son aquellos que no disponen de afluentes; los de segundo orden se constituyen al producirse la unión los de primer orden; los de tercer orden se constituyen al unificarse los de segundo, y así repetidamente hasta los de sexto orden que es el orden máximo dentro de dicho sistema.
Esta clasificación jerárquica aportará un valor cualitativo sobre el caudal de los cauces fluviales, el cual, como ya se detalló en el apartado anterior, es un parámetro determinante en el cálculo de la potencia de una central hidroeléctrica.
- **Distancias a líneas eléctricas:** una central con estas condiciones debe de estar conectada a líneas de alta tensión para a través de ellas poder transportar la energía hasta los distintos puntos de consumo. Para eludir grandes obras que establezcan una conexión a la red existente, teniendo en cuenta que pueden elevar mucho la inversión inicial del proyecto, y de esta forma poder transportar la energía con la mayor eficiencia posible, la central deberá estar lo más cerca posible a una línea eléctrica de alta tensión.
El vano eléctrico, que es la distancia entre postes que sustentan las líneas eléctricas, varía según algunos criterios como la separación de conductores o las características mecánicas del poste, pero suele rondar entre los 100 y los 300 metros como máximo. Esta información será relevante a la hora de definir los rangos dentro del análisis multicriterio.

- **Capacidad**: en las centrales hidroeléctricas cuanta mayor capacidad tenga el embalse, mayor será la energía eléctrica en reserva. Por ello, se buscan embalses que almacenen un gran volumen de agua. La disposición de una central hidroeléctrica a pie de presa permite emplear la capacidad del embalse generado por dicha presa para incrementar la turbinación en los periodos en los que el caudal fluyente es pequeño; y en el extremo opuesto, almacenar total o parcialmente el caudal fluyente en periodos donde el nivel del río es más elevado o cuando no se necesita generar energía.
- **Cercanía a espacios protegidos**: según el estudio (Impactos Ambientales de la producción de electricidad, 2014), “el sistema energético que produce menores impactos sobre el medio ambiente es el de las minicentrales hidroeléctricas”. No obstante, la construcción y la infraestructura de las centrales hidroeléctricas provocan distintos efectos ambientales que, aunque sean inferiores comparados con otras fuentes de energía, se han de tener en cuenta. Entre otros podemos señalar que: provocan una alteración en el terreno que les rodea, en el ciclo de vida de la fauna, en el nivel de las capas freáticas, en la composición del agua embalsada y en el microclima. También obstaculiza la navegación fluvial y el transporte de materiales aguas abajo (nutrientes y sedimentos, como limos y arcillas). Sin embargo, estos efectos negativos no son irreversibles y pueden ser contrarrestados si se evalúan detalladamente y se adoptan medidas correctivas. Por todo lo explicado anteriormente, se impondrá como criterio que, cuanto más lejos se ubique la central hidroeléctrica de zonas protegidas, mejor solución será dicha central.
- **Precipitaciones**: el registro de precipitaciones en la zona en la que se localice la central también supondrá un criterio a tener en cuenta, ya que cuanto mayor reserva de agua tenga la central a lo largo del año, mayor margen de maniobra tendrá para producir energía.
- **Proximidad a núcleos urbanos**: la cercanía a zonas urbanas es una característica fundamental en este tipo de instalaciones, ya que cuanto más cerca esté de un núcleo de población y, por consiguiente, cuanto mayor sea el número de habitantes de éste, más productiva será. De esta forma, suministrará energía a una mayor cantidad de personas en menor tiempo y con menor coste de transporte.

7 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

A continuación, tras haber contextualizado y definido el objeto de análisis de este proyecto, es decir, las centrales hidroeléctricas, se va a introducir y detallar la herramienta que se utilizará para tratar de localizar una central hidroeléctrica dentro de la región de Andalucía.

Dicha herramienta será un sistema de información geográfica, la cual se ha convertido, gracias a la actual era de la información, en una herramienta tecnológica e innovadora con aplicaciones infinitas dentro de ámbitos muy diversos.

7.1 Introducción histórica de los SIG

De acuerdo con (Aeroterra, 2019), el primer SIG informatizado del mundo fue creado por el geógrafo inglés Roger Tomlinson en 1963, como resultado del trabajo que le encargó el gobierno canadiense de crear un inventario de los recursos naturales del país, el cual fuese fácilmente gestionable. Tomlinson diseñó la computación automatizada para almacenar y procesar amplios volúmenes de datos acerca de los recursos naturales de todas las provincias, lo que permitió a Canadá comenzar su programa de gestión parcelaria nacional.

Dos años más tarde, en 1965 se estableció el laboratorio de la Universidad de Harvard para gráficos por computadora. Dicho laboratorio, en el cual se desarrollaron los primeros *softwares* de creación de mapas, pronto se transformó en un centro de investigación para el análisis espacial en el que colaboraban un conjunto de reconocidos geógrafos, planificadores, expertos de la computación y otros muchos de diversos campos.

Uno de los miembros del laboratorio de Harvard mencionado anteriormente, Jack Dangermond, fundó en 1969 el Instituto de Investigaciones de Sistemas Ambientales, también conocido como *ESRI* (*Environmental Systems Research Institute*), que hacía mapas con ordenador y análisis espacial para apoyar tanto a los planificadores territoriales como a los administradores de recursos de la tierra, a tomar decisiones bien fundamentadas.

Al mismo tiempo que los ordenadores se volvieron más eficientes, *ESRI* mejoró las herramientas de su *software*. El primer producto GIS que *ESRI* lanzó al mercado fue *ARC/INFO*, en 1981. Dicho producto trató de suplir la necesidad de analizar un número creciente de proyectos de forma más efectiva.

En la actualidad, gracias a la evolución de campos como la informática, las telecomunicaciones, la electrónica o la nanotecnología entre otros, existen múltiples medios para obtener, compartir y almacenar un número casi infinito de datos de cualquier ámbito que nos rodea. Así, aplicaciones como los SIG permiten manipular, analizar y entender dicha información geográfica con el fin de revelar patrones, tendencias y relaciones que ayuden a solucionar problemas de difícil gestión y tomar decisiones.

Existen una gran cantidad de SIG tanto de formato propietario, como *ARC/INFO* o *Geomedia*, como de código abierto y gratuitos como *gvSIG* o *QGIS*, además de la tendencia cada vez más creciente de gestionar directamente bases de datos geográficas, como en el caso de usar *Postgree* (*PostGIS*).

7.2 Definición

Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas que permiten operar con datos referenciados a través de coordenadas espaciales o geográficas de análisis y a su vez, ofrecen la posibilidad de analizar dichos datos con el objetivo de determinar las relaciones espaciales de los elementos que se estudian.

La principal diferencia que hay entre un SIG y otros componentes de *software* gráficos reside en que el SIG, aparte de ser una aplicación gráfica con una amplia variedad de operaciones posibles, contiene una base de datos espacial, esto le concede una cualidad incomparable en el tratamiento de análisis orientados a solventar problemas reales que se desarrollan en el espacio geográfico.

El SIG acumula información cartográfica digital, a la cual se agrega una información con diversos atributos y que se clasifica mediante tablas. Los datos geográficos almacenados en las tablas permiten efectuar análisis, consultas, gráficos e informes relacionados con los datos espaciales.

7.3 Modelo de datos

Como se ha manifestado en los apartados anteriores, la base que sustenta el funcionamiento de los SIG y que permite cumplir el objetivo con el que fueron creados es una base de datos, la cual se asocia a través de un identificador común a los elementos gráficos de un mapa digital. Esta relación permite conocer los atributos de un objeto que es señalado en el mapa y de manera inversa, preguntando por un determinado criterio en la base de datos se puede conocer su localización en la cartografía.

Dicha información geográfica se puede dividir en dos grandes grupos según el formato de los datos, es decir, en función de la manera en la que se estructura la información.

Vectorial

La representación de los datos espaciales se realiza mediante tres geometrías básicas: puntos, líneas y polígonos.

En el modelo vectorial cada punto equivale a una coordenada o nodo, la cual puede tener un conjunto de atributos asignados. En este modelo, las líneas se representan mediante la unión por cadenas o arcos de dos o más nodos, generando de este modo la forma de una línea. Y finalmente, las áreas o polígonos están representados por un conjunto de puntos o líneas encadenados entre sí. Sin embargo, al contrario que en la línea, en el caso de los polígonos la coordenada inicial y final son la misma, generando de esta forma una superficie o polígono.

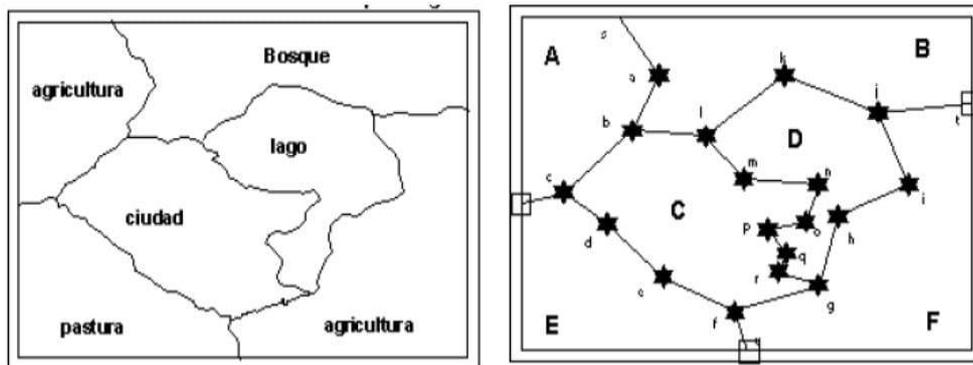


Figura 18 – Ejemplo de representación de la realidad mediante un modelo vectorial.
(Ingeoexpert, 2019)

Ráster

En el modelo ráster, a diferencia del modelo vectorial, no existen ni los puntos, ni las líneas ni los polígonos, por lo que la realidad se representa por una malla regular que contiene una serie de atributos o propiedades. Dichos atributos serán los que permitan distinguir entre categorías. La malla regular está desarrollada por un conjunto de celdas o píxeles, cuyo tamaño determinará la resolución de la imagen.

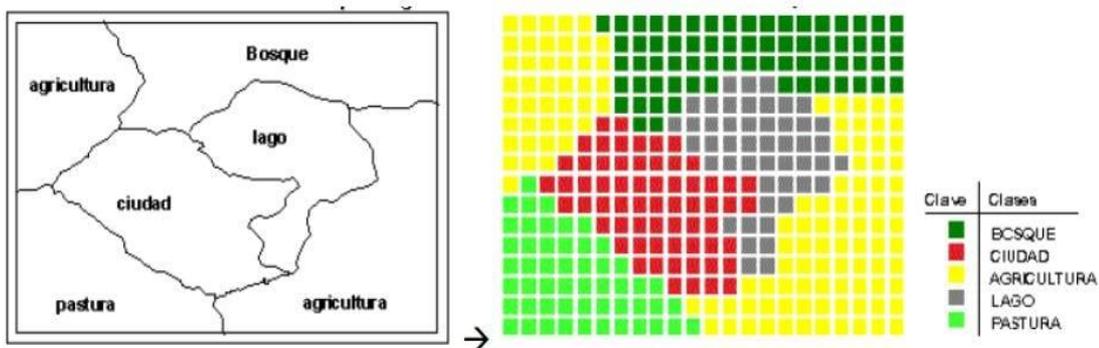


Figura 19 – Ejemplo de representación de la realidad mediante un modelo ráster
(Ingeoexpert, 2019)

7.4 Funcionamiento de los SIG

Para entender el funcionamiento de un SIG se aconseja imaginarlo como un conjunto de subsistemas, donde cada uno de ellos tiene asignadas una serie de funciones particulares. Se considera que hay tres subsistemas fundamentales (Geopaisa, 2017):

- **Subsistema de datos:** controla las operaciones de entrada y salida de los datos, así como la gestión de éstos dentro del SIG. Contribuye a que el resto de los subsistemas pueda acceder a los datos y puedan ejecutar sus funciones según los datos recogidos.
- **Subsistema de visualización y creación cartográfica:** es el encargado de crear representaciones gráficas (mapas, leyendas, etc.) utilizando los datos. También se encarga de la edición de los datos.
- **Subsistema de análisis:** alberga métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos.

Profundizando un poco en las funciones que cumplen dichos subsistemas se pueden distinguir cuatro funciones principales que se detallan a continuación (Morea Rodríguez & Huerta Rodríguez, 2011):

- a) **Incorporación de la información.** Dentro de esta función se incluye tanto la digitalización de los datos geográficos como su integración en las bases de datos del sistema. Previamente, es necesario efectuar un exhaustivo análisis de la información necesaria dotar el trabajo de una estructura adecuada.
- b) **Gestión de la información.** El sistema debe poder gestionar toda la información añadida, permitiendo realizar búsquedas de diversos tipos: temáticas, espaciales y con la posibilidad de selección multicriterio para su consecuente análisis. Los datos gestionados pueden ser geográficos y relacionados con atributos.
- c) **Análisis de la información.** Esta función se trata del elemento característico de los SIG. Posteriormente a la preparación de los datos (apartados A y B) se emplean procedimientos de análisis territorial para la elaboración de resultados. Los resultados serán más certeros cuanto mejor sea la calidad de los datos y más consistentes sean las hipótesis planteadas.
- d) **Interrelación con el usuario.** Todo el procedimiento detallado en los puntos anteriores debe finalizar en una relación práctica y amigable con el usuario, de manera que pueda escoger la salida de los resultados obtenidos que considere oportuna en función de los objetivos perseguidos. Un SIG debe poder ofrecer salidas tales como mapas, gráficos o base de datos. Además, debe permitir la salida en distintos soportes, tanto por papel, como por pantalla, o en ficheros digitales.

8 REALIZACIÓN DEL TRABAJO

En este apartado se va a detallar tanto el proceso que se ha seguido como las herramientas que se han utilizado para cumplir el objetivo de este proyecto, el cual consiste, como se ha explicado anteriormente, en encontrar la mejor localización posible para una central hidroeléctrica en la comunidad autónoma de Andalucía.

Para resolver el problema de la localización, se han considerado un método de análisis multicriterio que permita la toma de decisiones según los criterios expuestos en el apartado 6. Con el fin de su resolución efectiva, se ha empleado una aplicación informática SIG, en concreto, QGIS (QGIS, 2021). Se trata de un *software* libre de código abierto con multitud de herramientas y opciones para manipular y analizar datos geográficos. A lo largo de este apartado comentaremos algunas de las numerosas herramientas que se han empleado para la elaboración del trabajo.

El análisis multicriterio es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones durante el proceso de planificación que permite integrar diferentes criterios en un solo marco de análisis para dar una visión integral. Aplicado a los SIG, cada uno de los criterios establecidos tendrá asociado un peso; como datos de partida se considerarán una serie de capas con información temática; sobre dichas capas se trabajará utilizando las herramientas integradas en el SIG de manera que, como consecuencia de la aplicación de dichas operaciones, se generarán nuevas capas resultantes. La superposición de estas capas resultantes (cada una con su peso) determinará la solución final, que en este caso será la ubicación de la central hidroeléctrica.

8.1 Datos de partida

De los dos formatos de datos posibles que se han definido en apartados anteriores, se ha considerado el modelo vectorial como el más conveniente para la realización de este proyecto. Por ello, toda la información geográfica obtenida y sobre la cual se ha trabajado se encuentra en el formato vectorial *shapefile* (.shp).

La mayoría de los datos geográficos que se han manejado han sido descargados de manera gratuita de la página web del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2021). Dentro de dicha web existe un apartado denominado Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA), el cual contiene una amplia recopilación de bases cartográficas con diversos formatos y sobre múltiples temáticas (*relieve, hidrografía, transportes, comunicaciones, divisiones administrativas, infraestructuras energéticas*, etc) todas ellas comprendidas dentro de los límites de Andalucía. Así mismo, dentro del DERA también aparecen dos bloques de datos espaciales (*Contexto España y Contexto Mundo*) 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.

Aunque la mayoría de información espacial se ha obtenido del DERA, algunos datos cartográficos como los núcleos de población o los límites provinciales, ambos referidos a la comunidad autónoma de Andalucía, se han descargado del Centro Nacional de Información Geográfica (Centro Nacional de Información Geográfica, 2021), un organismo autónomo adscrito al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, a través de la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Entre otras funciones destaca por distribuir, promocionar y comercializar datos, productos, servicios y aplicaciones geográficas de carácter oficial generados por IGN y CNIG.

Tanto las bases cartográficas del DERA como las del CNIG se pueden descargar en formato *shapefile* (.shp), se representan en el sistema de referencia geodésico ETRS89 y se proyectan en UTM huso 30,

que es el huso que abarca casi el territorio español por completo, así como la mayor parte de la región de Andalucía, que es el ámbito geográfico de este trabajo.

El mapa base sobre el que se han superpuesto todas las capas descargadas y generadas en la realización de este proyecto, se ha conseguido de OpenStreetMap (OpenStreetMap, 2021). Gracias al *plugin* “OSM Downloader” se carga de manera automática el archivo “.osm” como capa dentro del programa QGIS.

8.2 Análisis multicriterio

La solución que trata de obtener la realización de este proyecto se basa en el análisis multicriterio ponderado. El procedimiento de dicho análisis constará de dos fases que se detallan a continuación:

1. Acotación de las posibles soluciones: en esta primera etapa cada parámetro tendrá un valor asignado en función de la importancia que posea para poder llevar a cabo el emplazamiento de una central hidroeléctrica. Los valores de dichos parámetros están comprendidos entre 0 y 1, así mismo la suma de todos es igual a 1 como refleja la tabla 1. Posteriormente, se realizará un análisis a cada uno de los parámetros de manera individual, asignando una serie de coeficientes de puntuación relativa (pesos) según el efecto que tengan determinados rangos de dichos parámetros. Al final de esta fase, cada embalse tendrá una puntuación total como resultado de la aplicación de todos los parámetros con sus respectivos coeficientes. De todos los embalses resultantes como posibles soluciones, se seleccionarán los dos con mayor puntuación para que se analicen en la siguiente etapa.
2. Elección de la solución final: en esta etapa, los dos embalses que obtengan mejor puntuación en la anterior fase serán sometidos a un nuevo sistema de puntuación ponderada, el cual estará basado en el criterio de proximidad a núcleos urbanos. El que tenga mayor puntuación de los dos según este último criterio será propuesto como la mejor solución posible.

Los parámetros considerados en este análisis, los cuales se han definido en apartados anteriores, son los siguientes:

1. Jerarquía cauces fluviales
2. Capacidad de los embalses
3. Distancia a líneas eléctricas
4. Precipitaciones
5. Distancia a espacios protegidos
6. Proximidad a núcleos urbanos
7. Presencia de central hidroeléctrica (excluyente)

Jerarquía cauces fluviales	Capacidad	Redes Eléctricas	Precipitaciones	Espacios Protegidos	Presencia de Centrales Hidroeléctricas
0,35	0,25	0,15	0,15	0,1	0/1

Tabla 1. Coeficientes (pesos) en función de la importancia de cada criterio

8.2.1 Jerarquía de cauces fluviales

Con cada uno de los criterios que se detallan en este apartado se ha seguido el mismo procedimiento. En primer lugar, se descargan las capas con la información cartográfica necesaria para analizar dicho criterio y abrirlas en el programa QGIS, en este caso se ha descargado la capa *ríos* del DERA.

Posteriormente, se establecen unos rangos en los que se clasifica el criterio analizado y se le asigna una puntuación a cada uno de esos rangos. Para este criterio, se ha dividido los cauces fluviales según su jerarquía en seis órdenes; sin embargo, al orden 6 no se le ha asignado puntuación ya que no afecta a ningún embalse de los analizados. Dicha puntuación queda reflejada en la tabla 2.

Jerarquía	Primer orden	Segundo orden	Tercer orden	Cuarto orden	Quinto orden
Puntuación	1	2	3	4	5

Tabla 2. Puntuación relativa a la jerarquía de los cauces fluviales

Por último, se genera una capa con el objetivo de visualizar gráficamente los rangos establecidos a los que se ha aplicado las distintas puntuaciones. En este primer criterio la capa generada se ha obtenido modificando las propiedades de la capa *ríos*. Dicha modificación ha consistido en el aumento del grosor de los ríos conforme mayor es el orden jerárquico de los mismos. Para ello, clasificado la simbología de la capa basándose en el campo *jerarquía* que existe dentro de la capa *ríos*, el cual contiene el orden jerárquico de cada uno de los cauces fluviales (figura 20). La capa resultante se puede ver en la figura 21.

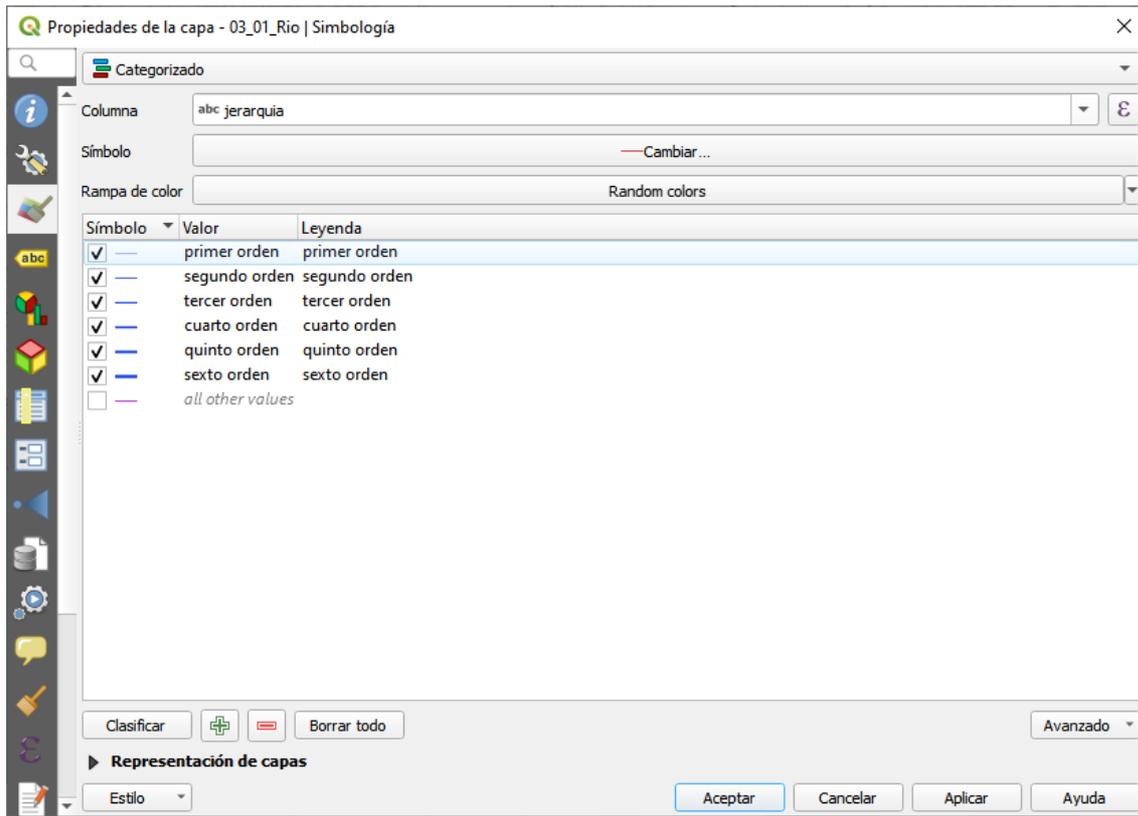


Figura 20 – Clasificación de las categorías de un campo, dentro de las propiedades de la capa

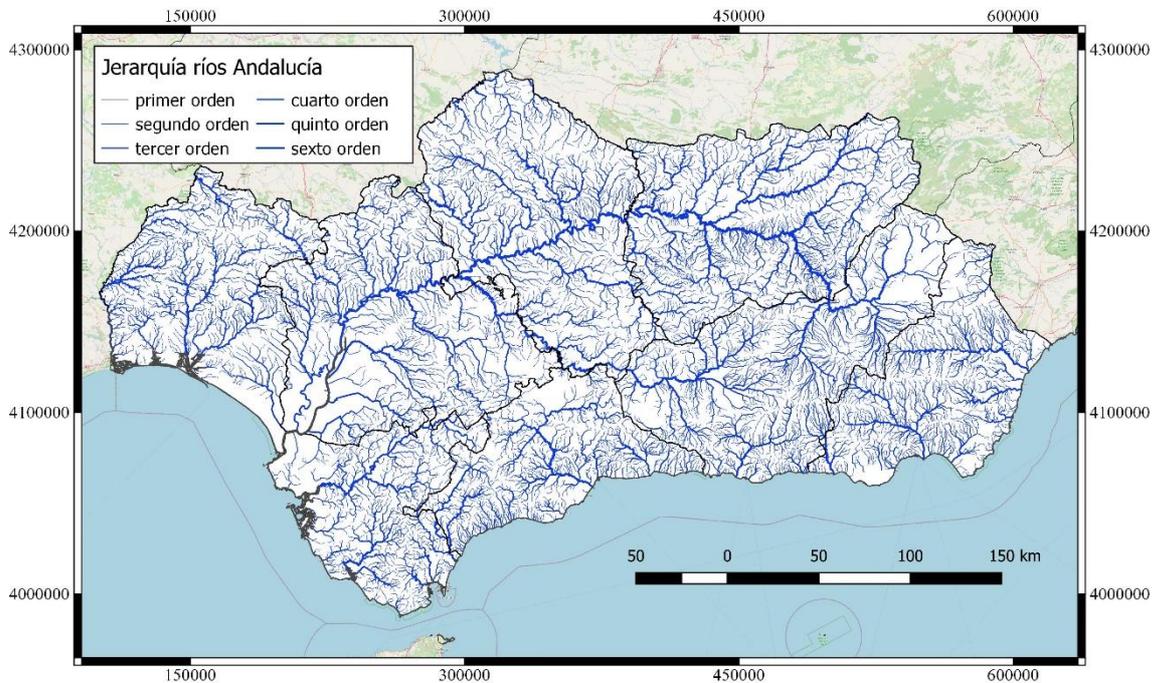


Figura 21 – Órdenes de jerarquía d ellos cauces fluviales

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

8.2.2 Capacidad de los embalses

Para este segundo parámetro se ha utilizado la capa de embalses de la región de Andalucía descargada de la carpeta *Hidrografía* del DERA, la cual se ha añadido a QGIS para operar con ella. Dicha capa contiene, entre otros datos geográficos, la capacidad de cada uno de los embalses, representada en un campo dentro de la tabla de atributos de la capa.

Teniendo en cuenta las capacidades máximas y mínimas de los embalses analizados, se ha establecido una serie de rangos a los cuales se ha puntuado con un determinado coeficiente como se muestra en la tabla 3.

Volumen (hm^3)	<50	50-100	100-200	200-300	>300
Puntuación	0	1	2	3	4

Tabla 3. Puntuación relativa a la capacidad de los embalses

Con el objetivo de obtener una representación gráfica de las diferentes puntuaciones asignadas a los embalses según su capacidad, se han modificado las propiedades de la capa *embalses* de manera que a cada rango de la tabla 3 se le ha asociado un color distinto e identificativo (figura 22). La operación es muy similar a la realizada en el criterio anterior, pero en este caso se ha clasificado la capa de forma gradual utilizando los valores del campo *volumen* que contiene la propia capa.

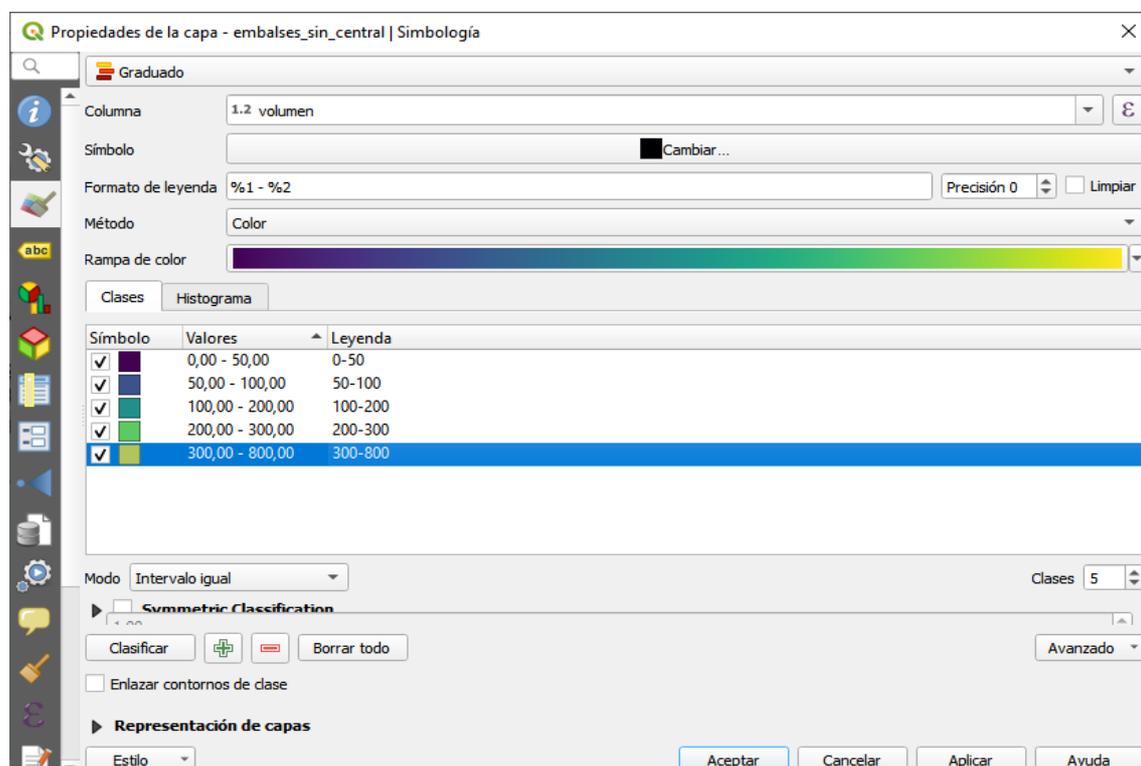


Figura 22 – Modificación simbología dentro de las propiedades de la capa

El resultado final de aplicar las modificaciones anteriormente explicadas se ve reflejado en la representación cartográfica que se muestra en la figura 23.

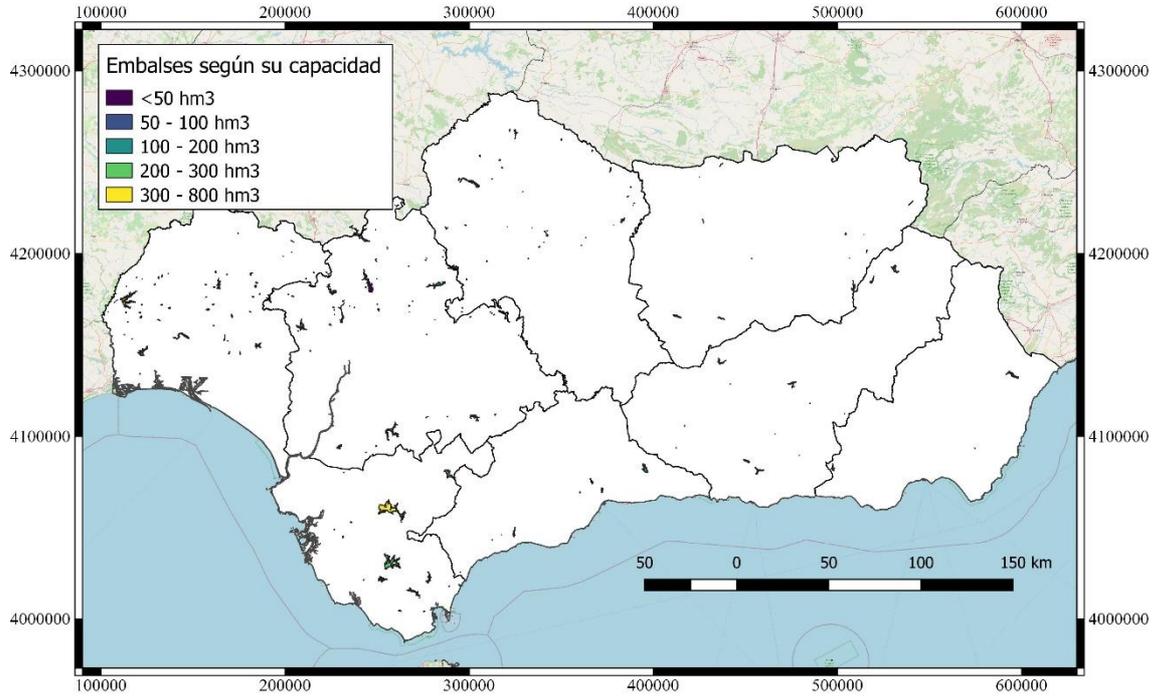


Figura 23 – Embalses clasificados según su capacidad

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

8.2.3 Distancia a líneas eléctricas

Al igual que en los anteriores criterios, la capa empleada para analizar la distancia de los embalses a las líneas eléctricas ha sido descargada del DERA, en concreto de la carpeta *Infraestructuras energéticas y medioambientales*. La capa está definida como *líneas eléctricas*.

Una vez descargada y abierta la capa en QGIS, se ha utilizado en primer lugar la herramienta de geoprocso *buffer* (área de influencia) dentro del menú *vectorial*. Mediante dicha herramienta se han aplicado *buffers* con distancias de 300, 900, 1500 y 2100 metros. La elección de dichos rangos no se ha efectuado de manera aleatoria, sino que son múltiplos de 300, que es el vano máximo que pueden soportar dos postes de transporte de red eléctrica, como ya se comentó en el capítulo 6. Por lo tanto, estos serán los rangos definidos para aplicarles los coeficientes de puntuación tal como puede observarse en la tabla 4.

Distancia (m)	<300	300-900	900-1500	1500-2100	>2100
Puntuación	5	4	3	2	1

Tabla 4. Puntuación relativa a la distancia a líneas eléctricas

Para definir los rangos mencionados de manera gráfica, se ha utilizado la herramienta de geoproceso *diferencia*, también del menú *vectorial*. El resultado obtenido tras aplicar ambas operaciones descritas puede verse en la figura 24.

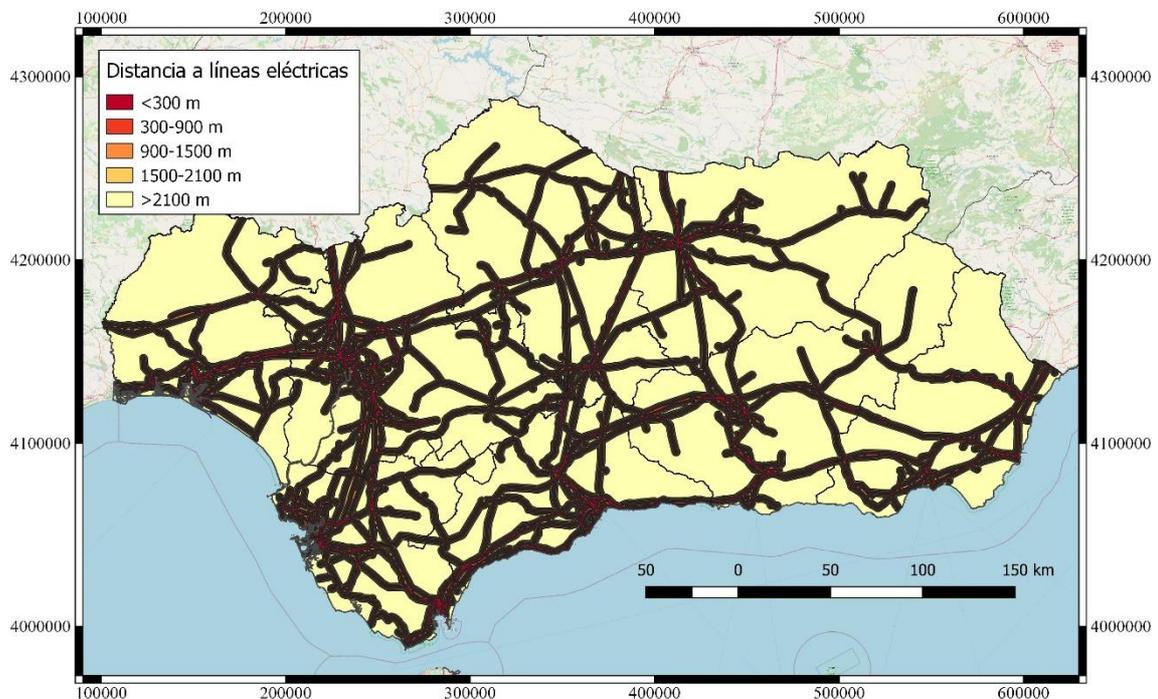


Figura 24 – Distancia a líneas eléctricas

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

8.2.4 Precipitaciones

Para analizar este criterio se ha descargado la capa *precipitaciones* dentro de la carpeta *Medio Físico* del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.

En este caso, se realizará el mismo procedimiento, ya descrito en anteriores criterios, para definir de manera gráfica los rangos aplicados en la tabla 5.

Precipitaciones (mm)	<600	600-1000	1000-1400	1400-1750	>1750
Puntuación	1	2	3	4	5

Tabla 5. Puntuación relativa a las precipitaciones

El procedimiento, como ya se ha explicado con anterioridad, consistirá en clasificar la simbología de la capa según los datos medios anuales de precipitaciones, que se encuentran recogidos en el campo *precip* de la capa *precipitaciones*. El resultado de dicha clasificación se muestra en la figura 25.

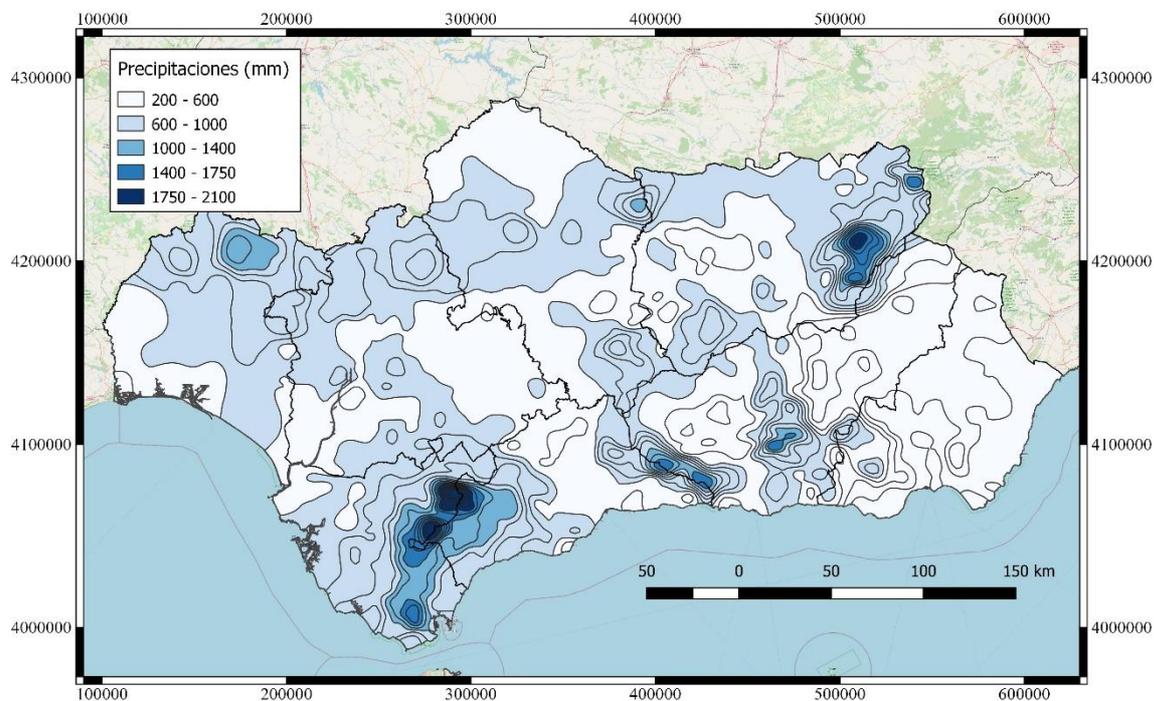


Figura 25 – Media de precipitaciones anuales en los últimos 50 años

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

8.2.5 Distancia a espacios protegidos

En este caso también se ha recurrido al DERA para obtener la capa cartográfica sobre la que posteriormente se operará en QGIS. Dicha capa se llama *Red Natura* y se ubica dentro de la carpeta *Patrimonio*.

Del mismo modo que se hizo en el criterio de distancia a líneas eléctricas, la definición gráfica de los rangos de distancia expuestos en la tabla 6 se ha obtenido generando *buffers* con los valores de dichos rangos y aplicando la herramienta *diferencia* a dichos *buffers*.

En la figura 26 se muestra el resultado de aplicar las operaciones descritas.

Distancia (m)	<500	500-1000	1000-2000	>2000
Puntuación	1	2	3	4

Tabla 6. Puntuación relativa a las distancias respecto a los espacios protegidos

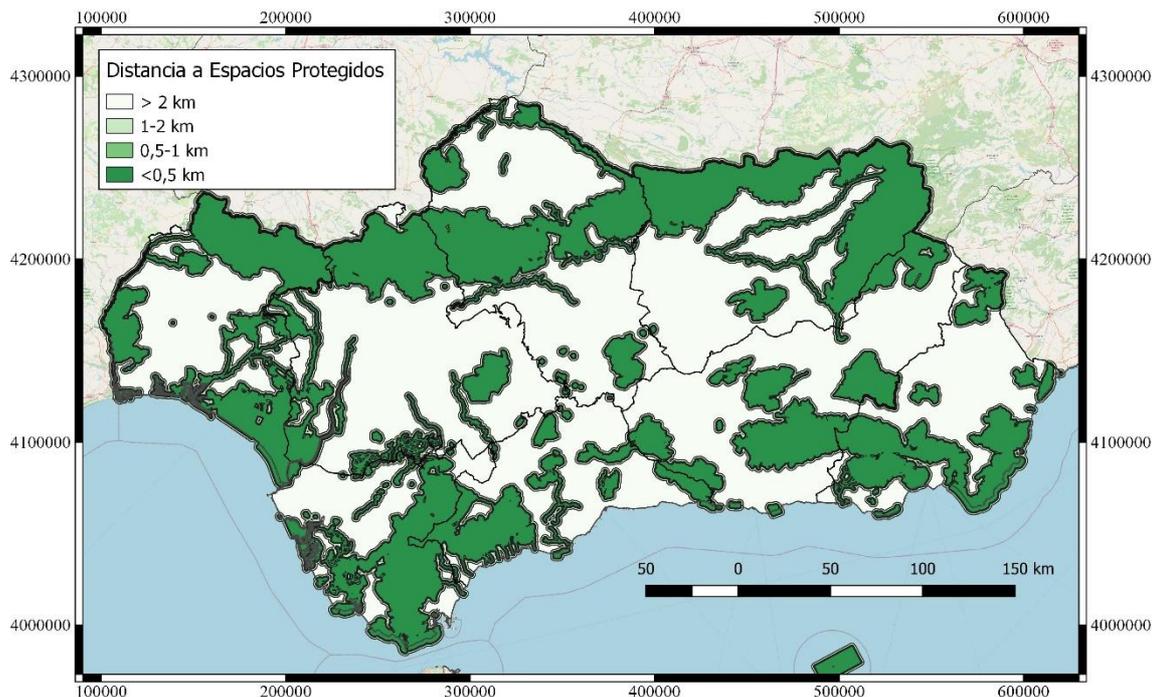


Figura 26 – Distancia a espacios protegidos

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

8.2.6 Presencia de central hidroeléctrica

Este criterio, al ser excluyente, se ha considerado innecesario realizar una tabla de puntuaciones como en el resto de los criterios, debido a la simplicidad de dichas puntuaciones. En el caso de que se compruebe la presencia de una central hidroeléctrica en un determinado embalse, la puntuación de éste será nula, quedando descartado de las posibles soluciones. En caso contrario, es decir, que no haya ninguna central hidroeléctrica en el embalse, la puntuación tendrá valor 1, pasando a ser determinantes el resto de los criterios ya definidos.

De nuevo, la capa utilizada para este criterio ha sido descargada del DERA, en concreto de la carpeta de *Infraestructuras energéticas y medioambientales*. Dicha capa representa gráficamente mediante círculos rojos, la ubicación de las centrales hidroeléctricas, como se puede observar en la figura 27.

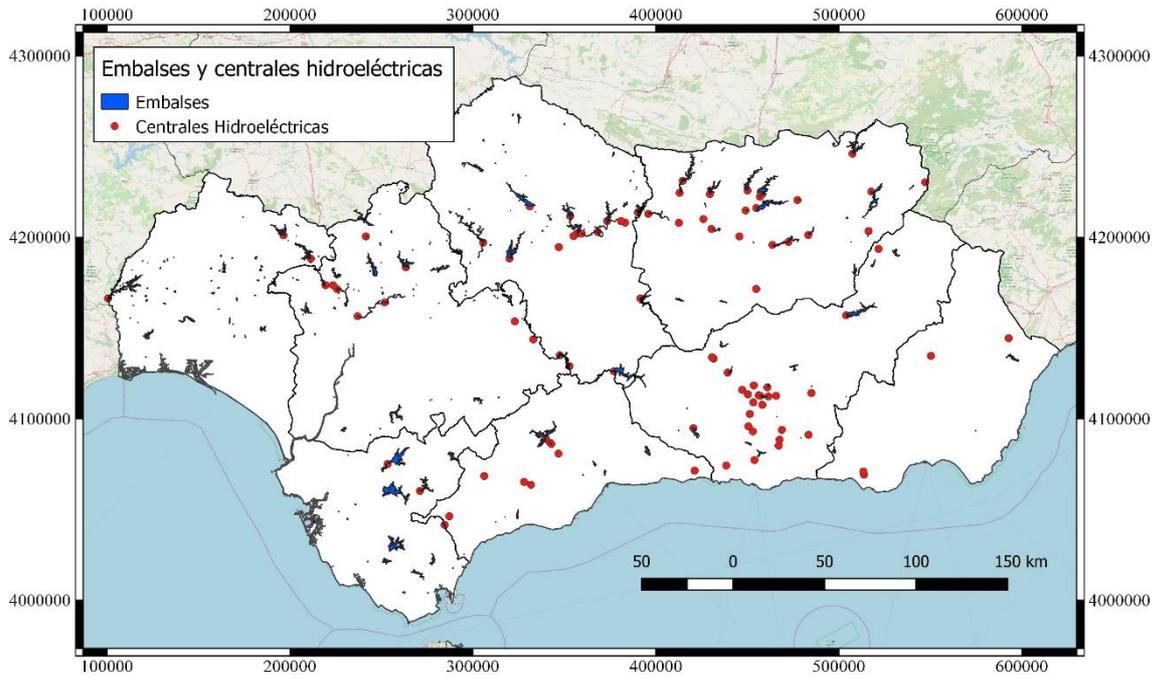


Figura 27 – Centrales hidroeléctricas

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

9 RESULTADOS

Una vez definidos los criterios con sus respectivas puntuaciones y haberlos extrapolado en forma de capas cartográficas al programa QGIS, será necesario buscar una relación de cada una de dichas capas con la capa de los embalses, la cual será la capa base sobre la que se unificarán todos los criterios obteniendo de esta manera una puntuación final ponderada.

Para obtener la relación entre las distintas capas con sus respectivos criterios y los embalses, en primer lugar, será necesario conocer dentro de qué rango de cada criterio se ajusta cada uno de los embalses analizados. Para conseguir dicho objetivo, se hará uso de la herramienta de geoproceso *intersección*, la cual genera como resultado áreas que poseen en común las dos capas que la herramienta permite seleccionar. De esta forma se logrará encasillar cada embalse dentro de un rango para cada criterio.

Después de haber conseguido asignar para cada embalse un rango dentro de cada criterio, la manera más sencilla y directa de juntar todos estos criterios en una sola capa es haciendo uso de la herramienta *uniones* dentro de las propiedades de la capa embalse, tal y como muestra la figura 28.

Finalmente, tras obtener todos los criterios unificados dentro de la tabla de atributos de la misma capa (en este caso la capa *embalses*), sólo quedará crear un campo por criterio con las notas asignadas a cada embalse.

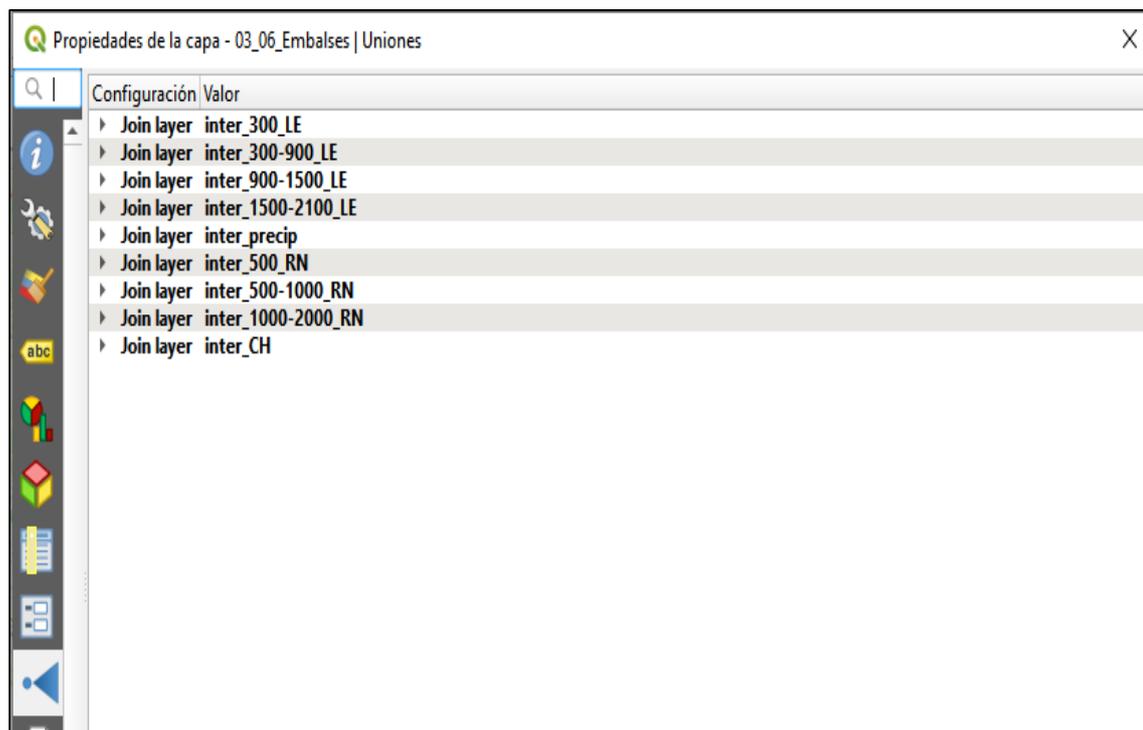


Figura 28 – Apartado *uniones* dentro del menú *propiedades*

En los apartados que vienen a continuación, como resultado de la ejecución de las operaciones explicadas anteriormente, se mostrará la clasificación geográfica de los embalses según las puntuaciones asignadas en cada criterio.

9.1 Jerarquía de cauces fluviales

Para llegar al resultado de la figura 29 ha sido necesario descomponer la capa *ríos* en cinco capas, cada una representando un orden de jerarquía. Esta descomposición se ha realizado utilizando la herramienta *selección de objetos espaciales por valor*, a través de la cual se han marcado sobre la capa *ríos* aquellos que tenían el orden seleccionado en la herramienta. Una vez distinguidos los ríos de un mismo orden, se crea una capa nueva que contenga dichos ríos mediante la opción *guardar objetos como* del menú *exportar*.

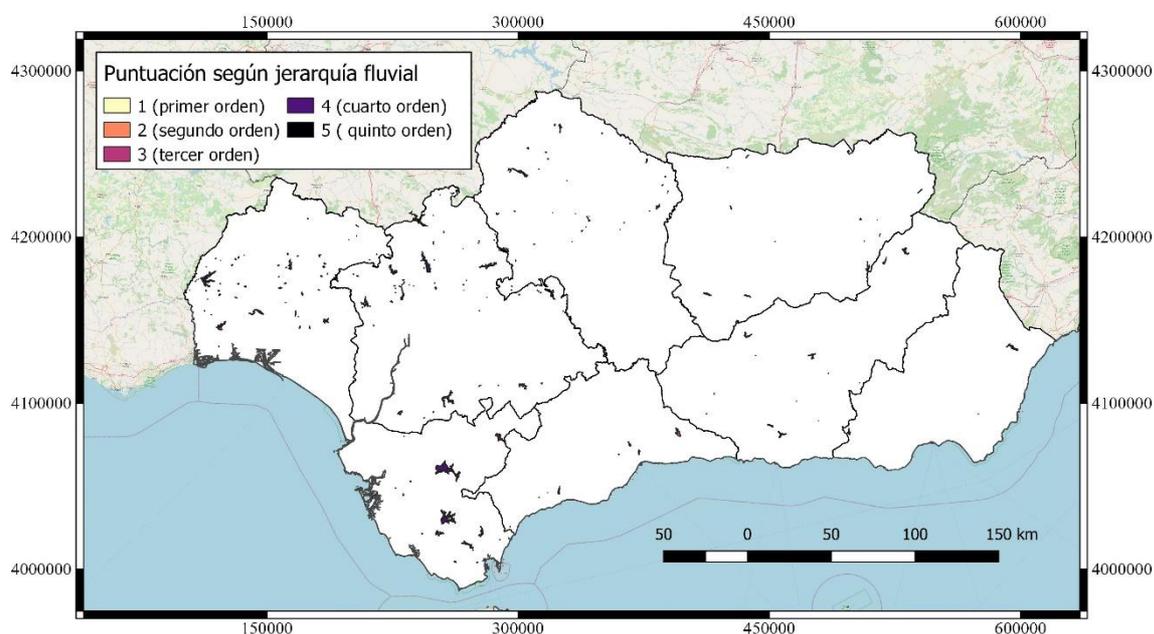


Figura 29 – Embalses clasificados según la jerarquía de los ríos que los componen

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

9.2 Capacidad de los embalses

Este criterio, al tratarse de una información que viene adjunta a la capa de los propios embalses, no ha sido preciso obtener la información geográfica mediante operaciones con distintas capas. Por lo tanto, al ser el resultado exactamente el mismo que el de la figura 23, se ha considerado innecesario volver a mostrar dicha figura.

9.3 Distancia a líneas eléctricas

En este caso, para poder asignarle a los embalses las puntuaciones según la distancia a líneas eléctricas, se ha tenido que unir a la capa *embalses* cada una de las capas generadas como resultado de la intersección entre los embalses y cada *buffer* representado en la figura 24.

Tras unir dichas capas a la capa *embalses* y crear un campo con la puntuación asignada a los embalses, tal y como se explicó al comienzo de este apartado, sólo quedará clasificar los embalses según dichas puntuaciones como se puede ver en la figura 30.

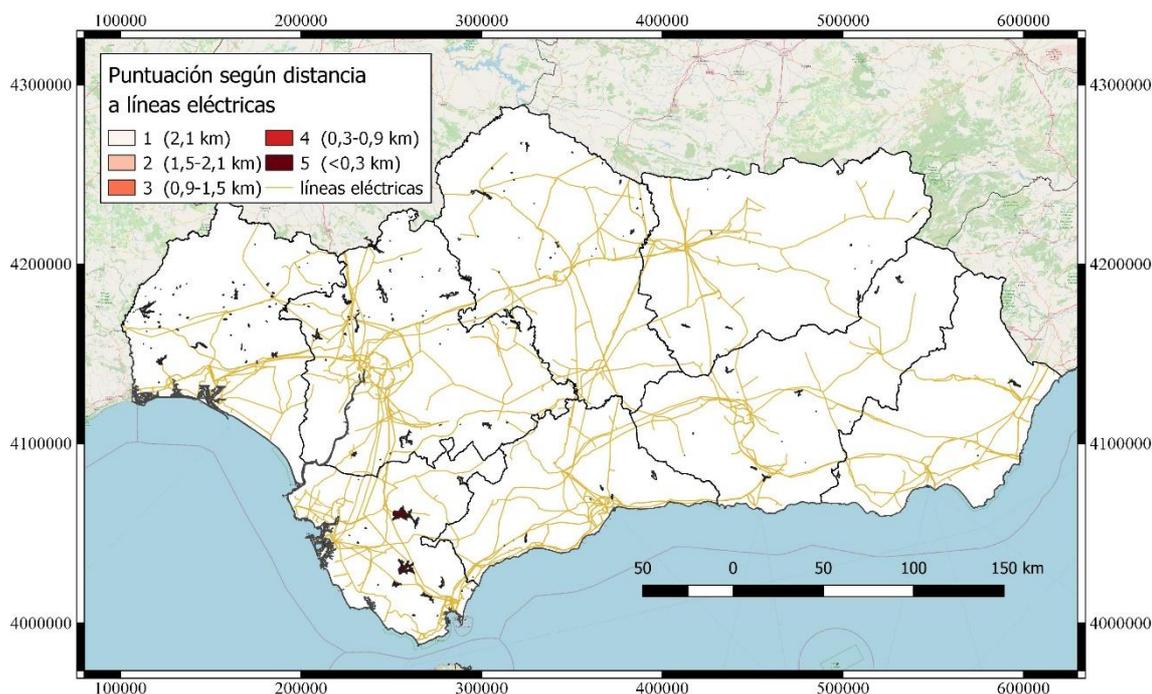


Figura 30 – Embalses clasificados según su distancia a líneas eléctricas

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

9.4 Precipitaciones

Este criterio requerirá de una sola intersección entre la capa *precipitaciones* mostrada en la figura 25 y la capa *embalses*. La capa resultante permitirá crear un campo con las puntuaciones de los embalses basándose en las precipitaciones registradas en la zona donde se ubican dichos embalses. La clasificación de los embalses según dichas puntuaciones se puede observar en la figura 31.

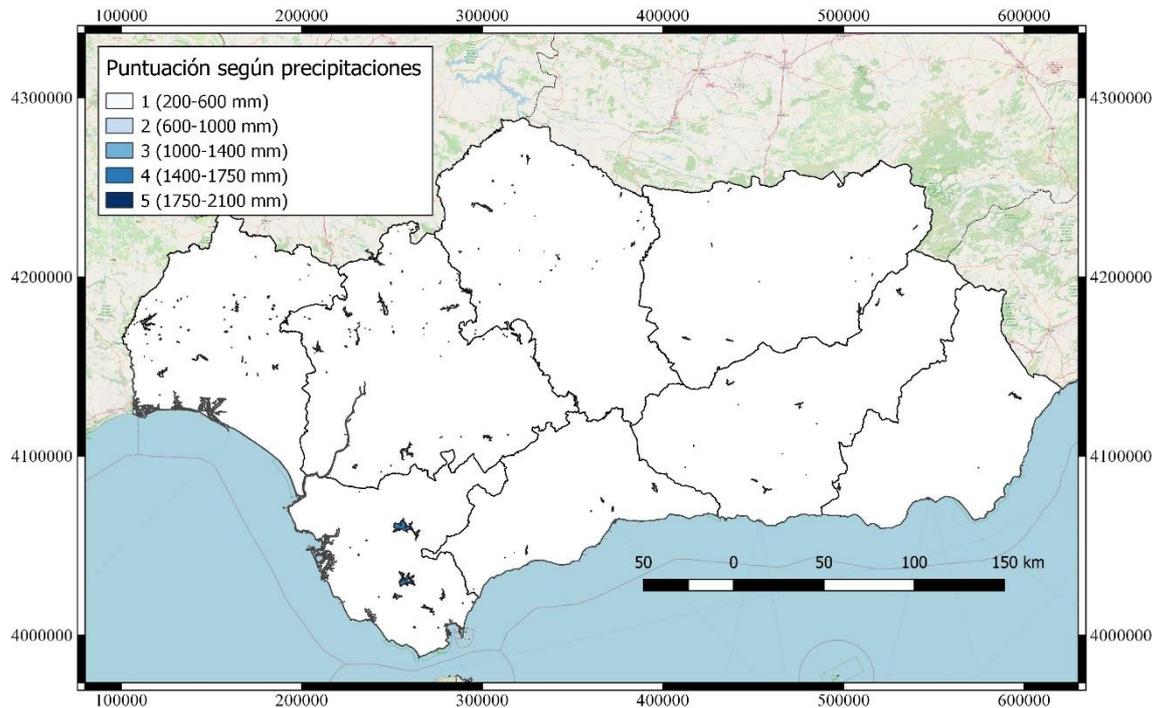


Figura 31 – Embalses clasificados según precipitaciones

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

9.5 Distancia a espacios protegidos

Al igual que sucede con el criterio de distancia a líneas eléctricas, para asignar las puntuaciones a los embalses según este criterio, se ha operado con cada una de las capas que definen los rangos de distancia a espacios protegidos. El resultado está representado en la figura 32.

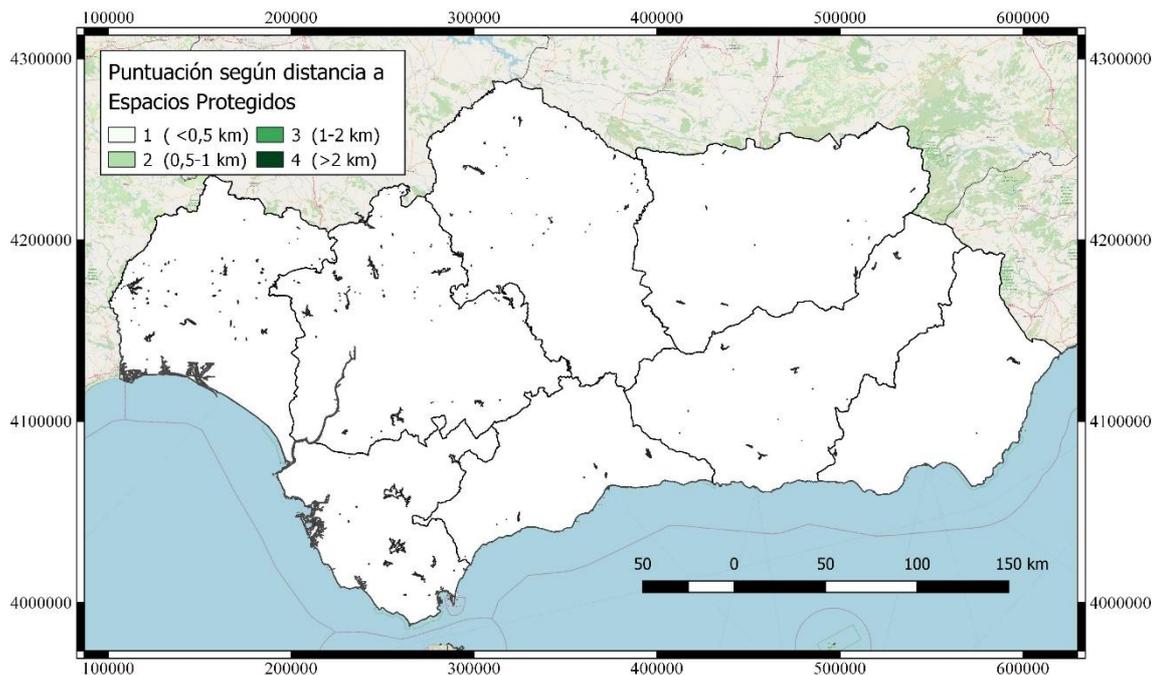


Figura 32 – Embalses clasificados según su distancia a espacios protegidos

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

9.6 Presencia de central hidroeléctrica

Este último criterio, al tratarse de un criterio excluyente, en el momento que se asignan las puntuaciones a los embalses analizados, solo quedarán representados gráficamente aquellos que no dispongan de central hidroeléctrica, tal y como se observa en la figura 33.

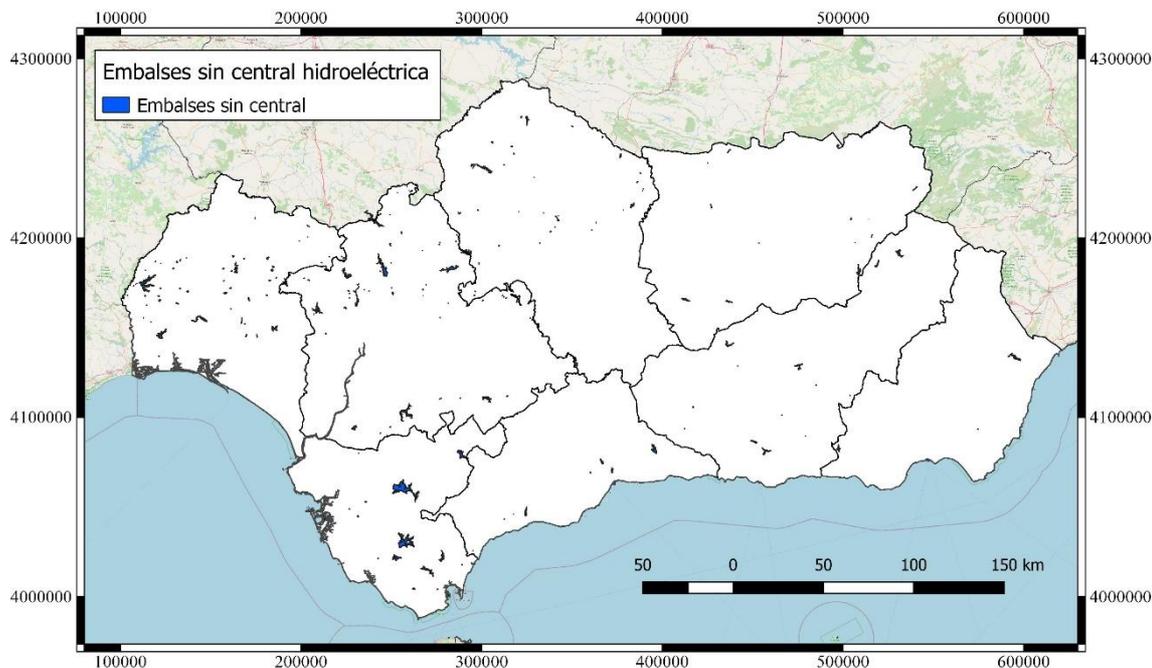


Figura 33 – Embalses que no disponen de central hidroeléctrica

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

9.7 Puntuación final

El hecho de estar todos los criterios unificados y relacionados en una misma capa permitirá poder realizar operaciones con las puntuaciones de dichos criterios y de esta forma calcular la puntuación ponderada de cada embalse.

Multiplicando las puntuaciones de cada criterio por sus pesos correspondientes (tabla 1), se obtiene una puntuación final ponderada como muestra la figura 34.

	nombre	Jerarquía_Rios	Capacidad	LíneasEléctricas	Precipitaciones	Espacios Protegidos	Puntuación Final
1	Embalse de Guadalcaçín	4	4	5	3	1	3,700
2	Embalse del Barbate	4	3	5	3	1	3,450
3	Embalse de Cuevas del Almanzora	5	2	5	1	1	3,250
4	Embalse de Rules	4	2	5	1	4	3,200
5	Embalse del Pintado	3	3	5	2	1	2,950
6	Embalse de Zahara-El Gastor	3	3	2	5	1	2,950
7	Embalse del Gergal	4	0	5	2	4	2,850
8	Embalse de Andévalo	4	4	1	1	1	2,800
9	Embalse de Francisco Abellán	4	1	4	1	4	2,800
10	Embalse de Charco Redondo	3	1	5	4	1	2,750
11	Embalse de Malpasillo	5	0	5	1	1	2,750
12	Embalse del Guadiato	4	0	5	2	3	2,750
13	Embalse de Sancho	3	1	5	2	4	2,750
14	Embalse de Beninar	5	1	1	1	4	2,700
15	Embalse de Sierra Boyera	4	0	5	2	2	2,650
16	Embalse de Cala	3	1	5	2	3	2,650

Figura 34 – Puntuaciones finales de cada embalse

Una vez calculadas las puntuaciones finales de cada embalse, se han elegido los dos embalses con mayor puntuación para aplicarles un último criterio que determine la mejor solución posible. Dichos embalses son el embalse de Guadalcaçín y el embalse del Barbate, ambos en la provincia de Cádiz.

El último criterio aplicado se trata de la proximidad de ambos embalses a núcleos urbanos, y para poder analizarlo geográficamente se ha descargado del CNIG una capa cartográfica con los núcleos de población de Andalucía.

La figura 35 muestra los núcleos de población cercanos a los dos embalses.

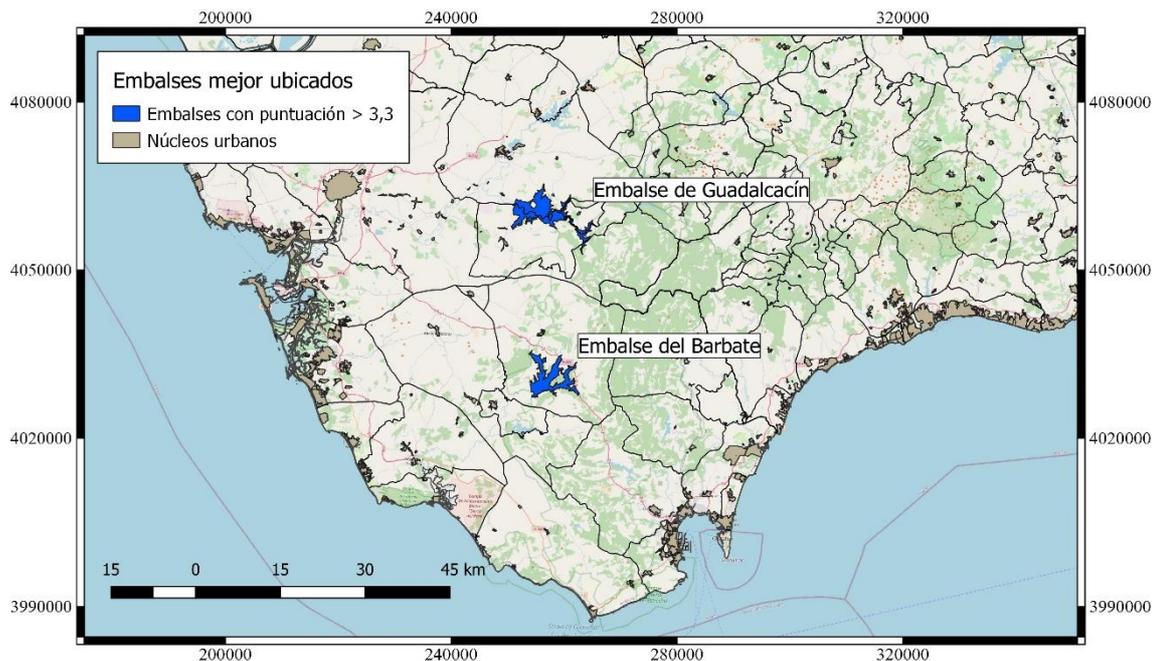


Figura 35 – Núcleos de población cercanos a los embalses

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

Para este último criterio se han establecido los siguientes rangos con sus respectivas puntuaciones:

- Núcleo de población a menos de un kilómetro del embalse: puntuación=2.
- Núcleo de población a entre uno y dos kilómetros del embalse: puntuación=1,5.
- Núcleo de población a entre dos y cuatro kilómetros del embalse: puntuación =1.

Una vez definido los rangos y sus puntuaciones, se sigue el mismo procedimiento realizado con los anteriores criterios. Se generan *buffers* alrededor de los embalses con las distancias que marcan los rangos establecidos, a continuación, se lleva a cabo la intersección de dichos *buffers* con los núcleos de población. De esta forma, se destacan gráficamente los núcleos que se encuentran dentro de dichos rangos y se les asigna una puntuación. El resultado de las operaciones mencionadas queda reflejado en la figura 36.

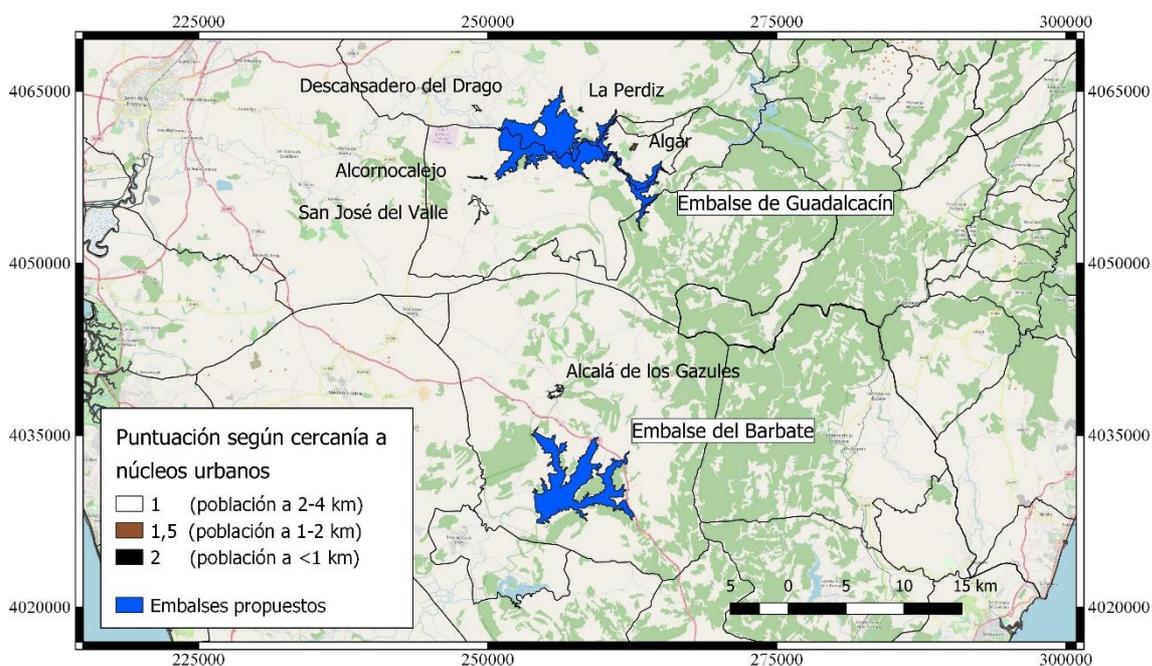


Figura 36 – Puntuación según cercanía de los núcleos urbanos

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

Otras de las herramientas de QGIS que se ha utilizado en este criterio es la asignación de etiquetas a los elementos geométricos de las capas, que en este caso ha servido para poder identificar cada núcleo de población representado en la figura 36 así como los dos embalses analizados.

Finalmente, se ha calculado la puntuación ponderada de cada embalse multiplicando las puntuaciones asignadas a los núcleos de población cercanos por el número de habitantes de éstos últimos.

El cálculo de las puntuaciones ponderadas de cada embalse se encuentra reflejado en las tablas 7 y 8.

Embalse	Núcleos de Población	Población <i>Buffer</i> 1000m	Población <i>Buffer</i> 2000m	Población <i>Buffer</i> 4000m	Sumatorio Ponderado
Guadalcaçín	La Perdiz	200	---	---	7809
	Alcornocalejo	312	---	---	
	Algar	---	1428	---	
	Descansadero del Drago	---	---	210	
	San José del Valle	---	---	4433	
Coeficiente de Ponderación		2	1,5	1	
Población Afectada Ponderada		1024	2142	4643	

Tabla 7. Puntuación ponderada del embalse de Guadalcaçín

Embalse	Núcleos de Población	Población <i>Buffer</i> 1000m	Población <i>Buffer</i> 2000m	Población <i>Buffer</i> 4000m	Sumatorio Ponderado
Embalse del Barbate	Alcalá de los Gazules	---	---	5226	5226
Coeficiente de Ponderación		2	1,5	1	
Población Afectada Ponderada		---	---	5226	

Tabla 8. Puntuación ponderada del embalse del Barbate

Después de analizar las dos tablas y observar la puntuación ponderada de ambos embalses, resulta bastante evidente que la solución ideal para el problema de localización propuesto en este proyecto es el embalse de Guadalcaçin, el cual consta de 5 núcleos urbanos a una distancia de cuatro kilómetros o menos.

El embalse propuesto como solución final se encuentra concretamente al noreste de la localidad de San José del Valle, tal y como muestra la figura 37.

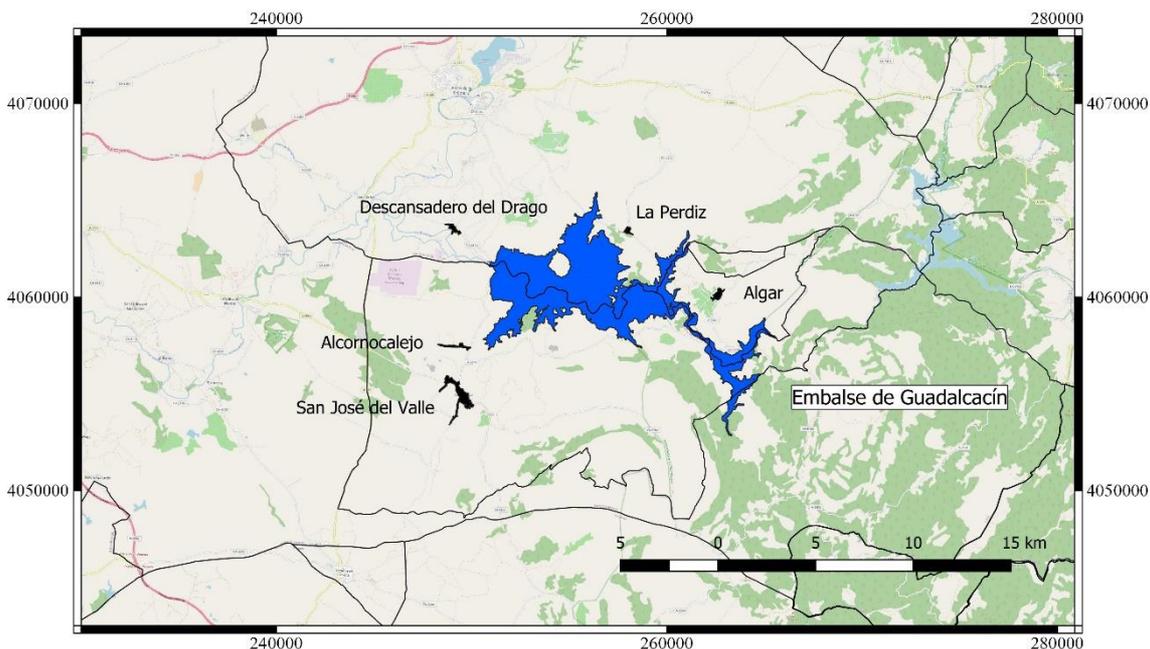


Figura 37 – Solución final sobre cartografía base

Fuente: realización propia. Cartografía base (OpenStreetMap, 2021)

10 CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se ha conseguido los siguientes puntos que se detallarán a continuación.

En primer lugar, se ha querido destacar la importancia de las energías renovables, las cuales son cada vez más necesarias para ayudar a generar toda la energía demandada de una manera limpia y eficiente, garantizando de esta forma la sostenibilidad del planeta.

En segundo lugar, se ha creado un método de análisis multicriterio para el cual se han establecido una serie de criterios, los cuales se han considerado necesarios tener en cuenta para ubicar una central hidroeléctrica. Sin embargo, el interés de dicho análisis reside en la facilidad a la hora de adaptar criterios completamente distintos a éste y generar un nuevo resultado a partir de los nuevos criterios.

Por último, se ha conseguido demostrar la utilidad, cada vez mayor, de una herramienta informática como son los sistemas de información geográfica. Para que se pueda operar con este tipo de herramienta, es necesaria la existencia de datos geográficos sobre el elemento que se va a analizar. Gracias a la masiva generación de datos (libres) derivada del desarrollo de las nuevas tecnologías y la nueva mentalidad de datos abiertos, los SIG se han convertido en una herramienta muy empleada para analizar elementos de ámbitos muy diversos.

REFERENCIAS

- Aelec.* (2016). Recuperado el 13 de junio de 2021, de <https://aelec.es/>
- Aeroterra.* (2019). Recuperado el 10 de junio de 2021, de <https://www.aeroterra.com/es-ar/que-es-gis/historia-de-gis>
- Centro Nacional de Información Geográfica.* (2021). Recuperado el 11 de mayo de 2021, de <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- El Agora Diario.* (2020). Recuperado el 15 de junio de 2021, de <https://www.elagoradiario.com/agua/espana-bateria-europa-bombeo-hidroelectrico-ideologia/>
- Fundación Endesa.* (2021). Recuperado el 15 de junio de 2021, de <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-hidroelectrica>
- Geopaisa.* (2017). Recuperado el 20 de junio de 2021, de <https://geopaisa.blog/2017/10/04/componentes-de-un-sig/>
- Iagua.* (2020). Recuperado el 11 de junio de 2021, de <https://www.iagua.es/respuestas/que-tipos-presas-hay>
- Iea.* (mayo de 2021). Recuperado el 5 de julio de 2021, de <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2021>
- Impactos Ambientales de la producción de electricidad.* (2014). Recuperado el 5 de mayo de 2021, de http://proyectoislarenovable.iter.es/wp-content/uploads/2014/05/17_Estudio_Impactos_MA_mix_electrico_APPA.pdf
- IngCivilEng.* (2016). Recuperado el 20 de junio de 2021, de <https://ingcivileng.com/2016/10/29/la-presa-de-la-fuensanta-en-el-rio-segura/>
- Ingeoexpert.* (2019). Recuperado el 29 de mayo de 2021, de <https://inggeoexpert.com/articulo/que-son-los-sistemas-de-informacion-geografica-sig-y-como-funcionan/>
- Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.* (2021). Recuperado el 10 de mayo de 2021, de <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.* (octubre de 2006). Recuperado el 30 de mayo de 2021, de www.idae.es
- Juan José García-Egocheaga.* (2005). Recuperado el 25 de junio de 2021, de <https://www.juanjosegarciaegocheaga.com/tecnicadiseno.html>
- Junta de Andalucía.* (2012). Recuperado el 11 de junio de 2021, de http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/24092012/8c/es-an_2012092413_9141050/ODE-bbd3fe0f-8c9e-3609-bb73-f2a6faf94b77/11_tipos_de_centrales.html
- Masqueingenieria.* (2016). Recuperado el 23 de junio de 2021, de <https://masqueingenieria.com/blog/tipos-de-presas-y-su-clasificacion/>
- Ministerio de agricultura, alimentación y medioambiente.* (2015). Recuperado el 18 de mayo de 2021, de https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/310generaciondeenergiaapartirdelaguatiposdecentraleshidraulicasyelementosquelasconformanyminicentraleshidroelectricas_tcm30-215763.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.* (2021). Recuperado el 29 de junio de 2021, de <https://www.miteco.gob.es/es/>
- Morea Rodríguez, M. L., & Huerta Rodríguez, J. (2011). Recuperado el 24 de junio de 2021, de

https://administracionelectronica.gob.es/pae_Home/dam/jcr:3440992b-44ee-4240-8000-ac0a502ffb56/Ponencia_130.pdf

OpenStreetMap. (2021). Recuperado el 13 de mayo de 2021, de <https://www.openstreetmap.org/>

QGIS. (2021). Recuperado el 12 de mayo de 2021, de <https://www.qgis.org/es/site/>

Secretaría de Medio Ambiente del gobierno de México. (2019). Obtenido de <http://www.sma.gob.mx/SGA-CC-EL-CLAS-ER-HIDRA.php>

Sector electricidad. (2016). Recuperado el 23 de junio de 2021, de <http://www.sectorelectricidad.com/16510/como-funciona-una-central-hidroelectrica-de-bombeo/>

SmartGridsInfo. (2021). Recuperado el 5 de julio de 2021, de <https://www.smartgridsinfo.es/2021/01/11/union-europea-registra-cuota-renovable-hasta-19-7-por-ciento-2019>

Statista. (2019). Recuperado el 4 de julio de 2021, de <https://es.statista.com/estadisticas/1004273/participacion-de-la-generacion-hidraulica-en-la-generacion-total-en-espana/>

Statista. (2019). Recuperado el 4 de julio de 2021, de <https://es.statista.com/estadisticas/1004252/potencia-hidraulica-instalada-por-region-en-espana/>

Universidad Politécnica de Madrid. (2015). Recuperado el 10 de abril de 2021, de https://mat.caminos.upm.es/wiki/Localizaci%C3%B3n_%C3%B3ptima_de_una_central_hidroel%C3%A9ctrica_en_la_Comunidad_Aut%C3%B3noma_de_Navarra

World Resources Institute. (abril de 2018). Recuperado el 5 de julio de 2021, de <https://www.wri.org/research/global-database-power-plants>