

Metodología SIG  
Multicriterio Enfocada a la  
Localización de Enclaves  
Óptimos para Centrales  
Minihidroeléctricas  
mediante Aplicaciones  
Hidrológicas y  
Geoestadísticas

C. de la Paz  
J. Domínguez  
M<sup>a</sup>. E. Pérez





Metodología SIG  
Multicriterio Enfocada a la  
Localización de Enclaves  
Óptimos para Centrales  
Minihidroeléctricas  
mediante Aplicaciones  
Hidrológicas y Geoestadísticas

C. de la Paz

Dirección: J. Domínguez y M<sup>a</sup>. E. Pérez

Edición: J. Domínguez



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

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

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

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

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

**Depósito Legal:** M -26385-2011

**ISSN:** 1135 - 9420

**NIPO:** 721-13-004-1

Editorial CIEMAT

## CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S29

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS; SITE CHARACTERIZATION;  
HYDROELECTRIC POWER PLANTS; HYDROLOGY; LEGAL ASPECTS

## **Metodología SIG Multicriterio Enfocada a la Localización de Enclaves Óptimos para Centrales de Minihidroeléctricas mediante Aplicaciones Hidrológicas y Geoestadísticas**

Paz, C. de la; Domínguez, J.; Pérez, M<sup>a</sup>. E.  
37 pp. 39 figs. 4 tablas

### **Resumen:**

Este trabajo presenta una metodología que tiene como principal objetivo la localización de zonas óptimas para la instalación de centrales minihidroeléctricas. Para ello, se ha desarrollado una metodología de Evaluación Multicriterio (EMC) implementada mediante el uso de herramientas en un entorno SIG: Análisis Espacial, Análisis Geoestadístico, Hidrología, etc. Esta metodología se compone de dos modelos diferentes que utilizan el mismo proceso de EMC. La diferencia sustancial de ambos modelos se basa en los datos de inicio y herramientas aplicadas para estimar el recurso energético y factor principal de la metodología (caudal o flujo acumulado). El primer modelo se genera a partir de datos de caudal obtenidos de la zona de estudio (El Bierzo), y el segundo a partir de datos pluviométricos y del Modelo Digital del Terreno (MDT). En ambos modelos se obtienen mapas de viabilidad con las zonas que presentan mayor capacidad de acogida para ubicar instalaciones de Minihidráulica. Como objetivo adicional, el trabajo permite contrastar los resultados de los dos modelos desarrollados para evaluar su similitud.

## **Multi-Criteria GIS Methodology Focused on the Location of Optimal Places for Small Hydro Power Via Hydrological and Geostatistic Applications.**

Paz, C. de la; Domínguez, J.; Pérez, M<sup>a</sup>. E.  
37 pp. 39 figs. 4 tables

### **Abstract:**

The main objective of this research is the development of a location methodology for sitting optimization of small hydro power (SHP) centrals. In order of achieve this goal, a Multi-Criteria Evaluation (MCE) methodology implemented through the use of tools in a GIS environment: Spatial Analysis, Geostatistic Analysis, and Hydrology have been developed. This methodology includes two different models based on the same MCE process. The substantial difference of both models is in the input data and the tools applied to estimate the energy resource and the principal factor of the methodology (caudal or accumulated flow). The first model is generated from caudal data obtained in the study area (El Bierzo), and the second one from pluviometric data and Digital Terrain Model (DTM). Both models include viability maps with greater ability areas to locate SHP facilities. As an additional objective, the study allows contrasting the results of the two developed models to evaluate their similarity.



## **PRÓLOGO**

La implantación del nuevo sistema universitario en España, el llamado Plan Bolonia, ha tenido entre otras consecuencias, la del aumento de lo que conocíamos como estudios de postgrado o master. En este sentido, la Facultad de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid viene ofertando desde hace unos años un Master en Tecnologías de la Información Geográfica, que incluye en su programa, tanto prácticas externas como la realización de un proyecto de fin de master.

El CIEMAT, mediante convenio con la UCM, viene acogiendo a alumnos de este master TIG, los cuales, además, tienen la oportunidad de realizar su proyecto de fin de master en nuestras dependencias, aplicando los conocimientos adquiridos sobre estas tecnologías a áreas propias de la investigación en energía, como es la integración regional de energías renovables, línea de investigación característica de nuestro grupo.

El informe que presentamos es fruto de esa colaboración interinstitucional y recoge el proyecto de fin de master de Carlos de la Paz sobre aplicación de las TIG en el ámbito de las energías renovables. En concreto, este informe aborda el desarrollo de un modelo de localización de pequeñas centrales hidroeléctricas en la comarca del Bierzo (provincia de León en el noroeste de España).

El proyecto se complementa con un análisis de similares características para localización de centrales de biomasa que es presentado en otro informe de esta misma colección.

Madrid, enero 2013

Dr. Javier Domínguez Bravo

Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica y Energías Renovables

Departamento de Energía - CIEMAT



## **AGRADECIMIENTOS**

*A Diego, Trini y mis padres por su paciencia este último año,  
y a María Eugenia y Javier por el apoyo y conocimientos prestados para este trabajo.*



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	3
2.	ESTADO DEL ARTE Y JUSTIFICACIÓN.....	5
2.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA MINIHIDRAÚLICA .....	5
2.2.	MARCO LEGAL .....	6
2.2.1	Legislación Europea .....	6
2.2.2	Legislación Nacional.....	7
2.2.3	Legislación Autonómica .....	8
2.3.	ELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	8
3.	OBJETIVOS.....	9
4.	RECURSOS Y FUENTES .....	10
4.1.	RECURSOS.....	10
4.2.	FUENTES.....	10
5.	METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRAÚLICA.....	12
6.	PROCESOS Y RESULTADOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRAÚLICA.....	15
6.1.	OBTENCIÓN DEL FACTOR PRINCIPAL (CAUDAL O FLUJO HIDROELÉCTRICO POTENCIAL) PARA LA SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS DE CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA.....	15
6.1.1	Modelo 1. A partir de datos de caudal obtenidos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil .....	15
6.1.2	Modelo 2. A partir de datos pluviométricos y del modelo digital del terreno de la zona de estudio, aplicando herramientas de hidrología del software ArcGIS.....	17
6.2.	OBTENCIÓN DE LOS FACTORES COMUNES PARA LA SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS DE CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA .....	24
6.3.	ASIGNACIÓN DE PESOS A CADA FACTOR.....	27
6.4.	SUMA LINEAL PONDERADA.....	27

<b>6.5. RESTRICCIONES DE EMPLAZAMIENTOS PARA LAS CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA.....</b>	<b>29</b>
<b>6.6. INTERSECCIÓN DEL CONJUNTO DE RESTRICCIONES DE EMPLAZAMIENTOS PARA LAS CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA.....</b>	<b>31</b>
<b>6.7. RESULTADO DE EMPLAZAMIENTOS ÓPTIMOS PARA LA INSTALACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA.....</b>	<b>31</b>
<b>6.8. RESUMEN DE LOS PROCESOS DE OBTENCIÓN DE LOS EMPLAZAMIENTOS PARA INSTALACIONES DE MINIHIDRÁULICA .....</b>	<b>34</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>36</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>37</b>

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelos de Metodología para la localización de Centrales de Minihidráulica	16
Tabla 2. Estaciones Meteorológicas con datos de pluviometría media anual	17
Tabla 3. Hábitats de Interés Comunitario y su Código	25
Tabla 4. Pesos asignados a cada factor en la Metodología de Minihidráulica	27

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema energético mundial se basa fundamentalmente en la obtención de energía a partir de **combustibles fósiles** como el petróleo, el gas y el carbón mineral, que generan un incremento de los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, provocando graves efectos medioambientales como el **efecto invernadero** y el **calentamiento global**. Además, estos recursos son limitados y están ubicados en zonas concretas del planeta, lo que provoca grandes desigualdades económicas entre los países que poseen reservas de combustibles fósiles y los que no.

En este escenario energético, una apuesta por el uso de **energías renovables** puede mejorar los efectos negativos de los combustibles fósiles sobre el medio ambiente. Además, el empleo de un amplio rango de fuentes naturales inagotables de las diferentes energías renovables (Biomasa, Eólica, Geotérmica, Marina, Minieólica, Minihidráulica, Solar), favorece la seguridad del suministro energético debido al aumento de la diversidad energética por un lado y la disminución de la dependencia energética con el exterior por otro (Domínguez, 2002), y en definitiva a un reparto energético más equitativo entre países.

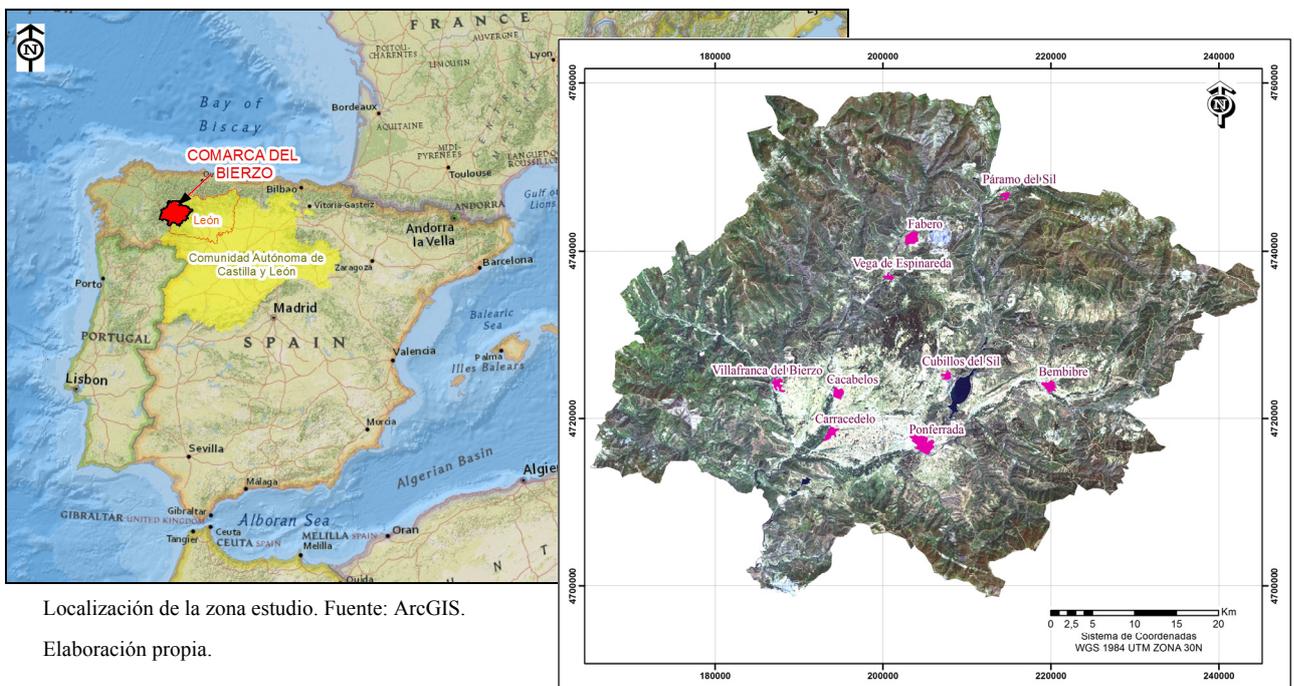
En este trabajo se destaca una energía renovable con futuro como la Minihidráulica, que aunque es una tecnología consolidada y eficiente, todavía tiene un potencial aún sin explotar, de carácter sostenible, puesto que puede aprovechar el potencial energético de los recursos hídricos manteniendo la calidad ambiental del entorno, al no utilizar caudales retenidos que ocupan grandes extensiones de terreno y conllevan efectos ambientales negativos, como sucede en la hidráulica tradicional. También debemos resaltar la aportación sobre el desarrollo socioeconómico rural de esta energía renovable, puesto que utiliza recursos que se encuentran en este medio, como son las pendientes y los cursos de agua, mejorando las condiciones de vida y empleo, a la vez que se realiza un uso sostenible de estos recursos naturales.

La **valoración del recurso**, es el paso previo dentro del dimensionado de instalaciones o sistemas que aprovechan algún tipo de fuente energética. Esta tecnología necesita para generar electricidad, un determinado caudal y un cierto desnivel. Se entiende por caudal la **masa de agua** que pasa en un tiempo determinado por una sección del cauce, y por desnivel o salto bruto a la distancia medida en vertical que recorre la masa de agua, que equivale a la diferencia de nivel entre la lámina de agua en la toma y en el punto donde se restituye al río el caudal ya turbinado (ESHA, 2006). La estimación de caudales se puede obtener con mediciones en campo, que podemos obtener en las Confederaciones Hidrográficas, aunque no siempre presentan la densidad necesaria, por lo que se suele acudir a técnicas de interpolación en muchas ocasiones.

Por otro lado, es imprescindible un estudio exhaustivo de la **localización del emplazamiento**, que en el caso de la tecnología Minihidráulica está asociado espacialmente al recurso (caudal), además de depender de otros factores técnicos (desnivel, proximidad a red eléctrica) y ambientales (espacios protegidos).

De todo ello se deduce, una componente fundamentalmente espacial, es decir, que la localización de emplazamientos para la instalación de esta tecnología presenta limitaciones que están relacionadas con condicionantes geográficos. Un buen conocimiento de las fuentes o recursos energéticos y de las necesidades técnicas de sus emplazamientos, así como del impacto sobre el medio ambiente, establecerá una localización óptima y una buena integración en el medio de este tipo de instalaciones. En este sentido, las **Tecnologías de la Información Geográfica (TIG)** son una herramienta idónea, puesto que permiten analizar la complejidad y variedad tecnológica de estos recursos y definir los factores más relevantes desde el punto de vista del territorio.

Para encuadrar este trabajo en un lugar concreto, se ha optado por la selección de una comarca de la provincia de León, **El Bierzo**, que dispone de unas condiciones óptimas, en cuanto a situación se refiere para albergar esta tecnología, por ser una zona que presenta una red hidrológica con un elevado caudal de agua en un área de gran variabilidad altitudinal. Además, El Bierzo ha sido una comarca energética tradicional, basada en la minería del carbón, por lo puede ser interesante una conversión hacia otras alternativas energéticas renovables que incentiven el desarrollo socioeconómico de la comarca de forma sostenible y con mayor respeto al medio ambiente.



Localización de la zona estudio. Fuente: ArcGIS.

Elaboración propia.

Imagen Landsat de la comarca de El Bierzo. Fuente: IGN. Elaboración propia.

## 2. ESTADO DEL ARTE Y JUSTIFICACIÓN

El consumo de energía, incluyendo el transporte, es en la actualidad la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes acidificantes. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), la emisión de estos últimos contaminantes se ha reducido de un modo significativo gracias a la adopción de combustibles más limpios y al tratamiento de los gases de combustión. Pero mientras no disminuya el protagonismo de los combustibles fósiles en la cesta energética, los gases de efecto invernadero que provocan el cambio climático parecen estar abocados a aumentar. Mayor eficiencia energética y un incremento del uso de las **energías renovables** son vistos como parte de la solución (CIEMAT).

En la actualidad el carbón sigue siendo la principal fuente de energía, y la hidráulica la más abundante dentro de las energías renovables (CIEMAT), aunque la mayor parte de esta energía hidráulica procede de saltos generados mediante grandes embalses causantes de la pérdida de importantes ecosistemas, pueblos, vegas de cultivo, paisajes singulares y construcciones de alto valor cultural. En este sentido, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) considera que las centrales de Minihidráulica generan un **impacto ambiental mínimo**, siendo una tecnología energética por explotar.

Hoy en día, las energías renovables, aparte de respetar el medio ambiente, constituyen una importante fuente de **creación de empleo**.

El respeto por el medio ambiente y la creación de empleo, así como el hecho de ser una energía renovable a pequeña escala, ha motivado la elección de la Minihidráulica para este trabajo. En los siguientes apartados se comentan las características más significativas de esta energía, su desarrollo potencial en la zona de estudio, así como la legislación actual al respecto.

### 2.1. **CARACTERIZACIÓN DE LA MINIHIDRAÚLICA**

Las instalaciones hidroeléctricas a pequeña escala tienen un gran potencial para promover el desarrollo económico y la autosuficiencia en zonas rurales, sin afectar las culturas locales ni el medio ambiente.

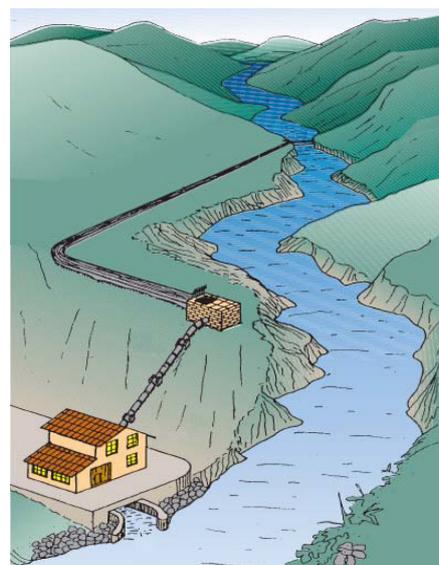
Desde los comienzos de la producción de electricidad, la hidráulica ha sido, y sigue siendo, la **primera fuente renovable** utilizada para su generación. Hoy en día la hidroelectricidad – la suma de la convencional y de la pequeña – representa, en la Unión Europea, de acuerdo con las cifras del Libro Blanco, el 13% del total, reduciendo consiguientemente en más de 67 millones las toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas por año. Ahora bien, así como los aprovechamientos hidroeléctricos convencionales, en los que la importancia de la obra civil y la necesaria inundación de grandes áreas para embalsar el agua y

crear la necesaria altura de salto, dan lugar a importantes impactos en el entorno, los pequeños aprovechamientos se integran fácilmente en el ecosistema más sensible (ESHA, 2006).

El objetivo de un aprovechamiento hidroeléctrico es convertir la energía potencial de una masa de agua situada en un punto (el más alto del aprovechamiento) en energía eléctrica, disponible en el punto más bajo, donde está ubicada la instalación de máquinas. La potencia eléctrica que se obtiene en un aprovechamiento es proporcional al caudal utilizado y a la altura del salto.

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar, en dos tipos, de caudal fluyente (de derivación) y centrales hidroeléctricas con caudales en parte retenidos.

Este trabajo está orientado a la localización de enclaves para la instalación de centrales que trabajan con caudal fluyente, puesto que es la instalación hidroeléctrica más frecuente en aquellas centrales de mediana y pequeña potencia. Además, este tipo de centrales tiene un impacto en el medio ambiente mínimo, ya que no bloquea el cauce del río, y no inunda los terrenos adyacentes. Este tipo de aprovechamientos constan de una bocatoma donde captan parte del caudal del río. El caudal se conduce a través de canales a la turbina para aprovechar la energía del agua y después devolverla al cauce del río.



Esquema de central de agua fluyente. Fuente: EVE

## 2.2. MARCO LEGAL

### 2.2.1 Legislación Europea

- COM (2005) 627 final, diciembre de 2005. Comunicación de la Comisión sobre el apoyo a la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables.
- COM (2005) 265 final, junio de 2005. Libro Verde sobre eficiencia energética o cómo hacer más con menos.
- Directiva 2001/77/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre, por el que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

- COM (97) 599 final, noviembre de 1997. “Energía para el futuro: fuentes de energía renovables. Libro Blanco para una estrategia y un plan de acción comunitarios”. ce un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

### **2.2.2 Legislación Nacional**

- Real Decreto 1565/2010, de 19 de noviembre, por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial (BOE nº. 283 de 23/11/ 2010), que establece la obligación de adscripción a centros de control que actuarán como interlocutores del operador del sistema para las instalaciones de potencia igual o superior a 10 MW.
- Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos (Deroga: R. D. Legislativo 1302/1986, R. D. Ley 9/2000 y Ley 6/2001 de E. I.A.). (BOE 26/01/2008).
- Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial (BOE nº 127, de 28/05/2007), que considera minihidráulica a aquellas instalaciones que tengan una potencia instalada menor o igual a 10 MW.
- Real Decreto-Ley 7/2006, de 23 de junio, por el que se adoptan medidas urgentes en el sector energético.
- Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (BOE nº 135, de 6/06/03).
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas (BOE nº 176, de 24/07/01).
- Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico (BOE nº 285, de 28/11/97).
- Orden de 12 de marzo de 1996 por la que se aprueba el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (BOE nº 78, de 30/03/1996).
- Real Decreto 249/1988, de marzo, por el que se modifican los artículos 2º, 9º y 14º del Real Decreto 916/1985, de 25 de mayo, que estableció un procedimiento abreviado de tramitación de concesiones y autorizaciones administrativas para la instalación, ampliación o adaptación de

aprovechamientos hidroeléctricos con potencia nominal no superior a 5.000 kVA (BOE nº 70, de 22/03/88).

- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas (BOE de 30/04/86). Corrección de errores (BOE de 2/07/86).

### **2.2.3 Legislación Autonómica**

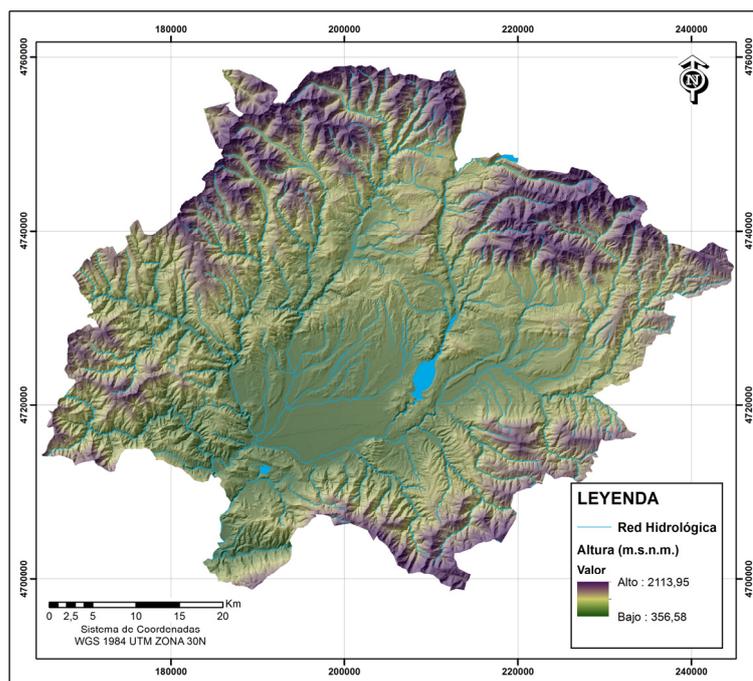
- Decreto 127/2003, de 30 de octubre, por el que se regulan los procedimientos de autorizaciones administrativas de instalaciones de energía eléctrica en Castilla y León (BOE nº 215, de 5/11/03).
- Decreto Legislativo 1/2000, de 18 de mayo, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental (BOCL nº 209, de 27/10/00).
- Orden de 23, de mayo de 1995, de la Consejería de Economía y Hacienda, por la que se crea el Registro de Instalaciones de Producción en Régimen Especial.
- Ley 6/1992, de 18 de diciembre, de Protección de los ecosistemas Acuáticos y Regulación de la Pesca en Castilla y León (BOE nº 29, de 3/02/93).

## **2.3. ELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

El motivo fundamental por el que se ha seleccionado la comarca de El Bierzo para encuadrar este estudio es porque dispone, de forma notable, de los recursos naturales de los que se nutre la energía renovable estudiada, Caudales Fluviales y Pendientes.

La comarca de El Bierzo se sitúa en el cuadrante noroeste de la Península Ibérica presentando un clima marcado por una cierta influencia atlántica y por la configuración de sus montañas, dispuestas en forma de herradura con salida por el Suroeste. Las precipitaciones son abundantes y la temperatura es suave, todo ello matizado por la altitud.

Como se ha mencionado antes, El Bierzo presenta un relieve irregular, de fuertes pendientes, con un rango altitudinal que varía desde los 350 m a los 2.150 m aproximadamente. Este factor unido a su importante red hidrológica, que tiene en el río Sil su principal arteria fluvial, hacen de esta comarca una zona propicia para el aprovechamiento hidroeléctrico. Este hecho se refleja en el siguiente mapa en el que se incluye el Modelo Digital del Terreno (MDT) y la red hidrológica de la zona de estudio:



Altimetría y red hidrológica. Fuente: IGN. Elaboración propia.

### 3. OBJETIVOS

El **propósito principal** de este trabajo es la localización de enclaves óptimos para la instalación de centrales Minihidráulica que puedan generar energía eléctrica y estén conectadas a la red. Para ello se ha concebido una metodología basada fundamentalmente en técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), donde a partir de diferentes datos se obtienen factores y restricciones mediante aplicaciones hidrológicas y geoestadísticas que afectan a esta Energía Renovable objeto de estudio.

Para lograr el objetivo principal se han alcanzado una serie de objetivos parciales que conforman la metodología aplicada a cada Energía Renovable:

En esta metodología se persigue la obtención de **zonas con mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso** (cursos de agua en zonas con cierto desnivel). Para ello se han originado 2 metodologías o modelos de Evaluación Multicriterio, cuya diferencia sustancial se basa en los datos de inicio y herramientas aplicadas para estimar el recurso energético:

- Modelo generado a partir de **datos de caudal** obtenidos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil.
- Modelo generado a partir de **datos pluviométricos** obtenidos de estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y del **modelo digital del terreno** de la zona de estudio, aplicando herramientas de hidrología del software ArcGIS.

## 4. RECURSOS Y FUENTES

### 4.1. RECURSOS

Como herramienta fundamental para la gestión, análisis y representación de las distintas bases de datos y capas de información gráfica manejadas en este trabajo se ha utilizado **ArcGIS 10**, un software perteneciente al campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además, para el tratamiento puntual de imágenes procedentes de satélite se ha empleado el software **ERDAS Imagine 2010**, ampliamente usado en el área de la Teledetección.

### 4.2. FUENTES

Como se ha mencionado anteriormente, la zona de estudio se sitúa en la comarca del Bierzo (León). La proyección utilizada en el estudio es la “*Transverse Mercator*” y el sistema de coordenadas el “WGS 1984 UTM Zone 30N”.

Las bases de datos y capas de información gráfica utilizadas en este trabajo han sido obtenidas de diferentes fuentes de información:

Para este trabajo se ha contado con la inestimable colaboración del Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica y Energías Renovables (gTIGER) perteneciente al **Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas** (CIEMAT, Ministerio de Economía y Competitividad). Las bases de datos y capas temáticas proporcionadas por el CIEMAT son:

- Red eléctrica y Subestaciones eléctricas en formato *shapefile*.

Del **Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional** (IGN, [www.ign.es](http://www.ign.es)) se han obtenido las siguientes capas de información:

- Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio con un paso de malla de 25 m. en formato *ascii*. El MDT es un mosaico compuesto de las siguientes hojas: MDT25-0099-H30.asc; MDT25-0100-H30.asc; MDT25-0101-H30.asc; MDT25-0102-H30.asc; MDT25-0125-H30.asc; MDT25-0126-H30.asc; MDT25-0127-H30.asc; MDT25-0128-H30.asc; MDT25-0157-H30.asc; MDT25-0158-H30.asc; MDT25-0159-H30.asc; MDT25-0160-H30.asc; MDT25-0190-H30.asc; MDT25-0191-H30.asc; MDT25-0192-H30.asc y MDT25-0193-H30.asc.
- Límites administrativos de CCAA, provincias y municipios en formato *shapefile*.
- Infraestructuras del transporte: red de autovías, carreteras y pistas forestales del ámbito de estudio en formato *shapefile*.

Otra importante fuente de información es la Infraestructura de **Datos Espaciales (IDE) de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil** (CHMS, [www.chminosil.es](http://www.chminosil.es)), de donde se han obtenido las siguientes capas de información:

- Ejes de los Cauces de la red hidrográfica a escala 1:25.000 en formato *shapefile*.
- Puntos de caudales de la red hidrográfica en formato *shapefile*, que incluyen datos de caudales medios y caudales mínimos con una probabilidad del 90%.
- Espacios Naturales Protegidos de la zona de estudio en formato *shapefile*.

Del servicio cartográfico del **Banco de Datos de la Naturaleza del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente** (<http://www.magrama.gob.es>) se ha obtenido las siguientes capas de información y bases de datos:

- Hábitats de Interés Comunitario del Anexo I de la Directiva 92/43/CEE a escala 1:50.000 (1997) en formato *shapefile* (cartografía) y la tablas de relación en mdb.

Del **Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA)** del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (<http://www.magrama.gob.es>) se ha obtenido la siguiente información:

- Datos de Pluviometría media mensual de estaciones de la zona de estudio, elaborados a partir de series de datos pluviométricos entre 1960 y 1996, facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Para la obtención de imágenes de satélite se ha recurrido al servicio multi-usuario que dispone la facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense de Madrid con licencia para descargar del **Geoportal del Plan Nacional de Teledetección** del IGN este tipo de información gráfica:

- Imágenes Landsat 5 TM de junio de 2011 de la zona de estudio:
  - `pnt_landsat5_tm_203030_20110624_geo_xsbic_etr89_hu30_gsd25_std`
  - `pnt_landsat5_tm_203031_20110624_geo_xsbic_etr89_hu30_gsd25_std`

## 5. METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRAÚLICA

La localización de enclaves idóneos para la instalación de la Tecnología Minihidráulica está asociada espacialmente al recurso (caudal), además de depender de otros factores técnicos (desnivel, proximidad a red eléctrica, etc.) y ambientales (espacios protegidos). Para lograr este objetivo se ha originado una metodología de Análisis Multicriterio mediante operaciones de análisis con formatos *raster* (Tamaño de celda/píxel 25 x 25 m.) que se describe en el siguiente esquema:



Como se puede observar en el esquema anterior la metodología presenta una serie de pasos hasta lograr el objetivo final que se describen a continuación:

## 1. Obtención de factores

Los “factores” son aspectos que aumentan o disminuyen la valoración de una alternativa como solución al problema, pueden ser cuantitativos u cualitativos. Un factor determinante de esta energía renovable junto con el desnivel del terreno, son las masas de agua (caudales). La información sobre esta variable suele ser escasa en muchas zonas, puesto que tiene que existir una red densa de estaciones de medida de aforos para obtener datos de caudal. Por este motivo, en este trabajo se presentan para la misma metodología dos modelos cuya diferencia sustancial se basa en los datos de inicio y herramientas aplicadas para estimar este factor:

- Modelo generado a partir de datos de caudal obtenidos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil.
- Modelo generado a partir de datos pluviométricos obtenidos de estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y del modelo digital del terreno de la zona de estudio, aplicando herramientas de hidrología del software ArcGIS.

En los apartados 6.1. *Obtención del Factor Principal (Caudal o Flujo Hidroeléctrico Potencial) para la selección de emplazamientos de Centrales de Minihidráulica* y 6.2. *Obtención de los Factores Comunes para la selección de emplazamientos de Centrales de Minihidráulica*, se hace una explicación de porqué se introduce cada factor y cuál es la manera de generarlo.

## 2. Normalización de los factores

La normalización es la estandarización de los factores en una misma escala para hacerlos comparables, debido a que el rango de valor entre los factores suele ser diferente. Esta normalización se puede llevar a cabo a través de distintas funciones de transformación. La que se utiliza en este estudio es la transformación lineal que se realiza según la siguiente ecuación.

$$f_i = (v_i - v_{\max}) / (v_{\max} - v_{\min}) * c$$

$f_i$  = valor del factor normalizado

$v_i$  = valor origen del factor (distintos valores que presenta el *raster* en los diferentes píxeles)

$v_{\max}$  = valor máximo del *raster* a normalizar

$v_{\min}$  = valor mínimo del *raster* que vamos a normalizar

$c$  = rango de estandarización (si introducimos el valor  $c=255$ , el *raster* normalizado saldrá con un valor máximo de 255 y un valor mínimo de 0)

Dicha ecuación se implementa fácilmente con la herramienta *Calculadora Raster*.

---

### **3. Asignación de pesos a cada factor**

En este punto se establecen las ponderaciones de los factores, de forma que pesen más en el modelo aquéllos que se considera que tienen una mayor importancia. La cuantificación de los factores se ha realizado en base a criterios técnicos y ambientales. En el apartado 6.2 *Asignación de Pesos a cada Factor* se explica que peso se le da a cada factor y porque.

### **4. Método de Suma Lineal Ponderada**

Una vez realizados los apartados anteriores, tenemos todas las condiciones para realizar un Análisis Multicriterio. En este trabajo se ha utilizado la Suma Lineal Ponderada (SLP), en la cual se multiplica cada factor ya normalizado por su correspondiente peso, y posteriormente se suman los resultados.

### **5. Obtención de Restricciones**

Las restricciones son criterios que limitan la posibilidad de considerar alguna opción, excluyéndola de forma definitiva. Estas son siempre capas booleanas. Las restricciones se generan mediante mapas binarios de unos (no hay restricción) y ceros o *NoData* (sí hay restricción), uno por cada restricción, éstos se multiplican entre sí, definiendo así las áreas de exclusión. Las restricciones se efectúan con la herramienta *Calculadora Raster* o con *Reclasificar* y suelen afectar a los factores establecidos, restringiendo su valor y extensión por motivos técnicos o medioambientales. En el apartado de 6.5. *Restricciones de emplazamientos para las Centrales de Minihidráulica* se hace una explicación de porqué se introduce cada restricción.

### **6. Obtención de Enclaves Idóneos para la instalación de Centrales de Minihidráulica**

En este paso se obtiene un raster con valores de aptitud que podrían oscilar de 255 (mayor aptitud) a 0. Para ello el resultado de la SLP se multiplica (*Calculadora Raster*) por el producto de la intersección de las restricciones, obteniendo el *raster* con valores de aptitud y con las aéreas excluidas del análisis.

## **6. PROCESOS Y RESULTADOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRAÚLICA**

Esta metodología se compone de dos modelos distintos que utilizan el mismo proceso de Evaluación Multicriterio (EMC), y cuya diferencia sustancial se basa en los datos de inicio y herramientas aplicadas para estimar el **factor principal** de la EMC. Este factor se corresponde con la fuente energética, que en este caso es el caudal o flujo hídrico que discurre por la red fluvial. A continuación se muestra de forma esquemática los elementos principales que componen ambos modelos:

Tabla 1. Modelos de Metodología para la localización de Centrales de Minihidráulica

<b>MODELOS</b>	<b>FACTOR PRINCIPAL DIFERENCIAL DEL EMC</b>	<b>FACTORES COMUNES DEL EMC</b>	<b>RESTRICCIONES COMUNES DEL EMC</b>
MODELO 1	Caudal Hidroeléctrico Potencial	Desnivel o Salto Bruto Distancia a Subestaciones Eléctricas	Pendientes Red y Subestaciones Eléctricas
MODELO 2	Flujo Acumulado Hidroeléctrico Potencial	Distancia a la Red Eléctrica Hábitats Prioritarios Distancia a Red Fluvial	Red Fluvial Espacios Naturales Protegidos

### **6.1. OBTENCIÓN DEL FACTOR PRINCIPAL (CAUDAL O FLUJO HIDROELÉCTRICO POTENCIAL) PARA LA SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS DE CENTRALES DE MINIHIDRAÚLICA**

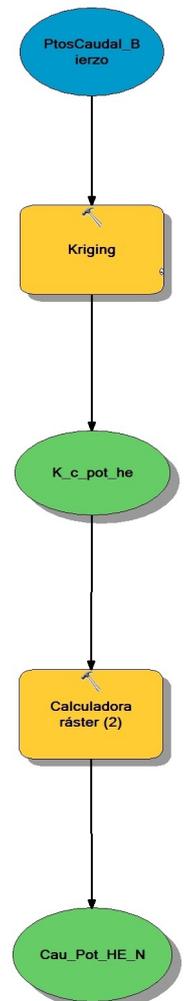
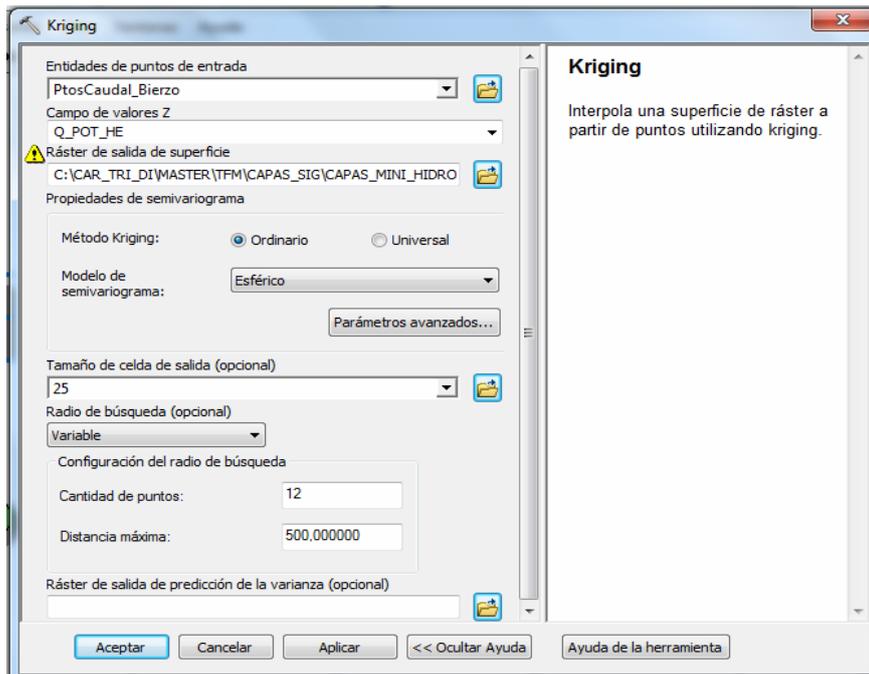
#### **6.1.1 Modelo 1. A partir de datos de caudal obtenidos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil**

En los aprovechamientos de caudal fluyente no se dispone de ningún tipo de regulación de caudal, por lo que el caudal varía en función del régimen hidrológico anual. Para obtener los puntos de caudal con mayor potencial hidroeléctrico sin perjuicio del hábitat fluvial, se ha tenido en cuenta la normativa del Plan Hidrológico de la Cuenca del Norte que establecía que el caudal mínimo medioambiental a circular por el cauce no será inferior a un décimo del caudal medio interanual, con un mínimo de 50 litros/segundo en ríos con caudales permanentes todo el año, o la totalidad del caudal natural fluyente, si éste fuese menor a un décimo o a 50 litros/segundo. Por este motivo, se han calculado en función de esta normativa los caudales hidroeléctricos potenciales a partir de los datos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, incorporándolos posteriormente a la cobertura de puntos de caudal en formato *shape*.

Para la obtención de datos de caudales continuos en formato *raster* a lo largo de los cursos fluviales de la zona de estudio, se ha recurrido a una técnica geoestadística de interpolación, el método Kriging.

Este método de interpolación parte del principio de que los puntos próximos en el espacio tienden a tener valores más parecidos que los puntos más distantes. Para elaborar el ajuste, se basa en modelos matemáticos y estadísticos que incluyen probabilidad para la predicción de los nuevos valores, calculándose también su error. Esta técnica se describe más detenidamente en el modelo a partir de datos pluviométricos para la obtención de la Precipitación Media Mensual interpolada.

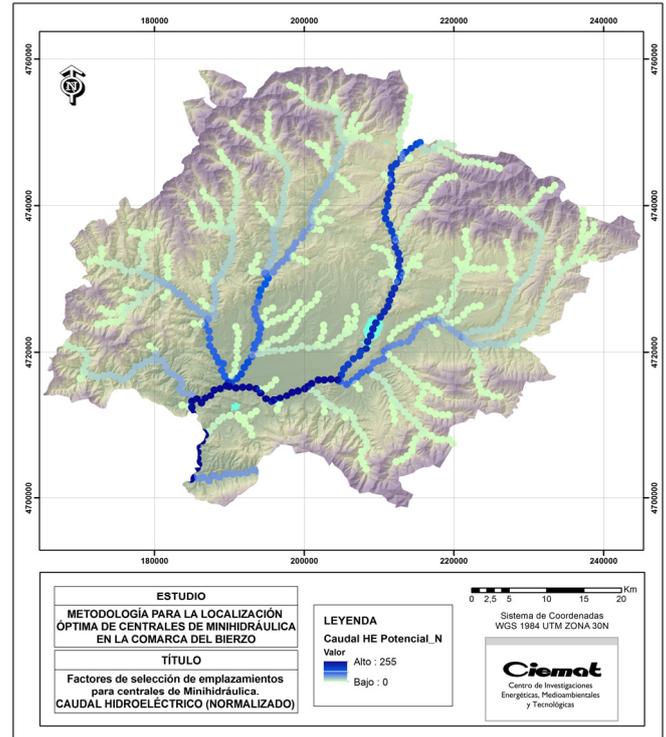
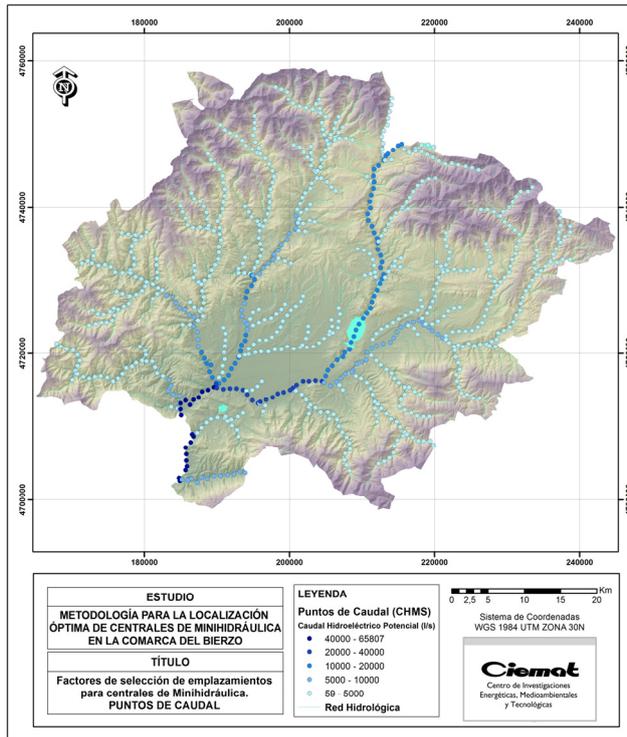
El programa ArcGIS incluye esta técnica de interpolación mediante una herramienta de análisis espacial denominada Kriging.



Para obtener esta interpolación en este caso, se ha usado la opción que por defecto propone ArcGIS para el método Kriging, modificando únicamente la distancia máxima de interpolación (500 m.), puesto que la separación espacial de los puntos de caudal no supera el medio kilómetro.

Finalmente, para obtener el factor de Caudal Hidroeléctrico Potencial, el *raster* generado en la interpolación se normaliza mediante la ecuación lineal que se describe en la metodología, implementada en ArcGIS (*Calculadora Raster /Raster Calculator*).

A continuación se muestran el esquema en *Model Builder* de los procesos llevados a cabo para obtener el caudal hidroeléctrico potencial normalizado, así como los mapas de puntos de caudal y el *raster* final de este factor:



### 6.1.2 Modelo 2. A partir de datos pluviométricos y del modelo digital del terreno de la zona de estudio, aplicando herramientas de hidrología del software ArcGIS.

Este modelo resulta algo más complejo que el anterior, puesto que no se cuenta con datos de caudales reales, sino que se parte de datos de pluviometría media mensual y del MDT de la zona de estudio. Esta información se introduce en ArcGIS, donde se aplican herramientas de hidrología con las que se obtiene como resultado final un flujo acumulado hidroeléctrico que una vez normalizado se incorpora al análisis multicriterio como un factor más.

Los datos de pluviometría media mensual se han extraído del Sistema de Información Geográfico Agrario, (SIGA) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Este sistema cuenta con información de las estaciones meteorológicas del AEMET, siendo la información sobre pluviometría media mensual elaborada a partir de las series de datos pluviométricos entre 1960 y 1996. Para este estudio se ha contado con los datos pluviométricos de las siguientes estaciones:

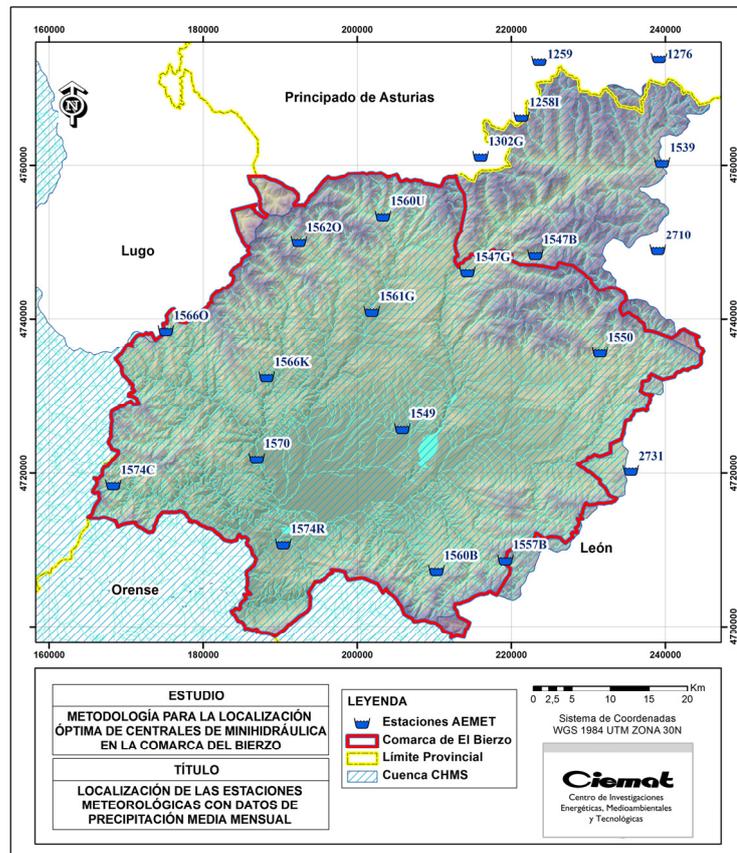
Tabla 2. Estaciones Meteorológicas con datos de pluviometría media anual

Nombre	Clave	Provincia	Tipo	Altitud (m)	Latitud		Longitud		Orientación	Precipitación Media Mensual Anual (mm)
					(°)	(')	(°)	(')		
CARUCEDO	1574R	León	TERMOPLUVIOMÉTRICA	523	42	29	06	45	W	708,6
CORULLÓN	1570	León	PLUVIOMÉTRICA	535	42	34	06	48	W	891,4
EL PORTELO	1566O	León	PLUVIOMÉTRICA	1.080	42	44	06	57	W	1293,0
FABERO LA CORTINA	1561G	León	TERMOPLUVIOMÉTRICA	652	42	46	06	38	W	856,8

**Metodología SIG Multicriterio enfocada a la Localización de Enclaves Óptimos para Centrales de Minihidráulica mediante aplicaciones Hidrológicas y Geoestadísticas**

Nombre	Clave	Provincia	Tipo	Altitud (m)	Latitud		Longitud		Orientación	Precipitación Media Mensual Anual (mm)
					(°)	(')	(°)	(')		
GESTOSO	1574C	León	PLUVIOMÉTRICA	930	42	32	07	02	W	1.521,0
IGUEÑA	1550	León	PLUVIOMÉTRICA	919	42	43	06	16	W	1.265
LABOR DEL REY	1557B	León	TERMOPLUVIOMÉTRICA	1.420	42	29	06	24	W	1.076,0
MANZANAL DEL PUERTO	2731	León	PLUVIOMÉTRICA	1.160	42	35	06	13	W	726,0
MURIAS DE PAREDES	2710	León	PLUVIOMÉTRICA	1.261	42	51	06	11	W	868,3
PARADASECA ENDESA	1566K	León	PLUVIOMÉTRICA	740	42	41	06	48	W	1.010,0
PARAMO DEL SIL	1547G	León	PLUVIOMÉTRICA	870	42	49	06	29	W	1.146,0
PERANZANES	1560U	León	PLUVIOMÉTRICA	937	42	52	06	38	W	1.539,0
PIEDRAFITA DE BABIA	1539	León	PLUVIOMÉTRICA	1.200	42	57	6	11	W	1.038,0
PONFERRADA	1549	León	TERMOPLUVIOMÉTRICA	550	42	38	06	34	W	660,1
SAN CRISTOBAL DE VALDUEZA	1560B	León	PLUVIOMÉTRICA	1.100	42	27	06	31	W	930,9
TEJEDO DE ANCARES	1562O	León	PLUVIOMÉTRICA	970	42	50	06	45	W	1.963,0
VALSECO	1547B	León	PLUVIOMÉTRICA	1.050	42	50	06	23	W	1.366,0
GENESTOSO	1259	Asturias	PLUVIOMÉTRICA	1.180	43	03	06	23	W	1.477,0
PUERTO DE LEITARIEGOS 'PUEBLO'	1258I	Asturias	TERMOPLUVIOMÉTRICA	154	42	59	6	25	W	1.562,0
EL VALLE DE SOMIEDO	1276	Asturias	TERMOPLUVIOMÉTRICA	1.240	43	4	6	12	W	1.271,0

Se ha contado con estaciones meteorológicas ubicadas fuera de la comarca de El Bierzo, puesto que para generar el flujo acumulado de la zona de estudio se debe considerar el flujo procedente de toda la cabecera de la cuenca del río Sil y sus afluentes situados en la comarca de Laciana e incluso en Asturias.



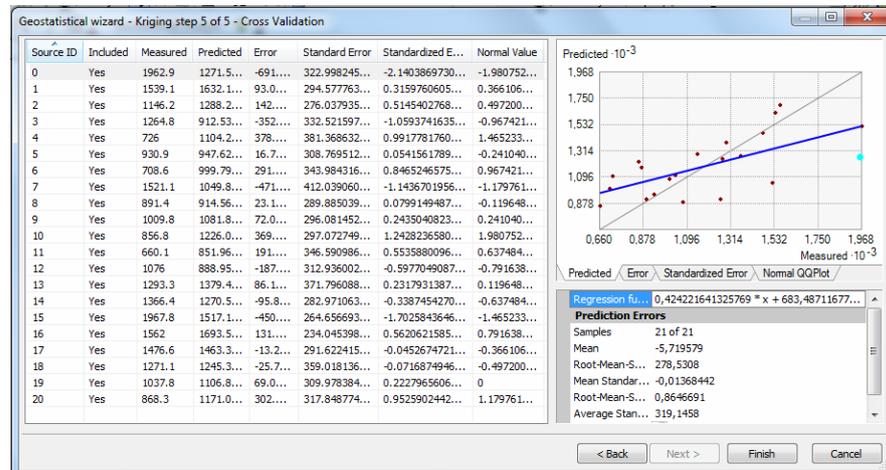
Para la obtención de datos de precipitación media anual continuos en formato raster a lo largo de los cursos fluviales de la zona de estudio, se ha recurrido a una técnica geoestadística de interpolación, el **método Kriging**.

El Kriging estudia la autocorrelación de la variable a interpolar, por lo que cuando se muestra la superficie resultante se tiene en cuenta el grado y el tipo de autocorrelación o dependencia espacial existente en la variable. El objetivo de Kriging consiste en estimar el valor de una variable aleatoria (Z) en uno o más puntos no muestreados o sobre grandes bloques, a partir de datos más o menos distribuidos en una plataforma determinada. Los datos pueden estar distribuidos en una, dos o tres dimensiones aunque sus aplicaciones en problemas medioambientales suelen ser bidimensionales.

El Kriging Ordinario es el que se aplica más comúnmente. Asume que la media es desconocida.

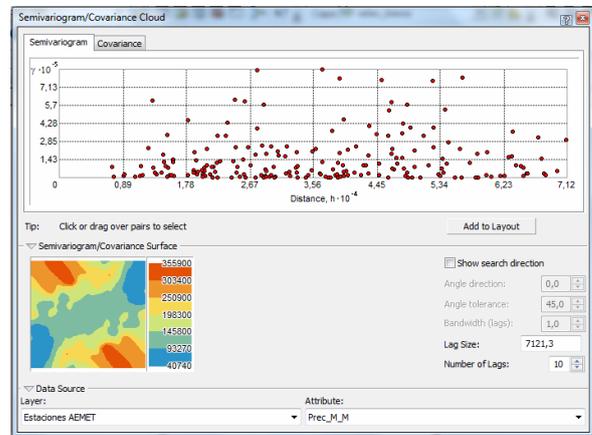
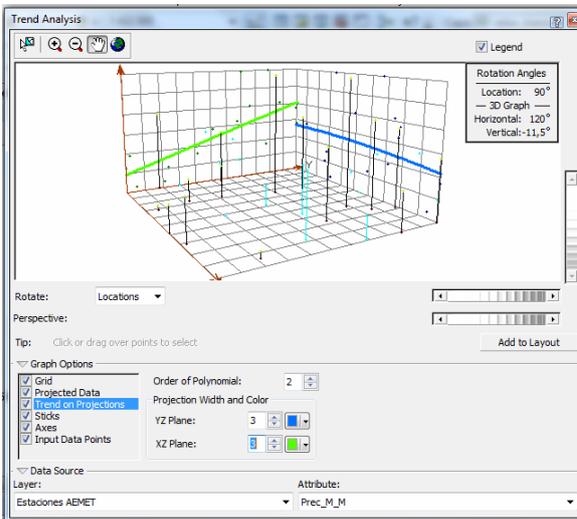
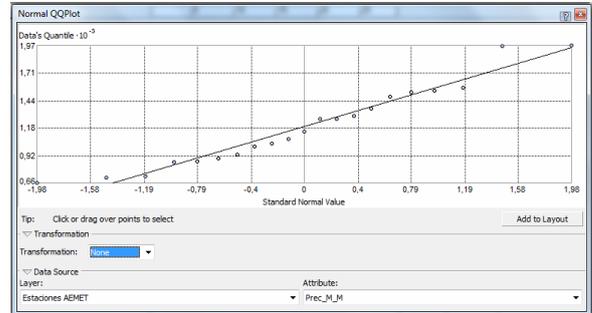
### Kriging ordinario por defecto

En primer lugar se va generar una superficie de interpolación de los datos de precipitación con las opciones que por defecto propone el ArcGIS. A continuación se muestra el gráfico de validación cruzada para esta opción:

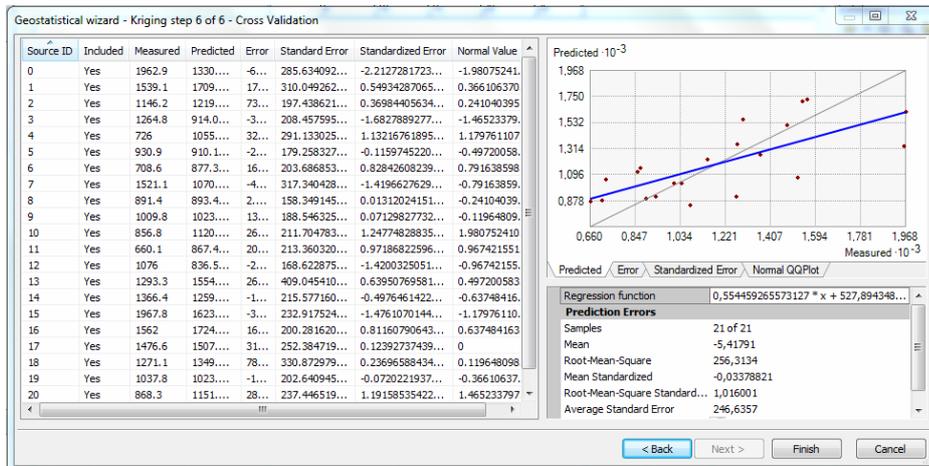


Kriging ordinario modificado

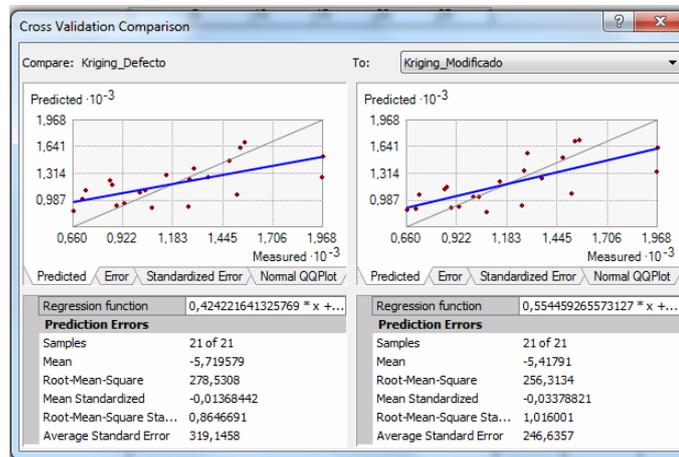
Se ha realizado un análisis exploratorio de los datos para comprobar si la distribución es normal, el cual ha sido tenido en cuenta para ajustar mejor el modelo.



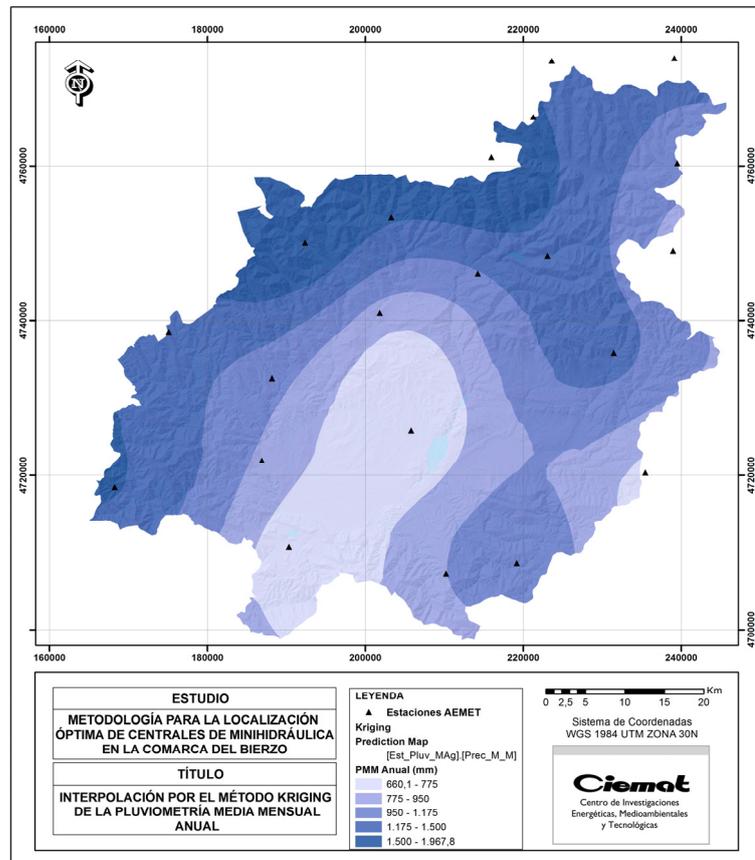
La validación cruzada del modelo da como resultado una media estandarizada de -0,03 y un error cuadrático medio estandarizado de 1,01:



Si comparamos el Kriging por defecto con el modificado, se observa que el error cuadrático medio estandarizado y el error medio estandarizado son mejores en el kriging modificado que en la versión por defecto. Aunque se debe detallar que la media estandarizada es un poco mejor en el modelo que utiliza ArcGIS por defecto.



Atendiendo a los resultados obtenidos, se ha optado por la utilización del modelo de kriging ordinario modificado para incorporarlo al análisis de obtención del flujo hidroeléctrico potencial.



Una vez obtenido el *raster* de precipitaciones, se ha procedido a calcular el flujo acumulado a partir del MDT de la zona estudio mediante las herramientas de hidrología que incluye ArcGIS. El primer paso es detectar los sumideros del MDT original con la herramienta *Crear Sumidero/Sink*. Un sumidero suele ser un valor incorrecto inferior a los valores circundantes. Para garantizar una representación cartográfica del drenaje adecuada, estas depresiones se pueden rellenar con la herramienta *Rellenar/Fill*.

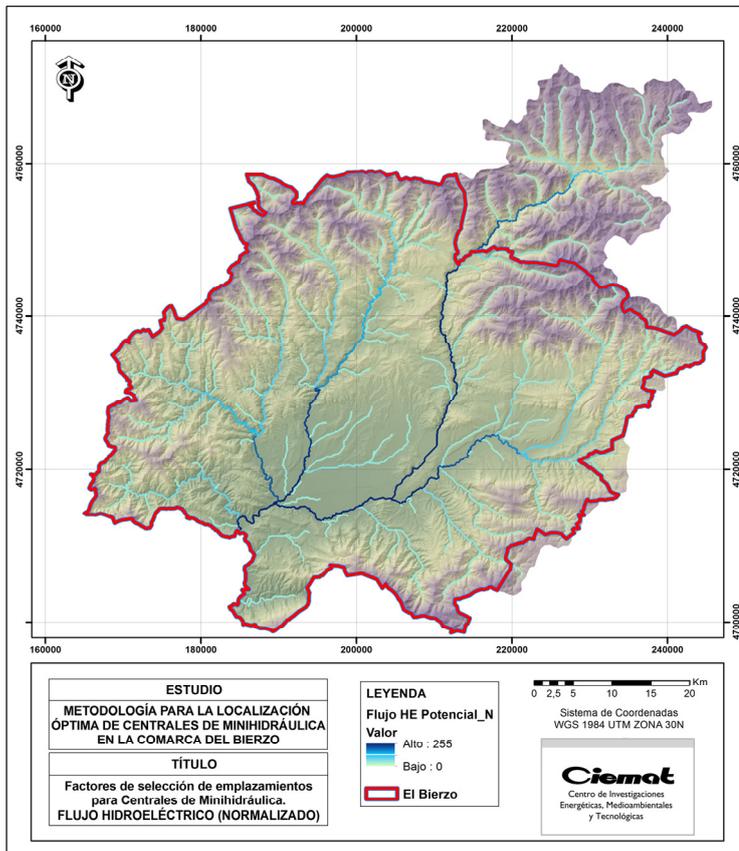
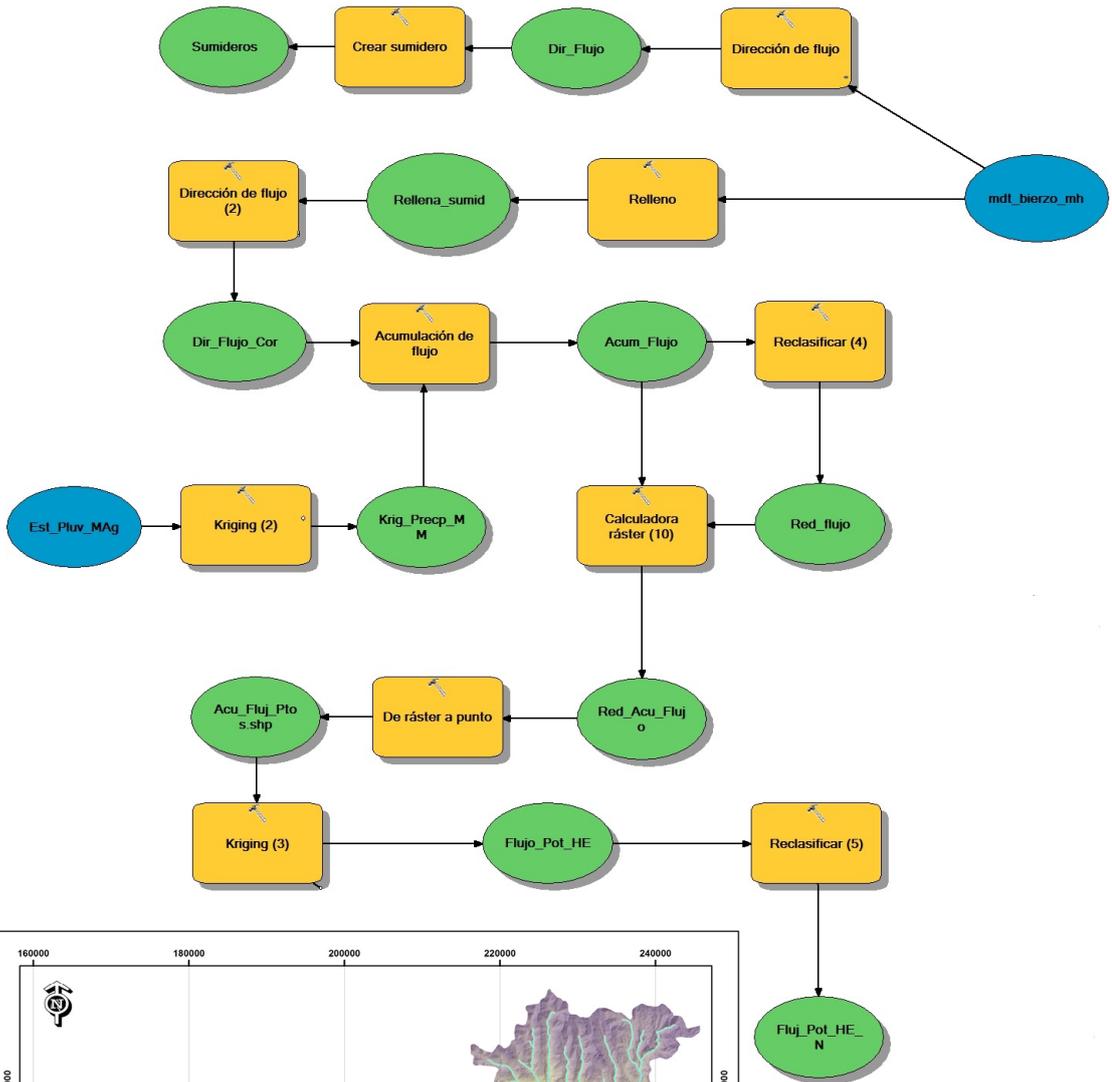
Una vez corregidos los sumideros, generamos primero un mapa *raster* de las direcciones de flujo de la red fluvial de la zona de estudio (*Dirección de Flujo/Flow Direction*), y posteriormente derivado de éste, se crea otro *raster* con la acumulación de flujo. Mediante esta herramienta (*Acumulación de Flujo/ Flow Accumulation*) se incorpora el *raster* de precipitaciones elaborado con la interpolación mediante Kriging, que le da peso a este factor y permite establecer una hipótesis del caudal acumulado que discurre por la red fluvial de la zona de estudio.

Para permitir una superposición suficiente entorno a la red fluvial con el resto de factores del análisis multicriterio que se describen en el siguiente apartado, se han realizado una serie de procesos que permitan ampliar el *raster* de acumulación de flujo que es 25 m. de ancho (una celda de 25x25) a una anchura de 100 m. desde el eje en todos los cauces, manteniendo los valores iniciales de acumulación:

1. Se convierte el raster de acumulación de flujo (solo los cauces) a una capa vectorial de puntos (*De Raster a Punto/Raster To Point*).
2. Para obtener un *raster* que permita una superposición suficiente, se ha optado por llevar a cabo una interpolación con la capa de puntos mediante Kriging, usando la opción que por defecto propone ArcGIS, modificando únicamente la distancia máxima de interpolación (100 m).

Finalmente el raster obtenido mediante la interpolación se normaliza en valores que oscilan de 0 a 255 mediante la herramienta *Reclasificar/Reclassify*, generando el factor de Flujo Hidroeléctrico Potencial.

A continuación se muestran el esquema en *Model Builder* de los procesos llevados a cabo para obtener el flujo hidroeléctrico potencial normalizado, así como el mapa *raster* normalizado de este factor:

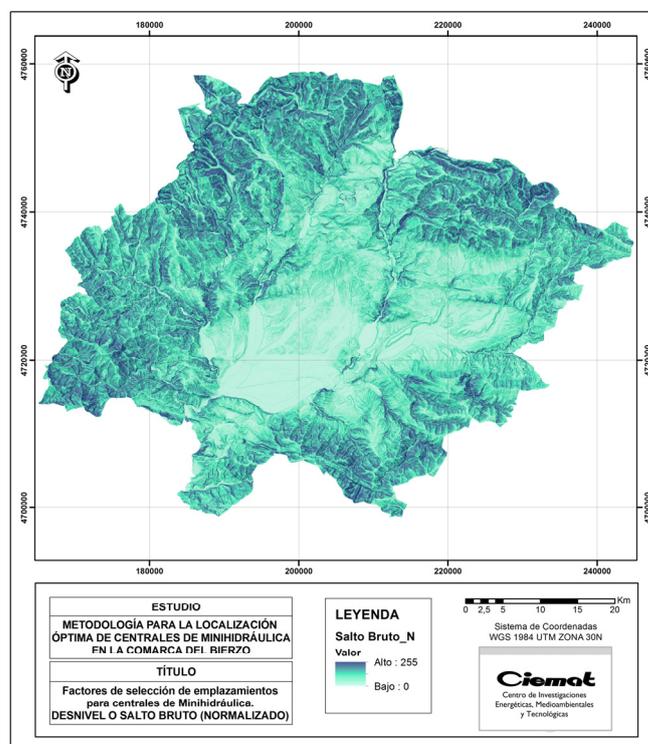


## 6.2. OBTENCIÓN DE LOS FACTORES COMUNES PARA LA SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS DE CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA

### Desnivel o salto bruto

Una zona de elevada pendiente nos permite optimizar la generación de la potencia hidroeléctrica, puesto que se minimizan los costes de las instalaciones (menos longitud de canales y tuberías, etc.), así como su impacto ambiental.

Las pendientes se han obtenido a partir de un MDT de la zona del Bierzo, formado por un mosaico de varios MDTs (tamaño celda de 25x25 m.). Este *raster* se ha utilizado, finalmente, para obtener las pendientes mediante la herramienta “*Pendiente/Slope*”. Posteriormente el *raster* es normalizado (*Calculadora Raster /Raster Calculator*).

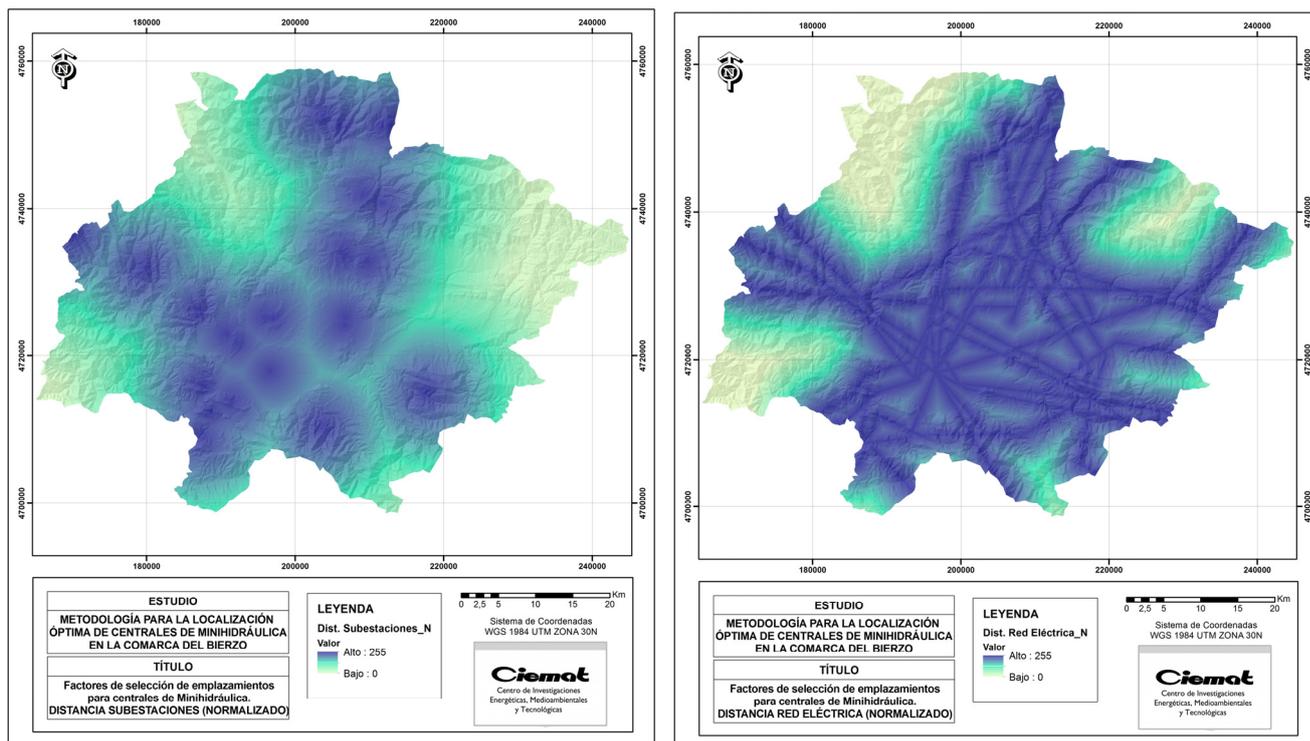


### Distancia a Subestaciones y Red Eléctrica

Es interesante que la localización de la central de minihidroeléctrica este lo más cerca posible a la red eléctrica existente, puesto que una ubicación alejada de la infraestructura eléctrica conlleva un gasto adicional de conexión que puede hacer inviable el proyecto. Además, la realización de una nueva línea eléctrica implica impactos ambientales sobre los recursos naturales, sociales y culturales (desbroce de la vegetación, construcción de torres, etc.), siendo estas afecciones más significativas a mayor longitud de la línea.

A la hora de hacer el análisis se ha valorado por separado la distancia a las subestaciones y a la red eléctrica, puesto que la conexión a la red eléctrica necesita de una transformación previa (cambio de tensión), que comporta un mayor coste técnico y ambiental que la conexión a una subestación, dándole un peso más elevado a esta última opción en la suma ponderada.

Ambos factores se obtienen mediante la herramienta “*Distancia Euclideana/Euclidean Distance*” sobre las capas de subestaciones y red eléctrica. Como este factor depende de la distancia, se le ha realizado el ajuste opuesto para que las localizaciones más próximas a estas infraestructuras tomen valores más elevados. Posteriormente ambos *rasters* son normalizados (*Calculadora Raster /Raster Calculator*), como se muestra a continuación:



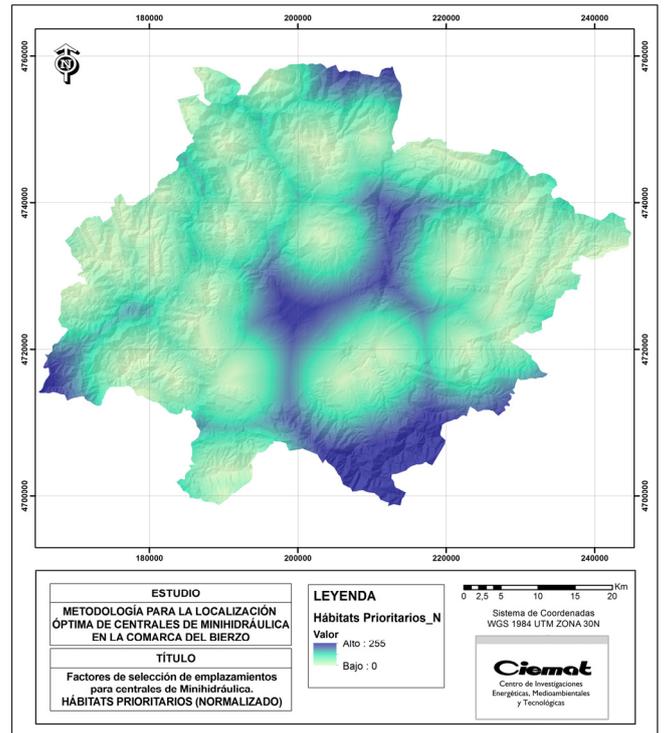
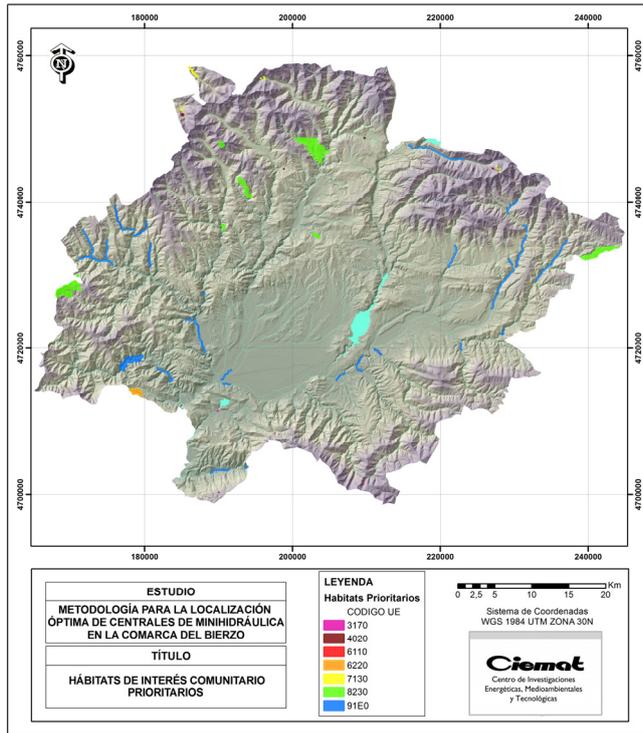
### Hábitats de Interés Comunitario Prioritarios

Los hábitats de interés comunitario se incluyen en el anexo I de la Directiva 92/43/CEE, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la flora y fauna silvestres "Directiva Hábitats". Dentro de los hábitats de interés comunitario se califican como prioritarios los que están amenazados de desaparecer, por ello su preservación implica una responsabilidad por parte de la Unión Europea. En la zona de estudio existen varios hábitats calificados como prioritarios, estando en su mayoría asociados a ecosistemas riparios, lo que puede conllevar un posible impacto ambiental en caso de afección a estos espacios, por lo que se ha optado por incluirlos como un factor en este análisis ponderado. En la zona de estudio encontramos los siguientes hábitats prioritarios:

Tabla 3. Hábitats de Interés Comunitario y su Código

TIPO DE HÁBITAT	CODIGO UE HÁBITAT
<i>Gymnadenio-Ericetum tetralicis</i>	7130
<i>Genisto anglicae-Ericetum tetralicis</i>	4020
<i>Agrostio duriaei-Sedetum pyrenaici</i>	8230
<i>Galio broteriani-Alnetum glutinosae</i>	91E0
<i>Poo bulbosae-Trifolietum subterranei</i>	6220
<i>Sisymbrello asperae-Preslietum cervinae</i>	3170
<i>Cerastietum pumili</i>	6110

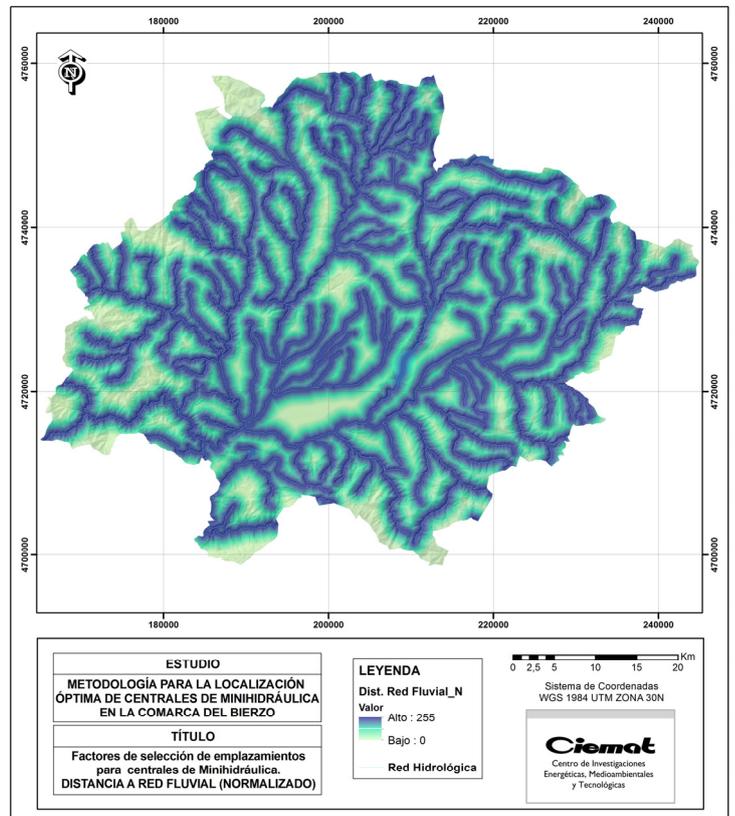
Este factor se obtiene mediante la herramienta “Distancia Euclideana/Euclidean Distance” sobre las capas de hábitats. Posteriormente el *raster* se normaliza (*Calculadora Raster /Raster Calculator*), como se muestra a continuación:



### Distancia a la Red Fluvial

Obviamente, la localización de la central de mini-hidráulica tiene que estar próxima al curso de agua donde se realice el aprovechamiento, puesto que una ubicación muy alejada de las instalaciones de la central haría inviable el proyecto.

Este factor se obtiene mediante la herramienta “Euclidean Distance” sobre la red fluvial de la zona de estudio. Como este factor depende de la distancia, se le ha realizado el ajuste opuesto para que las localizaciones más próximas a los cursos fluviales tomen valores más elevados. Posteriormente el *raster* se normaliza (*Calculadora Raster /Raster Calculator*), como se muestra a continuación:



### 6.3. ASIGNACIÓN DE PESOS A CADA FACTOR

Una vez obtenidos los factores normalizados, se les asigna un peso en función de su importancia desde el punto de vista técnico y ambiental, para así obtener un *raster* ponderado de aquellas zonas con una capacidad de acogida más alta para la ubicación de centrales de Minihidráulica:

Tabla 4. Pesos asignados a cada factor

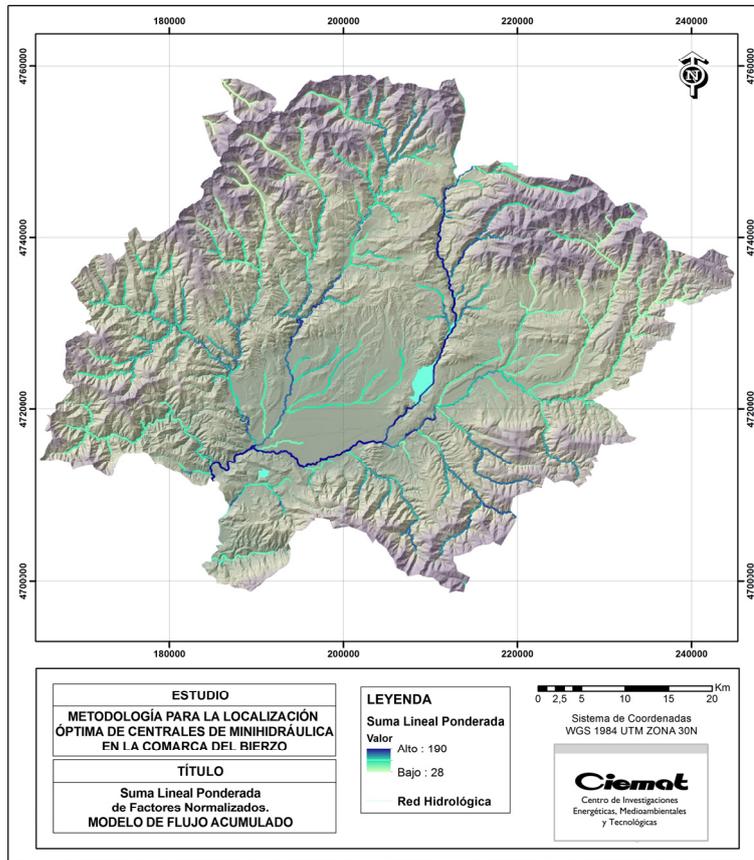
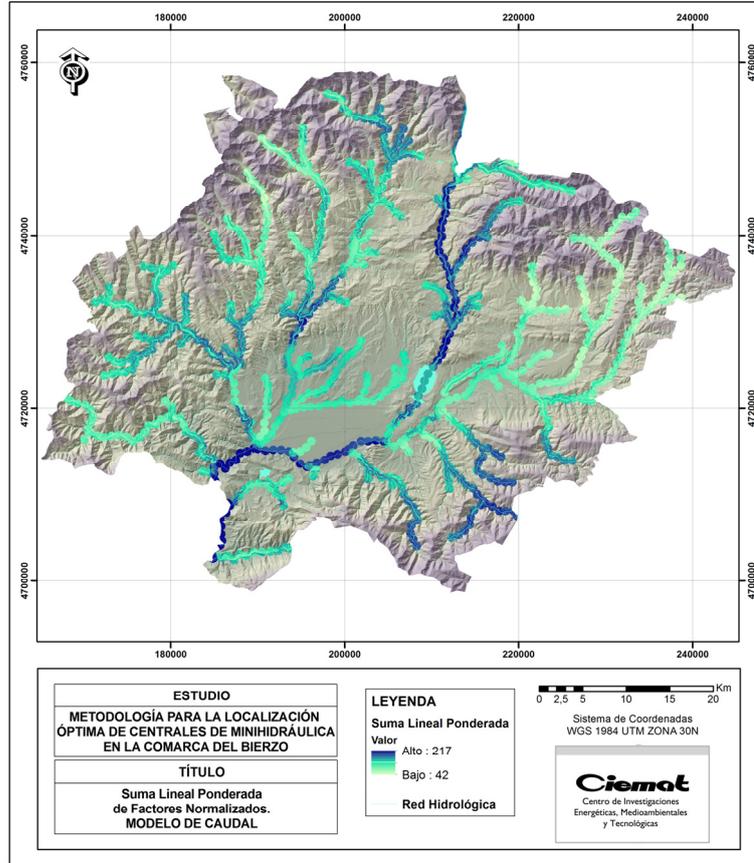
FACTORES		INDICADOR		PESO
Caudal (Modelo 1)	Flujo (Modelo 2)	Caudal hidroeléctrico potencial (Modelo 1)	Flujo acumulado hidroeléctrico potencial (Modelo 2)	0,30
Salto Bruto		Desnivel en porcentaje		0,25
Subestaciones Eléctricas		Distancia a Subestaciones Eléctricas		0,15
Red Eléctrica		Distancia a la Red Eléctrica		0,10
Hábitats Prioritarios		Lejanía Hábitats Prioritarios		0,15
Red Fluvial		Distancia a Red Fluvial		0,05

El mayor peso, se le asigna al caudal o al flujo acumulado según el modelo, puesto que esta energía renovable se aprovecha de este factor junto con el desnivel para obtener energía. Por este motivo también se le asigna al salto bruto un peso importante. Se ha fijado un peso medio a la distancia a subestaciones eléctricas, aunque algo superior al factor de distancia a la red, debido al mayor coste de conexión de este último que se ha descrito anteriormente. También se ha establecido un peso medio a los hábitats prioritarios, puesto que puede suponer una afección importante sobre estas zonas protegidas en caso de ubicar una central en su ámbito. Finalmente, se le ha dado un peso algo menor a la distancia a la red fluvial, puesto que este factor está ya muy limitado por la restricción que se describe más adelante, que excluye aquellas zonas que estén más alejadas de 100 m al cauce del río.

### 6.4. SUMA LINEAL PONDERADA

El resultado que se obtiene en este método de análisis multicriterio es un sumatorio de los factores normalizados multiplicados por su correspondiente peso. El producto gráfico final es un *raster* ponderado con las zonas con una capacidad de acogida más alta para la ubicación de centrales de Minihidráulica, que permite conocer aquellas zonas más adecuadas, así como las menos idóneas para el aprovechamiento de este recurso energético.

Esta operación se realiza mediante una herramienta de *Spatial analyst* denominada Suma Ponderada (*Weight Sum*). A continuación se muestran los *rasters* de la Suma Lineal Ponderada de los 2 modelos estudiados:



## 6.5. RESTRICCIONES DE EMPLAZAMIENTOS PARA LAS CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA

Las capas de restricciones se han obtenido mediante consultas con la herramienta “*Calculadora Raster /Raster Calculator*”. Después, dichas capas se han reclasificado (*Reclasificar/Reclassify*) de manera que se ha dado el valor 1 a las zonas no restringidas y el valor NoData al resto.

### **Restricción Pendientes**

Se ha estimado que aquellas pendientes inferiores al 5% se traducen en un salto bruto de pequeña altura, por lo que se han excluido del análisis aquellos porcentajes de pendientes inferiores a este valor mediante la *Calculadora Raster*.

### **Restricción Red Eléctrica**

Para esta restricción se ha partido de capas de la red eléctrica y subestaciones de la zona de estudio obteniendo áreas de influencia en función de criterios de eficiencia mediante la herramienta “*Zona de Influencia/Buffer*”. Se ha propuesto un radio de eficiencia de 1.000 m a subestaciones eléctricas, y en el caso de la red de alta tensión se ha penalizado con una distancia menor (500 m), debido a que este tipo de conexión necesita de una transformación previa (cambio de tensión), que comporta un mayor coste técnico y ambiental. Ambos *buffer*, se han unificado en un solo *shape* (*Fusionar/Merge*) que posteriormente se ha transformado a *raster* (*Poligono a Raster /Polygon to Raster*).

### **Restricción Red Fluvial**

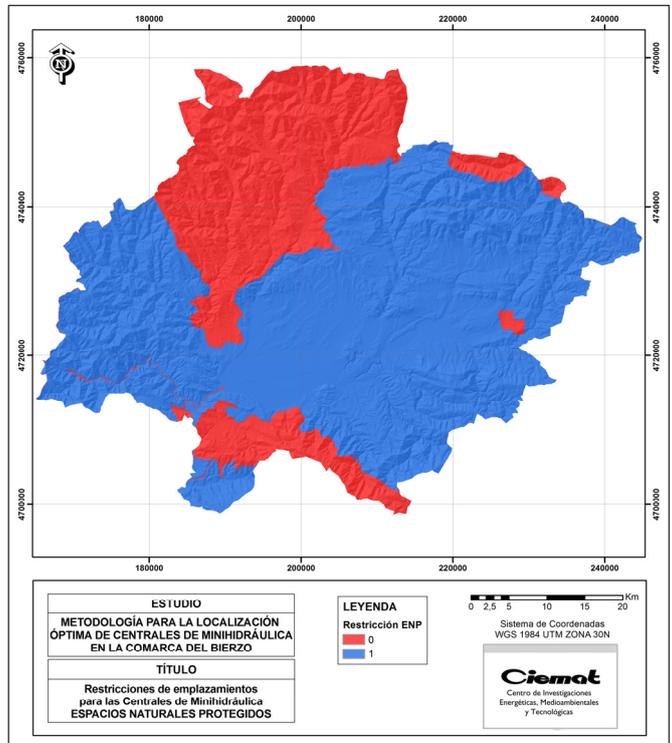
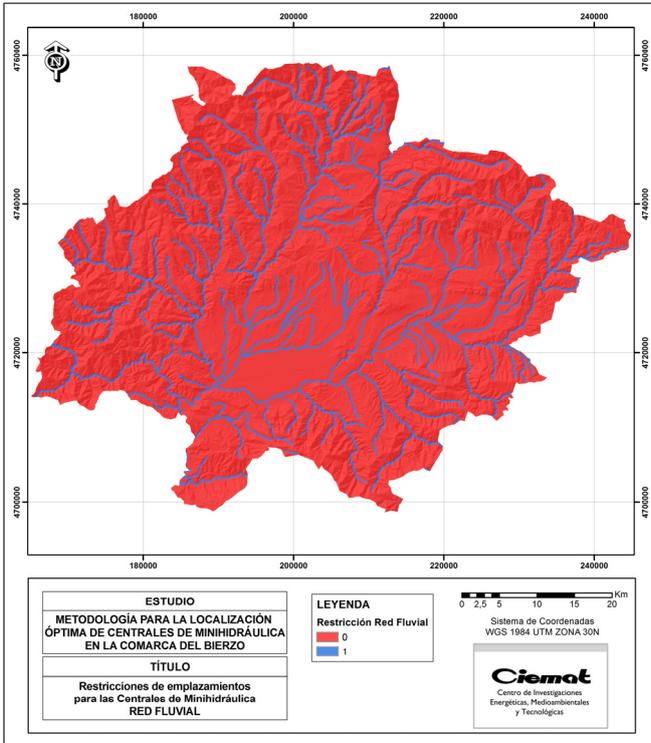
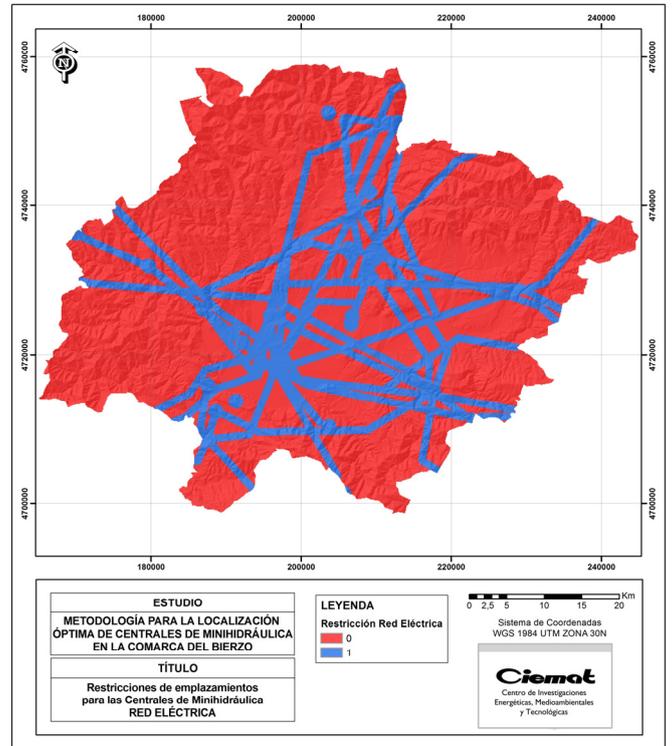
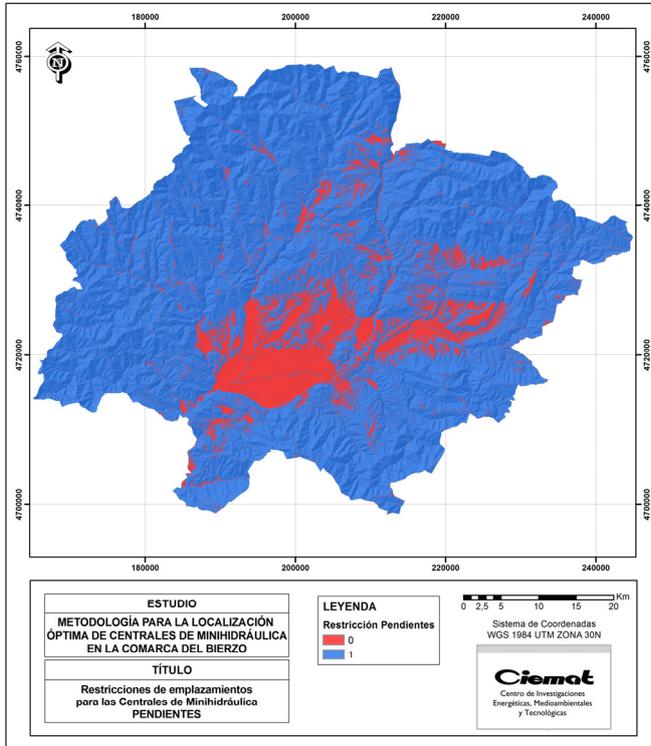
Como es evidentemente, la localización de la central de minihidráulica tiene que estar próxima al curso de agua donde se realice el aprovechamiento. En este sentido se ha estimado que una distancia superior a 100 m supone la inviabilidad del aprovechamiento, por lo que se ha considerado excluir aquellas zonas que estén más alejadas de esta longitud mediante la *Calculadora Raster*.

### **Restricción de Espacios Naturales Protegidos**

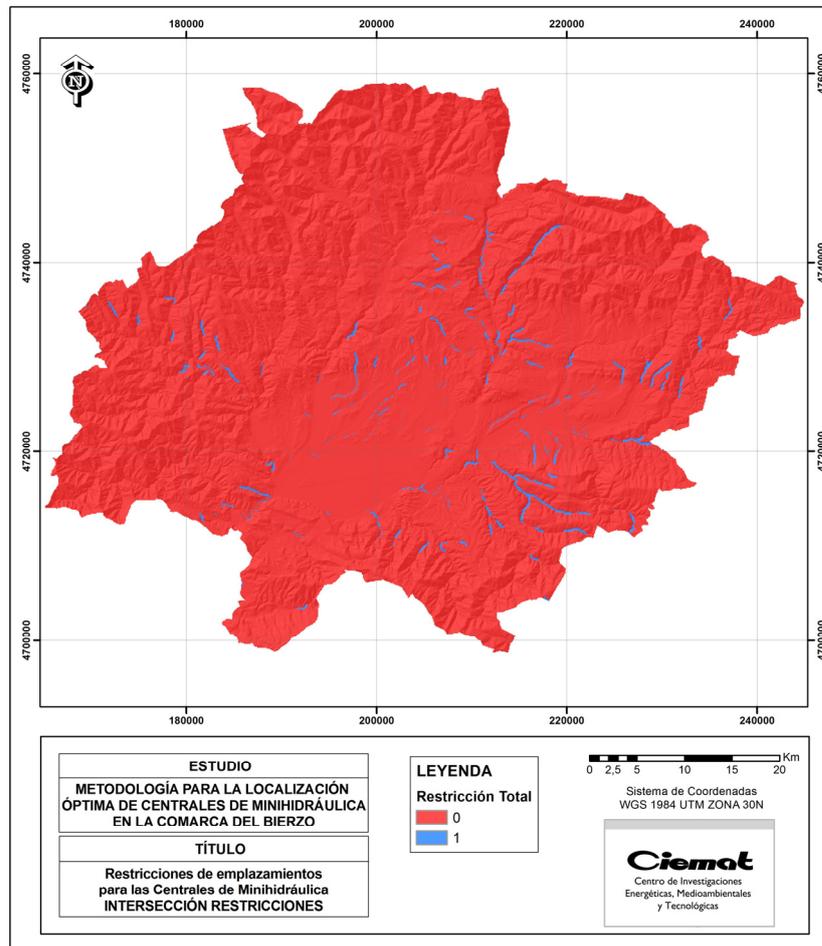
En la zona de estudio encontramos espacios protegidos por la legislación europea, como la Red Natura 2000 (Directiva Aves y Directiva Habitats), nacional (Reserva de la Biosfera) y autonómica o local. En el caso de la selección de emplazamientos para la localización de una industria energética de este tipo, se ha optado por excluir aquellos espacios naturales que presentan protección por cualquier Administración competente.

Para obtener esta restricción en primer lugar se ha convertido la capa vectorial de Espacios Naturales a *raster* (*Poligono a Raster /Polygon to Raster*), y posteriormente se ha realizado una reclasificación de este *raster* (*Reclasificar/Reclassify*) asignando el valor 0 de exclusión a todos los espacios protegidos.

A continuación se muestran los mapas *raster* de las 4 restricciones incluidas para la selección de emplazamientos destinados a instalaciones de minihidráulica:



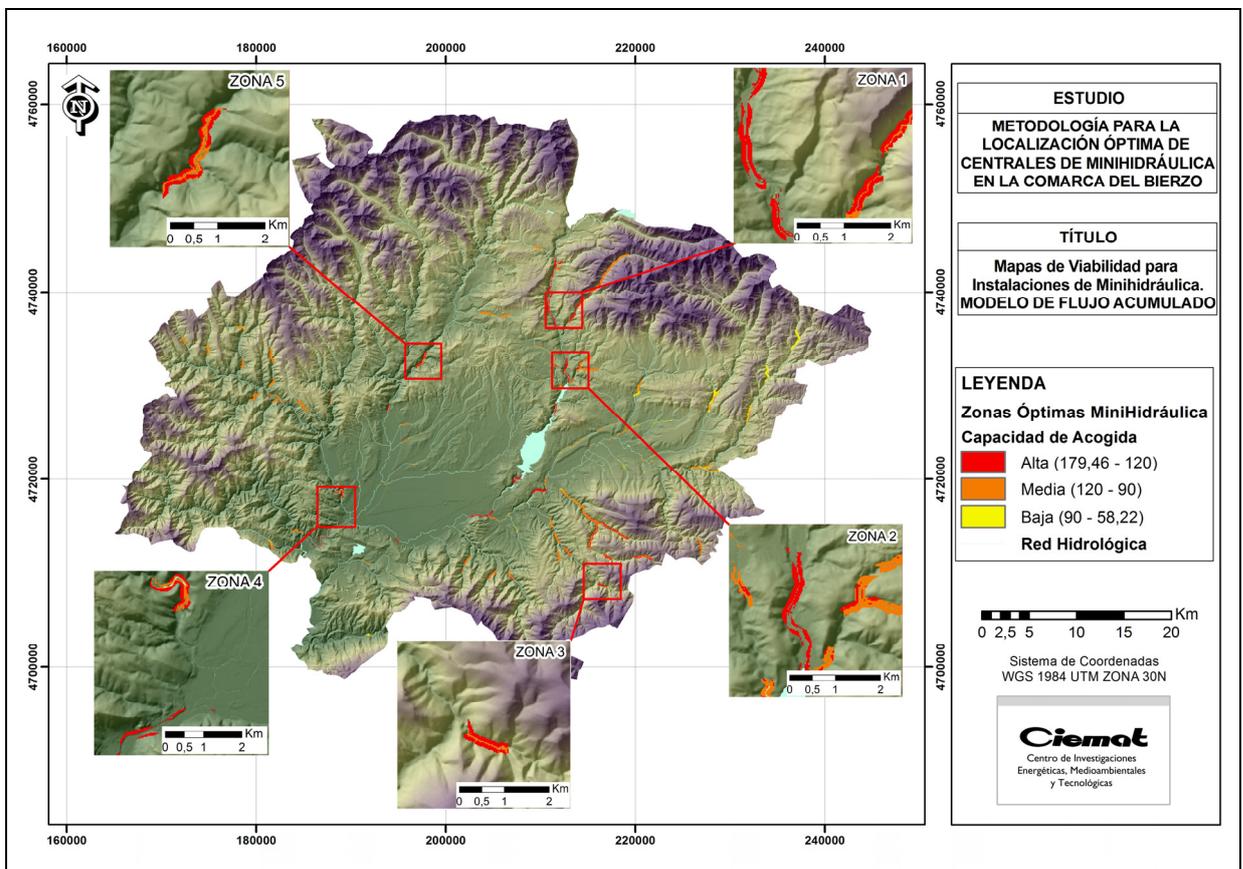
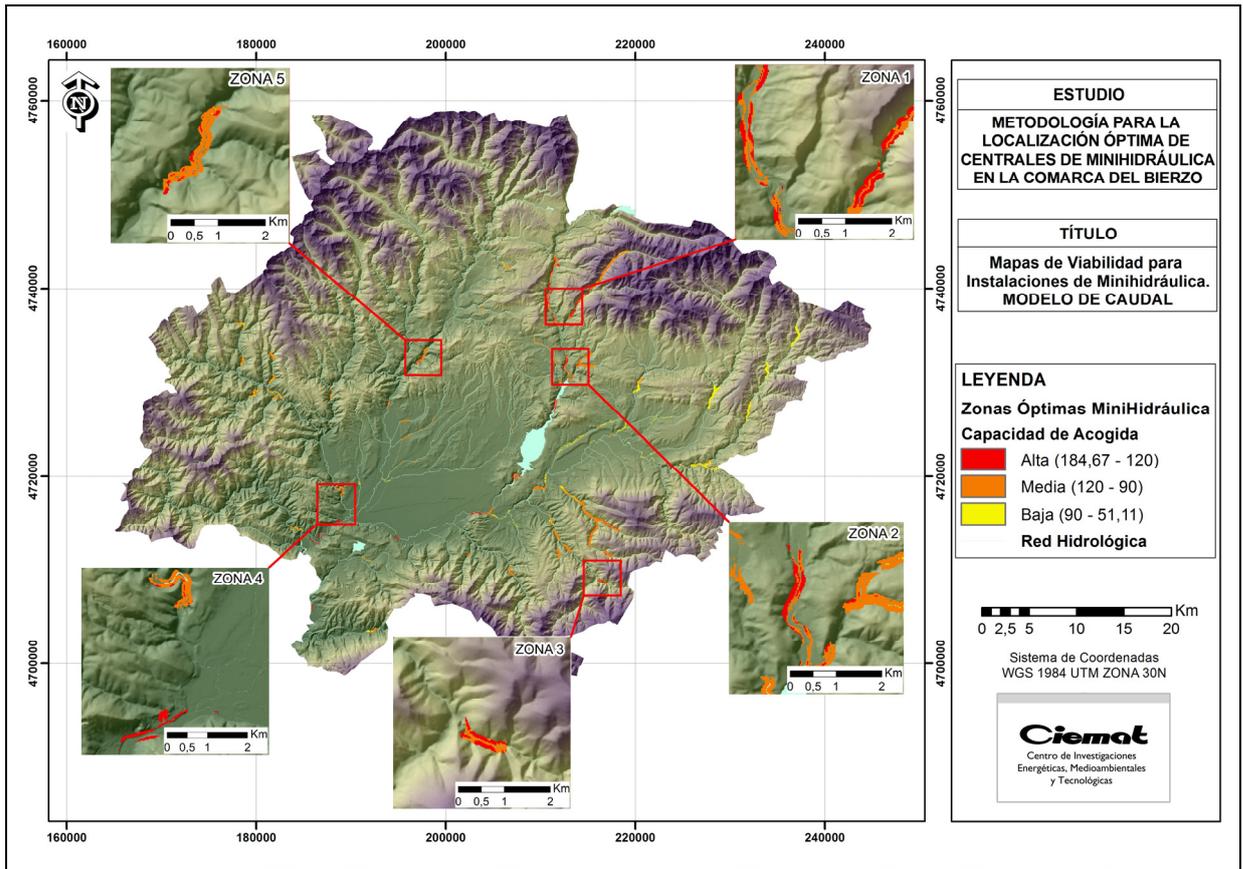
## 6.6. INTERSECCIÓN DEL CONJUNTO DE RESTRICCIONES DE EMPLAZAMIENTOS PARA LAS CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA



## 6.7. RESULTADO DE EMPLAZAMIENTOS ÓPTIMOS PARA LA INSTALACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA

A través de la herramienta “*Calculadora Raster/Raster Calculator*” se multiplica el resultado de la SLP por el producto de la intersección de las restricciones, obteniendo como resultado final del análisis Multicriterio un *raster* con las zonas con una capacidad de acogida ponderada para la ubicación de centrales de Minihidráulica, así como las aéreas excluidas del análisis.

A continuación se presentan dos Mapas de Viabilidad para instalaciones de Minihidráulica en la comarca de El Bierzo, que se corresponden con los dos modelos explicados en esta metodología. Se han incluido ampliaciones de las zonas que presentan una capacidad de acogida más alta para las instalaciones de esta energía renovable:



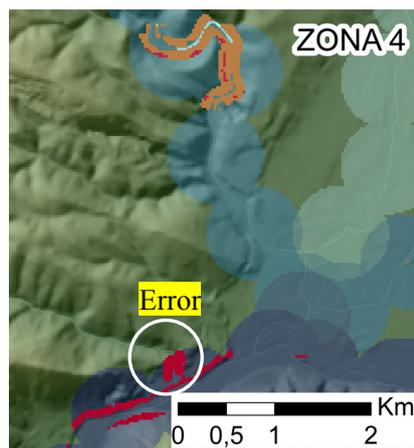
## Interpretación de los resultados

Como resultado final de la metodología multicriterio se obtiene una selección de zonas (ampliadas en los mapas), que presentan una mayor viabilidad para acoger instalaciones de aprovechamiento hidroeléctrico.

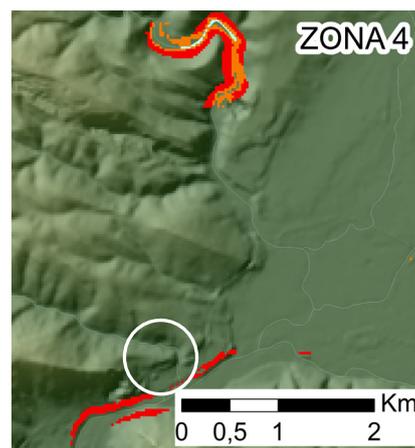
El resultado para esta energía renovable, además del objetivo de localización de zonas óptimas, está orientado a la comparativa entre los dos modelos de metodología desarrollados, puesto que si tienen similitud, el modelo de flujo acumulado podría ser exportable a zonas que tienen una información de aforos de caudales escasa o nula.

Podemos observar que los mapas si presentan parecido y que ambos coinciden en señalar las mismas zonas como las más adecuadas para la explotación de esta tecnología. Aunque se debe señalar, que en el modelo de caudales los valores de acogida no son tan altos como los que recoge el modelo de flujo acumulado para las mismas zonas.

También se debe considerar alguna diferencia, como la que se observa en la zona 4. En esta zona el modelo de caudal presenta una ubicación con alta capacidad de acogida, mientras que en el modelo de flujo acumulado este emplazamiento ni siquiera aparece. Esta diferencia se debe a un error en la interpolación de caudales, debida a la distancia de interpolación de 500 m establecida en este modelo, que convierte la zona de desagüe de un afluente al río Sil en un emplazamiento óptimo erróneo. En definitiva, que los datos de caudal en esa zona no corresponden al afluente en cuestión, sino al río Sil que en esa zona presenta un gran caudal.



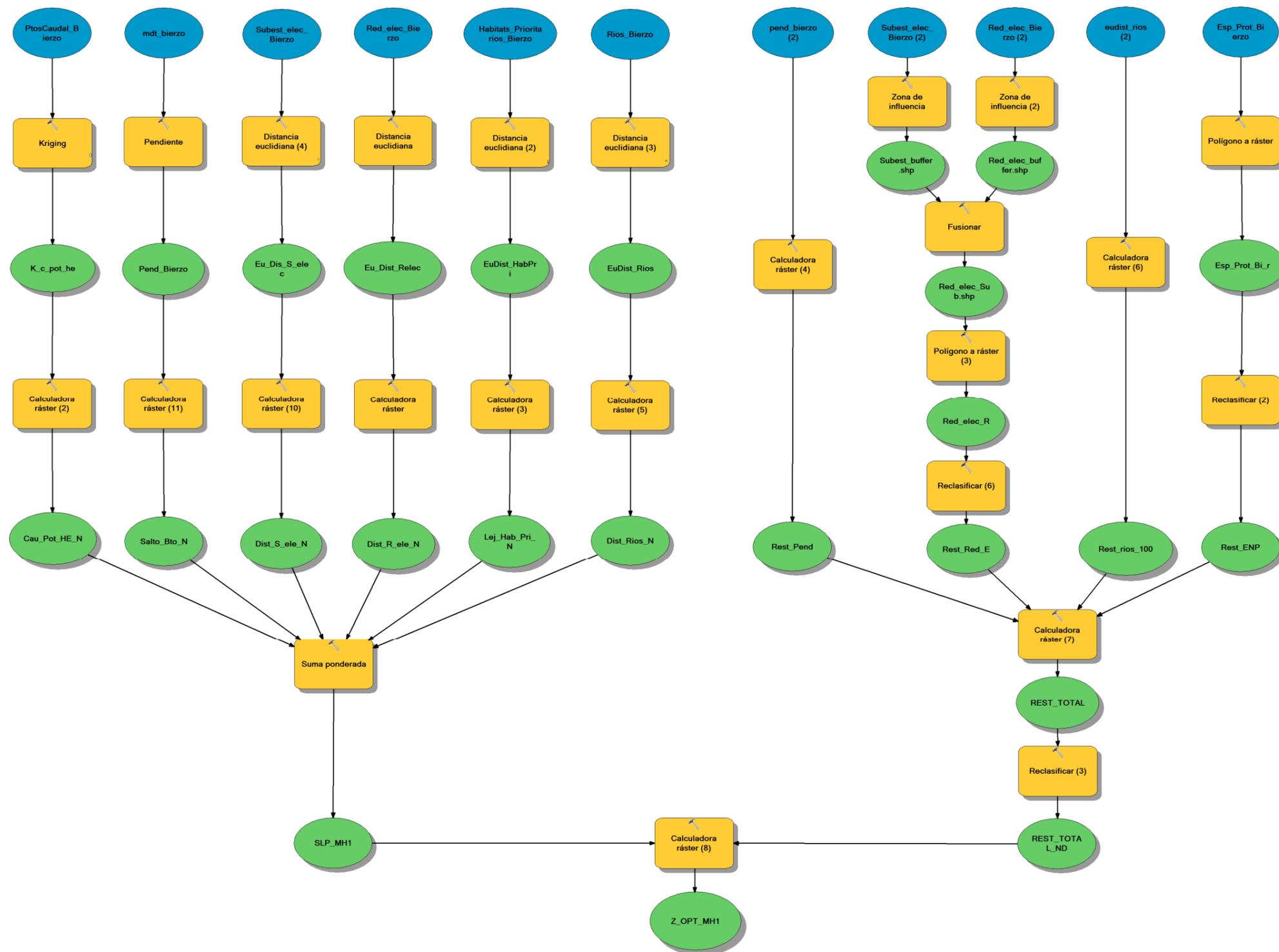
Modelo de caudal



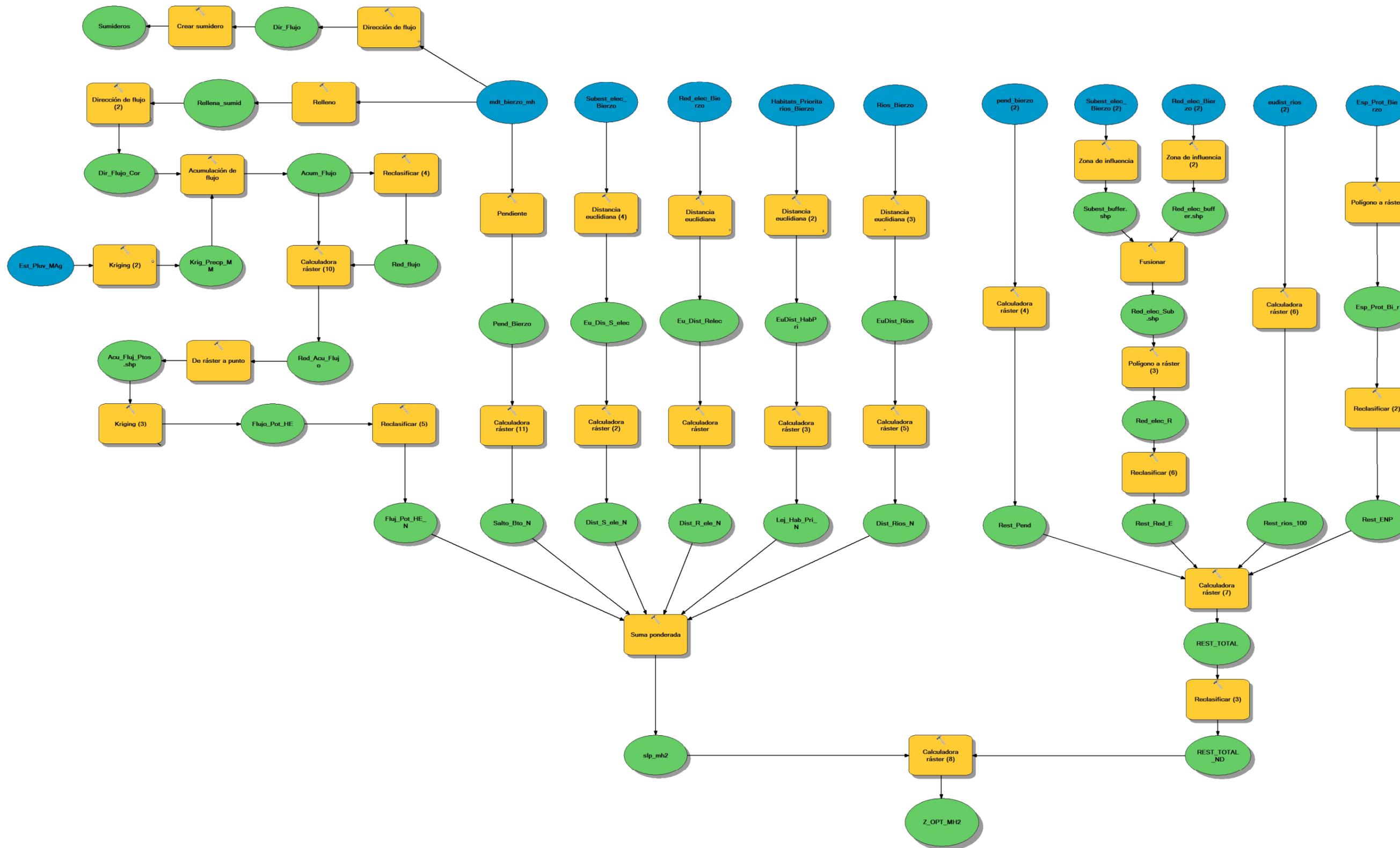
Modelo de Flujo Acumulado

6.8. RESUMEN DE LOS PROCESOS DE OBTENCIÓN DE LOS EMPLAZAMIENTOS PARA INSTALACIONES DE MINIHIDRÁULICA

MODELO A PARTIR DE DATOS DE CAUDAL DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA MIÑO-SIL



MODELO A PARTIR DE DATOS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y DEL MDT DE LA ZONA DE ESTUDIO



## 7. CONCLUSIONES

El principal objetivo del trabajo propuesto es la localización de zonas óptimas para la instalación de centrales de Minihidráulica. Esto se ha logrado a partir de una metodología de Evaluación Multicriterio implementada mediante el uso de diversas herramientas en un entorno SIG: Análisis Espacial, Análisis Geoestadístico, Hidrología etc.

Mediante esta metodología se ha alcanzado el objetivo principal, que no era otro que la localización de zonas óptimas para la instalación de centrales para el aprovechamiento hidroeléctrico mediante el análisis multicriterio. Aunque la escasez de información relativa a datos de caudal, ha conducido a la búsqueda de otro modelo (flujo acumulado) para la obtención de este recurso, a partir de datos pluviométricos y del modelo digital del terreno mediante aplicaciones geoestadísticas (Método Kriging) y herramientas de hidrología. En este sentido, otro de los objetivos logrados ha sido contrastar los dos modelos de metodología desarrollados para evaluar su similitud. Ambos modelos presentan resultados parejos, lo que supone la posibilidad de exportar el modelo de flujo acumulado a zonas que tienen una información de aforos de caudales escasa o nula, atribuyendo un mayor ámbito de aplicación a este modelo.

Las Líneas de Trabajo Futuras podrían ir encaminadas a la mejora del Modelo de Flujo Acumulado mediante la inclusión en SIG de otros factores como la escorrentía superficial, evapotranspiración e infiltración en el suelo del flujo hídrico, que junto con los datos de precipitación manejados nos permitan obtener hipótesis de caudal más precisas.

Otra vía a indagar podría estar dirigida a la consecución de información más exhaustiva de carácter hidroeléctrico, como puede ser el Cálculo del Salto Bruto mediante la utilización de Perfiles Longitudinales y otras herramientas que permitan deducir la energía potencial media (kW/año) en las zonas de mayor capacidad de acogida para la ubicación de centrales de Minihidráulica.

Finalmente, se puede afirmar que los SIG pueden ser una herramienta determinante para la caracterización de las fuentes o recursos energéticos y para la localización óptima de instalaciones que aprovechen esos recursos. En consecuencia, los SIG permiten realizar análisis para la obtención de cartografía del recurso energético y conseguir un primer acercamiento a los trabajos de localización.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

**Del Río, J.** (2010): «Introducción al tratamiento de datos espaciales en hidrología». Ed BuBok.

**Domínguez, J.** (2002). «Los Sistemas de Información Geográfica en la Planificación e Integración de Energías Renovables» [Libro]. - Madrid: CIEMAT, 2002. - Vol. I.

**ESHA** (2006). «Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica». *European Small Hydropower Association*.

**Heinonen, Olli.** (2008): «Gestión de los recursos hídricos mediante la hidrología isotópica». *International Atomic Energy Agency (IAEA)*.

**IDAE** (2006). «Minicentrales Hidroeléctricas». Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

**Legrá Soriano, Martín** (2007): «Variables para el control de precipitaciones». Editorial San K. Pearl.

**Martínez Menchón, M.; Alonso Sarría, F.** (2005): «Validación de la extracción automática de cauces y cuencas con SIG. Obtención del umbral de área óptimo». Universidad de Murcia.

**Muzik, I.** (1996): «*Flood modelling with GIS derived distributed unit hydrographs*». *Hydrological Processes*.

**Olaya Ferrero, V.** (2004). «Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno (Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico)». Web <http://heart.sf.net/textos>.





