

Metodología SIG para la  
Localización de Centrales  
de Biomasa mediante  
Evaluación Multicriterio y  
Análisis de Redes. Modelos  
de Localización-Asignación  
para el Aprovechamiento  
de Biomasa Forestal

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





Metodología SIG para la  
Localización de Centrales  
de Biomasa mediante  
Evaluación Multicriterio y  
Análisis de Redes. Modelos  
de Localización-Asignación  
para el Aprovechamiento  
de Biomasa Forestal

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 Thesauro 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:** 721-13-005-7

Editorial CIEMAT

## CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S29

BIOMASS; GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS; SITE CHARACTERIZATION;  
MAPS; LEGAL ASPECTS

**Metodología SIG para la Localización de Centrales de Biomasa mediante Evaluación Multicriterio y Análisis de Redes. Modelos de Localización-Asignación para el Aprovechamiento de Biomasa Forestal**

Paz, C. de la; Domínguez, J.; Pérez, M<sup>a</sup>. E.  
44 pp. 37 figs. 5 tablas

**Resumen:**

El objetivo principal de este estudio es la localización de zonas óptimas para la instalación de centrales eléctricas de Biomasa Forestal conectadas a la red. Para ello, se ha concebido una Metodología basada en una Evaluación Multicriterio (EMC) e implementada mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), donde a partir de diferentes datos se obtienen factores y restricciones que afectan tanto al aprovechamiento del recurso, como al emplazamiento de las centrales de Biomasa Forestal. Esta metodología proporciona mapas de las zonas de mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso (Biomasa Forestal Disponible) y de las localizaciones idóneas para el emplazamiento de centrales. Ambos mapas se incluyen en un Análisis de Redes que genera Modelos de Localización-Asignación para optimizar los emplazamientos de las centrales en función de las zonas de suministro del recurso biomásico.

**GIS Methodology for Location of Biomass Power Plants Via Multi -Criteria Evaluation and Network Analysis. Location-Allocation Models for Forest Biomass Use**

Paz, C. de la; Domínguez, J.; Pérez, M<sup>a</sup>. E.  
44 pp. 37 figs. 5 tables

**Abstract:**

The main purpose of this study is to find optimal areas for the installation of Biomass Plants for electric generation and grid connected. In order to achieve this goal, a methodology based on Multi-Criteria Evaluation (MCE) and implemented by means a Geographic Information System (GIS) has been developed. Factors and restrictions for biomass resource and power plants location of biomass have been obtained through the dataset. The methodology output includes maps of greater aptitude areas for resource use (forest biomass available), as well as suitable locations for the placement of Forest Biomass facilities. Both cartographic products have been related by means Network Analysis. It generates Location-Allocation Models which allows locating Forest Biomass Facilities according with an optimization of the supply chain from the resource areas.



## **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 (UCM) 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 centrales electrotérmicas de biomasa forestal en la comarca del Bierzo (provincia de León en el noroeste de España).

El proyecto se complementa con un análisis de similares características para la localización de pequeñas centrales hidroeléctricas, que será recogido en un informe posterior.

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.....	9
2.	ESTADO DEL ARTE Y JUSTIFICACIÓN .....	11
2.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA .....	12
2.2.	MARCO LEGAL.....	13
2.2.1	Legislación Europea.....	13
2.2.2	Legislación Nacional .....	13
2.2.3	Legislación Autonómica.....	14
2.3.	ELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	14
3.	OBJETIVOS .....	16
4.	RECURSOS Y FUENTES.....	17
4.1.	RECURSOS.....	17
4.2.	FUENTES.....	17
5.	METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE BIOMASA .....	19
6.	PROCESOS Y RESULTADOS.....	23
6.1.	FACTORES PARA LA ESTIMACIÓN DE ZONAS APTAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA FORESTAL .....	23
6.2.	ASIGNACIÓN DE PESOS A CADA FACTOR .....	27
6.3.	SUMA LINEAL PONDERADA .....	28
6.4.	RESTRICCIONES DE ÁREAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL .....	29
6.5.	RESTRICCIONES DE ÁREAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL .....	32
6.6.	RESULTADO DE LAS ZONAS APTAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL (DEMANDA).....	33
6.7.	RESUMEN DEL PROCESO PARCIAL PARA LA OBTENCIÓN DE LAS ZONAS APTAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL (DEMANDA).....	34
6.8.	RESTRICCIONES DE ÁREAS PARA LAS INSTALACIONES DE BIOMASA FORESTAL .....	35
6.9.	INTERSECCIÓN DEL CONJUNTO DE RESTRICCIONES DE ÁREAS PARA LAS INSTALACIONES DE BIOMASA FORESTAL.....	38

<b>6.10. RESULTADO DE LOS EMPLAZAMIENTOS PARA LAS INSTALACIONES DE BIOMASA FORESTAL (OFERTA).....</b>	<b>39</b>
<b>6.11. RESUMEN DEL PROCESO PARCIAL PARA LA OBTENCIÓN DE LOS EMPLAZAMIENTOS DE INSTALACIONES DE BIOMASA FORESTAL (OFERTA).....</b>	<b>40</b>
<b>6.12. OBTENCIÓN DE SOLUCIONES MEDIANTE MODELOS DE LOCALIZACIÓN-ASIGNACIÓN (ANÁLISIS DE REDES).....</b>	<b>41</b>
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>46</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>46</b>

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estratos del IFN y Cabida para la comarca de El Bierzo	20
Tabla 2. Superficies (ha) y Biomasa Forestal (t ms/ha año) para la comarca de El Bierzo	20
Tabla 3. Relación Pendientes (%) y Eficiencia de Extracción de Biomasa (%)	22
Tabla 4. Pesos asignados a cada factor en la Metodología de Biomasa	23
Tabla 5. Capacidad de acogida de los usos del suelo para las instalaciones	33

## 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 cuyo potencial energético no se ha aprovechado en toda su dimensión, la **Biomasa forestal**. Esta tecnología tiene un carácter sostenible puesto que aprovecha el potencial energético de los bosques, manteniendo la calidad ambiental del entorno. El interés medioambiental de la biomasa reside en que, siempre que se obtenga de una forma renovable y sostenible, es decir que el consumo no vaya a más velocidad que la capacidad del bosque para regenerarse, es la única fuente de energía que aporta un balance de CO<sub>2</sub> favorable, de manera que la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento más CO<sub>2</sub> del que se libera en su combustión. 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 los residuos forestales, mejorando las condiciones de vida y empleo, a la vez que se realiza un uso sostenible de estos recursos naturales.

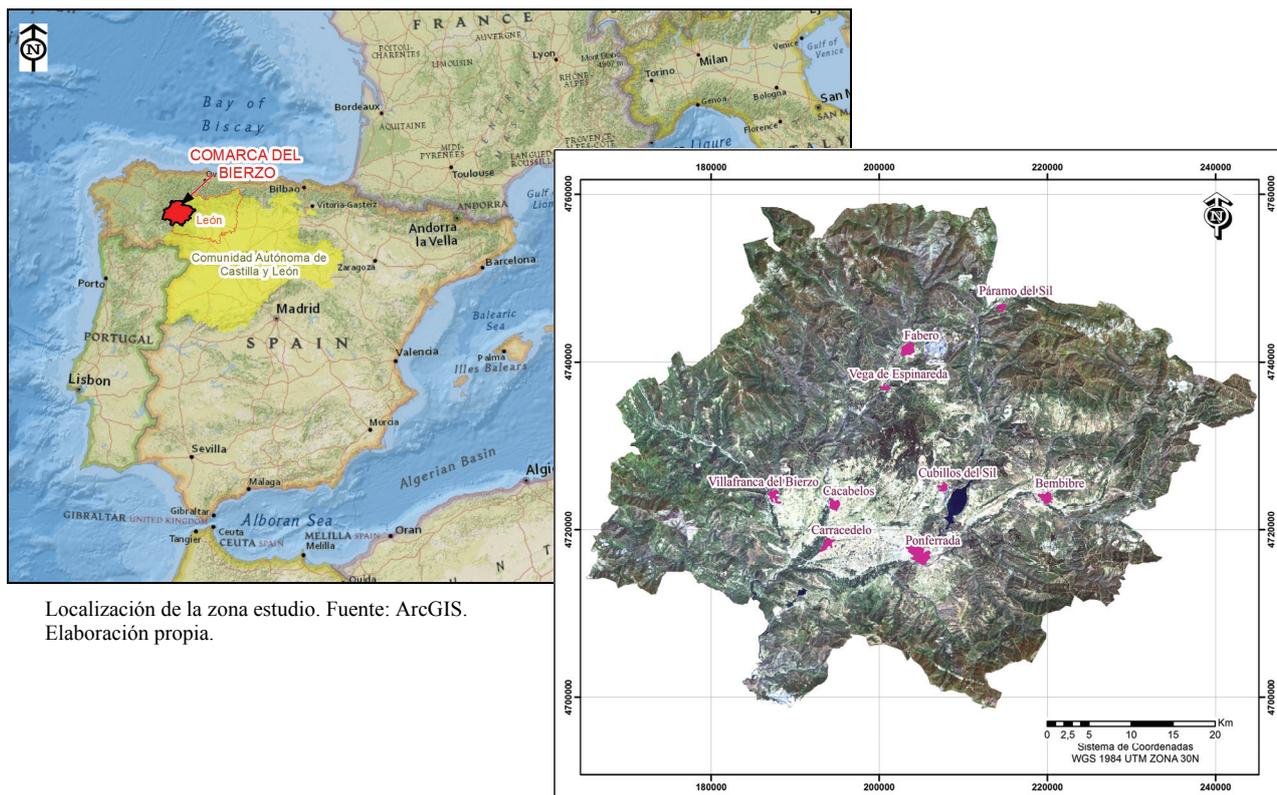
La **valoración del recurso**, es el paso previo dentro del dimensionado de instalaciones o sistemas que aprovechan algún tipo de fuente energética. En este caso el recurso utilizado son los **residuos forestales** generados en las operaciones silvícolas de limpieza, poda y cortas parciales o finales de los montes que pueden ser utilizados como combustibles orgánicos en aplicaciones eléctricas, térmicas y/o de co-combustión (IDAE, 2007). La estimación de la biomasa forestal arbolada se basa en estudios y aplicaciones de bases de datos nacionales actualizados, como es el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN, 1986-1996), y el Mapa Forestal (MFE50, 2007). Sin embargo, el conocimiento de la cantidad potencial de residuos forestales existente en el territorio no es el único factor para determinar

la viabilidad de utilización de este recurso en aplicaciones energéticas (Domínguez, 2002; Velázquez, 2006). Existen otros factores destacados de índole espacial que también inciden de forma decisiva en su aprovechamiento, por cuanto determinan el coste de la extracción del recurso, como la pendiente, la distancia a la red de transporte, así como otros condicionantes ambientales.

Por otro lado, es imprescindible un estudio exhaustivo de la **localización del emplazamiento**, que en el caso de la biomasa forestal presenta una dispersión territorial y una escasa densidad energética, por lo que se requiere un estudio en el que se relacionen la demanda del recurso y la oferta de localizaciones para las instalaciones.

De todo ello se deduce, una componente fundamentalmente espacial, tanto en la valoración del recurso como en la localización de emplazamientos óptimos para el aprovechamiento de la biomasa forestal. La obtención de este recurso y la ubicación de instalaciones de esta tecnología presentan limitaciones que están relacionadas con sus características geográficas. 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 las instalaciones de biomasa forestal. 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 extensa superficie de recursos forestales. Además, El Bierzo ha sido una comarca energética tradicional, basada en la minería del carbón, por lo que 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).

Hoy en día, las energías renovables, aparte de respetar el medio ambiente, constituyen una importante fuente de **creación de empleo**. Según las previsiones, la energía que reportará más puestos de trabajo es la energía procedente de la biomasa (CIEMAT).

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 Biomasa Forestal 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 BIOMASA

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), utiliza la definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 para catalogar la “biomasa” como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”. La combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el que absorben y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento) y no del subsuelo, capturado en épocas remotas, precisamente como el gas o el petróleo.

Hay varios tipos de biomasa utilizables como fuente de energía, distinguiéndose los que corresponden al entorno forestal de los del agrícola. La biomasa de origen forestal permite diversas clasificaciones, según proceda de cortas de masas no comerciales, de restos de corta de otras especies comerciales o de residuos de las industrias forestales (serrerías, polvo de lijado, etc.). La agrícola también presenta diferentes orígenes (orujo, paja, cardo, maíz, etc.) e igualmente aporta residuos de sus industrias (alpechines, cáscaras de frutos secos, harineras, etc.). Por último, también se obtiene biomasa de cultivos energéticos, tanto forestales (chopo, eucalipto, paulonia, acacia, sauce, etc.) como agrícolas (sorgo, colza, etc.,).

Para este trabajo se contempla exclusivamente como fuente de energía la biomasa forestal residual, que al igual que el resto de recursos proveedores de biomasa, presenta la ventaja de su **disponibilidad constante** frente a otras renovables de carácter más variable como la eólica, ya que la biomasa conserva su energía hasta el momento de su utilización. Esta propiedad hace que la biomasa sea la energía renovable más fácil de gestionar, permitiendo crear un stock energético para los momentos en que las otras fuentes, no se encuentren disponibles (Jarabo, 1999; Lorente, 2009). Otra ventaja que conlleva el uso de la biomasa forestal residual es la **reducción de riesgos de incendios forestales** y de plagas de insectos y los gastos asociados a su prevención y extinción. Por el contrario, uno de sus principales inconvenientes frente a otras energías de este grupo, que limita su desarrollo y utilización, es su escasa concentración espacial, su ubicación en terrenos de difícil accesibilidad (IDAE, 2005; IDAE, 2007), así como la actualización de la información sobre nuevas superficies reforestadas. Por este motivo, el conocimiento de la disponibilidad de este recurso resulta prioritario de cara a conocer la viabilidad de proyectos que los pretendan utilizar (IDAE, 2005; IDAE, 2007; Esteban et al., 2008).

## 2.2. MARCO LEGAL

La legislación relativa al sector de la biomasa es extensa. En este apartado se ha recopilado información legislativa a nivel europeo, nacional y autonómico. La legislación sobre biomasa abarca distintas áreas de esta tecnología, por lo que en este caso se ha limitado la información a aquella normativa que afecta a la biomasa forestal, objeto de estudio en este trabajo:

### 2.2.1 Legislación Europea

- Energía para el futuro: fuentes de energía renovables. Libro Blanco para una Estrategia y un Plan de Acción Comunitarios COM (97) 599 final. COMISIÓN EUROPEA. Bruselas 26/11/97.
- Resolución del Consejo de 15 de diciembre de 1998 relativa a la Estrategia de la Unión Europea para el sector forestal (1999/C 56/01).
- Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2001, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad (Diario Oficial L 283 de 27/10/2001).
- Comunicación de la Comisión de las Comunidades Europeas COM (2005) 628 final, de 7 de diciembre de 2005. Plan de acción sobre biomasa (Diario Oficial C 49 de 28/2/2006).

### 2.2.2 Legislación Nacional

- Ley 82/80, de 30 de diciembre de 1980, (Jefatura del Estado) Conservación de la Energía. Establece el marco jurídico general para potenciar la adopción de las energías renovables.
- Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico (BOE nº 285, 28/11/97).
- Real Decreto 6/2001, sobre fomento de la forestación en tierras agrícolas, donde se traspone la legislación de ayudas del FEOGA para implantación de cultivos forestales, incluyendo cultivos energéticos forestales.
- Disposición Adicional Cuarta de la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, que establece la necesidad de una estrategia para el desarrollo del uso energético de la biomasa forestal residual.
- Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

- 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.

### **2.2.3 Legislación Autonómica**

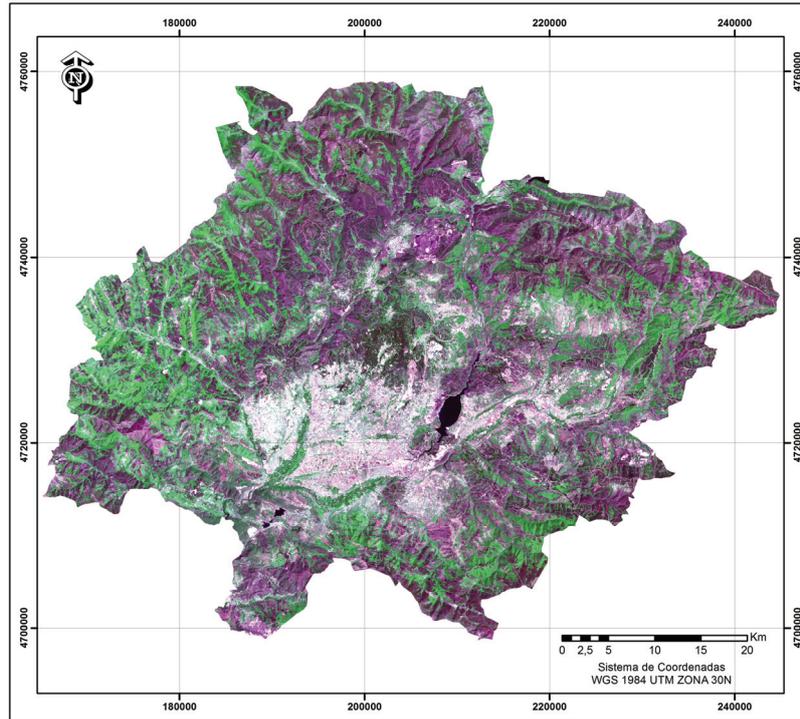
- Decreto 2/2011, de 20 de enero, por el que se aprueba el Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León.

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

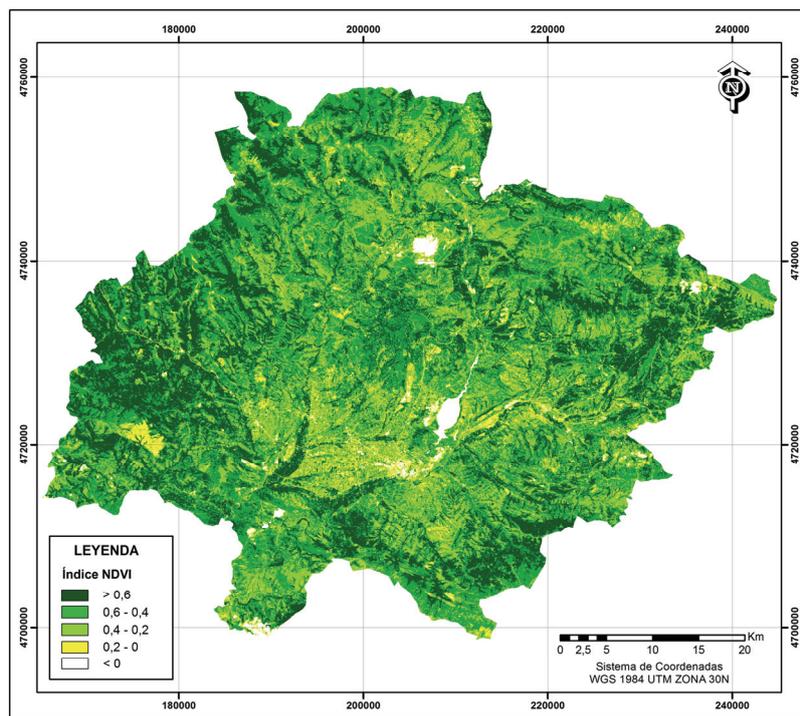
El motivo fundamental por el que se ha seleccionado la comarca de El Bierzo para encuadrar este estudio es porque dispone, de forma notable, de los recursos naturales de los que se nutre la energía renovable estudiada, las masas Forestales.

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.

Bajo esta singularidad climática habitan gran número de especies forestales atlánticas junto con especies del clima mediterráneo. Las especies que destacan son los encinares y rebollares que ocupan gran parte del paisaje berciano, así como las masas de coníferas que se sitúan en su mayoría en la parte central de la comarca. Mediante la visualización y análisis de imágenes de satélite y de aplicaciones de mejoras espectrales como el Índice de Color Natural y el NVDI, podemos comprobar que El Bierzo presenta una importante superficie forestal y por tanto, un gran potencial para la Biomasa:



Índice de Color Natural. Fuente: IGN. Elaboración propia.



Índice NDVI. Fuente: IGN. Elaboración propia.

El Índice NDVI se ha clasificado en 5 categorías, que van desde los valores menores a 0 (zonas sin vegetación, masas de agua y suelo desnudo); hasta los valores por encima de 0,6 que corresponde a la vegetación que presenta mayor vigor (frondosas). Entre 0 y 0,2 se incluirían los cultivos de secano, mientras que las coníferas se encuadrarían entre los valores de NDVI de 0,4 y 0,6.

### 3. OBJETIVOS

El **propósito principal** de este trabajo es la localización de zonas óptimas para la instalación de centrales de Biomasa Forestal que puedan generar energía eléctrica y estén conectadas a la red. Para ello se ha concebido una metodología basada por un lado, en técnicas de **Evaluación Multicriterio** (EMC), donde a partir de diferentes datos se obtienen factores y restricciones que afectan al aprovechamiento del recurso y al emplazamiento de las centrales de Biomasa Forestal, así como en un **Análisis de Redes** final que relaciona el recurso energético con las instalaciones de esta tecnología.

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

- Obtención de las zonas que presentan mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso (**demanda de biomasa forestal**), mediante una Evaluación Multicriterio. Con esta técnica se tienen en cuenta distintos factores importantes para la elección de estas zonas, como las características de las masas forestales, la orografía del terreno y la existencia de las infraestructuras, así como las restricciones técnicas y ambientales que afectan a estos factores.
- Obtención de enclaves idóneos para el emplazamiento de centrales de Biomasa Forestal (**oferta de localizaciones para las instalaciones**) mediante una Evaluación Multicriterio Booleana. En este método todos los criterios considerados (técnicos y ambientales) para la selección de estas áreas, son restricciones y el resultado es su intersección.
- Distintas soluciones para la ubicaciones de centrales de biomasa forestal a partir de un **modelo de localización-asignación con análisis de redes** en el que se relacionan la demanda del recurso y la oferta de localizaciones para las instalaciones.

## 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) y del Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER) de Soria, pertenecientes ambos 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:

- Mapa Forestal Español 1:50.000 (2006) en formato *shapefile*.
- Base de datos del Inventario Forestal Nacional 3 (1997 - 2007).
- 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*.
- Usos del suelo: Corine Land Cover 2006 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:

- Espacios Naturales Protegidos de la zona de estudio en formato *shapefile*.

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 BIOMASA

La biomasa forestal es un recurso que presenta dispersión territorial y una escasa densidad energética, por lo que se debe diferenciar por un lado las zonas con mayor aptitud para el aprovechamiento de la demanda de biomasa forestal, y por otro lado la oferta de emplazamientos potenciales para las instalaciones donde explotar el recurso. Tanto la estimación del recurso como la selección de los emplazamientos para las instalaciones requieren de un análisis multicriterio propio 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. En principio, se han establecido factores tanto de tipo técnico como ambiental. Estos factores tendrán un formato *raster*, es decir, si la

información gráfica que se dispone es vectorial, habrá que transformarla a este formato *raster* (Tamaño de celda/píxel 100 x 100 m.), para posteriormente poder realizar el análisis multicriterio.

Mediante la consulta de distintas fuentes del campo de la Biomasa Forestal, se han propuesto una serie de condiciones que transformaremos en factores y que, en definitiva, deben reunir las zonas de mayor aptitud para el aprovechamiento de la biomasa forestal. En el apartado 6.1. *Factores para la estimación de zonas aptas para el aprovechamiento de la Biomasa Forestal*, 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 como la cantidad de recurso disponible o la facilidad de extracción del recurso. 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 esta metodología se han establecido restricciones para:

- La estimación de las zonas con mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso.
- La selección de los emplazamientos para las instalaciones.

#### 6. Obtención de zonas aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal (DEMANDA)

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 será multiplicado por el producto de la intersección de las restricciones, obteniendo el *raster* con valores de aptitud y con las aéreas excluidas del análisis.

Este raster obtenido se transforma en una capa vectorial de puntos (*De Raster a Punto*) que denominamos Puntos de Demanda, manteniendo los valores de aptitud para poder integrarlo posteriormente en un análisis de redes.

#### 7. Obtención de emplazamientos óptimos para las instalaciones de Biomasa Forestal (OFERTA)

Como se ha mencionado anteriormente en el apartado de *Obtención de Restricciones*, la selección de emplazamientos idóneos para la localización de centrales de Biomasa se realiza mediante intersección booleana. En este análisis se establece una condición para cada una de las capas de información que posteriormente se superponen para comprobar dónde se cumplen todas las condiciones. Las restricciones se generan mediante mapas binarios de unos (no hay restricción) y ceros o *NoData* (sí hay restricción). Una vez que todos los mapas están en formato binario de unos y ceros, se procede a multiplicarlos entre sí (*Calculadora Raster*), eliminando las zonas excluidas, y en definitiva, obteniendo las zonas idóneas para el emplazamiento.

Este *raster* obtenido se transforma en una capa vectorial de puntos (*De raster a Punto*) que denominamos Puntos de Oferta, y que integraremos posteriormente en un análisis de redes.

### **8. Obtención de soluciones mediante modelos de Localización–Asignación (Análisis de Redes)**

Los modelos de Localización-Asignación intentan evaluar las localizaciones de instalaciones deseables o no deseables en base a la distribución de la demanda y generar alternativas para lograr una distribución espacial más eficiente y/o equitativa. Buscan las ubicaciones óptimas (localización) y determinan las mejores vinculaciones de la demanda (asignación).

El objetivo de la localización-asignación, en este caso, es buscar instalaciones de modo que su suministro desde los puntos de demanda sea lo más eficiente posible.

Los elementos del modelo de localización-asignación son los siguientes:

- Puntos de demanda (ponderados): Zonas aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal
- Puntos de oferta: Emplazamientos óptimos para las instalaciones de Biomasa Forestal
- Cálculo de distancias: A través de la red de transporte

El análisis de localización-asignación en ArcGIS ofrece seis tipos de problemas diferentes para responder a preguntas de tipo específico: Minimizar la impedancia, Maximizar la cobertura, Minimizar las instalaciones, Maximizar la asistencia, Maximizar la cuota de mercado y Cuota de mercado objetivo. Para este estudio nos interesa aprovechar al máximo la localización de las instalaciones, es decir, que abarquen la mayor demanda posible de Biomasa Forestal, por este motivo se ha seleccionado el análisis de **Maximizar Cobertura**.

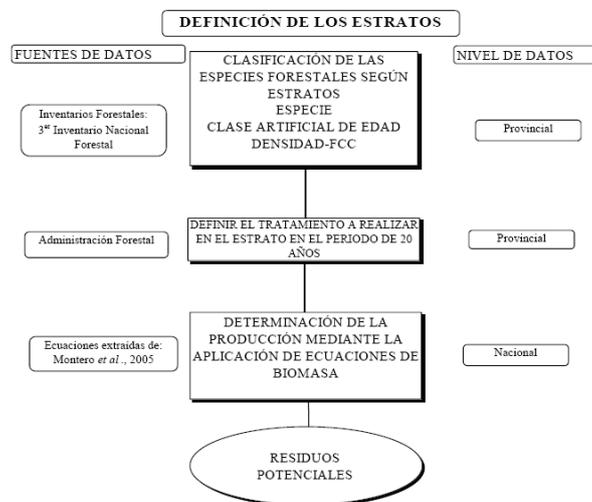
## 6. PROCESOS Y RESULTADOS

### 6.1. FACTORES PARA LA ESTIMACIÓN DE ZONAS APTAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA FORESTAL

Mediante la consulta de distintas fuentes del campo de la Biomasa Forestal, se han propuesto una serie de condiciones que transformaremos en factores y que, en definitiva, deben reunir las zonas de mayor aptitud para el aprovechamiento de la biomasa forestal.

#### Factor de Biomasa Disponible

Para la obtención de este factor se ha extraído información del **Plan de Aprovechamiento Energético de la Biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana (León) elaborado por el CEDER**. Este Plan desarrolla un método para cuantificar la Biomasa Forestal aplicando bases de datos nacionales actualizadas como el Inventario Forestal Nacional (IFN3) y el Mapa Forestal Español (MFE). La biomasa forestal arbolada se cuantifica a partir de los trabajos de Montero et al., (2005) “Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles” y “Evaluación de los recursos de biomasa forestal en la provincia de Soria. Análisis de alternativas para su aprovechamiento energético” de Esteban et al., (2004).



Esquema de trabajo. Fuente: Plan de Aprovechamiento Energético de la Biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana

El IFN3 y el MFE, proporcionan datos cuantitativos provinciales sobre las superficies arboladas describiendo las mismas por estratos. Los estratos se definen y clasifican según la especie o especies presentes.

Tabla 1. Estratos del IFN y Cabida para la comarca de El Bierzo

ESTRATO	FORMACIÓN FORESTAL DOMINANTE	ESPECIE DOMINANTE	FRACCIÓN CABIDA CUBIERTA (%)
1	<i>Quercus pyrenaica</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>	≥ 70
2	<i>Quercus pyrenaica</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>	40 - 69
3	<i>Quercus pyrenaica</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>	20 - 39
7	<i>Quercus pyrenaica</i> , <i>Quercus ilex</i> y 70% de cobertura de matorral	<i>Quercus pyrenaica</i>	≥ 5
8	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	≥ 70
9	<i>Pinus sylvestris</i> con <i>Pinus nigra</i> o con <i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	≥ 70
11	<i>Pinus sylvestris</i> con <i>Pinus sylvestris</i> con <i>Quercus pyrenaica</i> y 70% de cobertura de matorral	<i>Pinus sylvestris</i>	40 - 69 ó ≥ 60
12	<i>Quercus ilex</i> y <i>Quercus ilex</i> con <i>Quercus pyrenaica</i>	<i>Quercus ilex</i>	≥ 20
13	<i>Quercus ilex</i>	<i>Quercus ilex</i>	≥ 5
15	<i>Pinus pinaster</i> y 70% de cobertura de matorral	<i>Pinus pinaster</i>	≥ 20
16	<i>Pinus radiata</i>	<i>Pinus radiata</i>	≥ 70
18	<i>Pinus nigra</i>	<i>Pinus nigra</i>	≥ 20
20	<i>Quercus pyrenaica</i> y <i>Betula ssp</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>	≥ 40
21	<i>Populus x Canadensis</i>	<i>Populus x Canadensis</i>	≥ 5

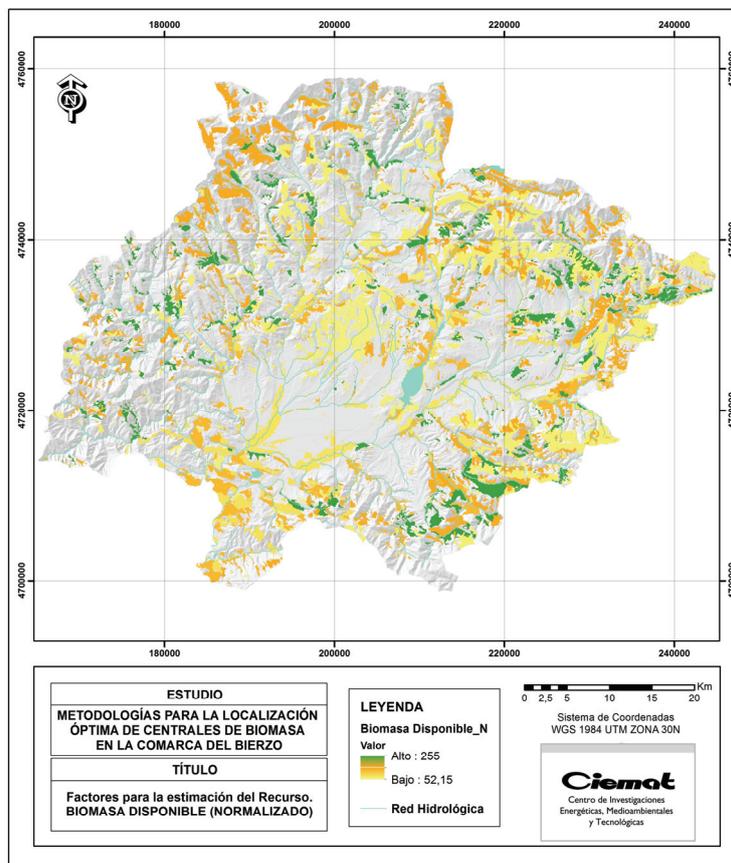
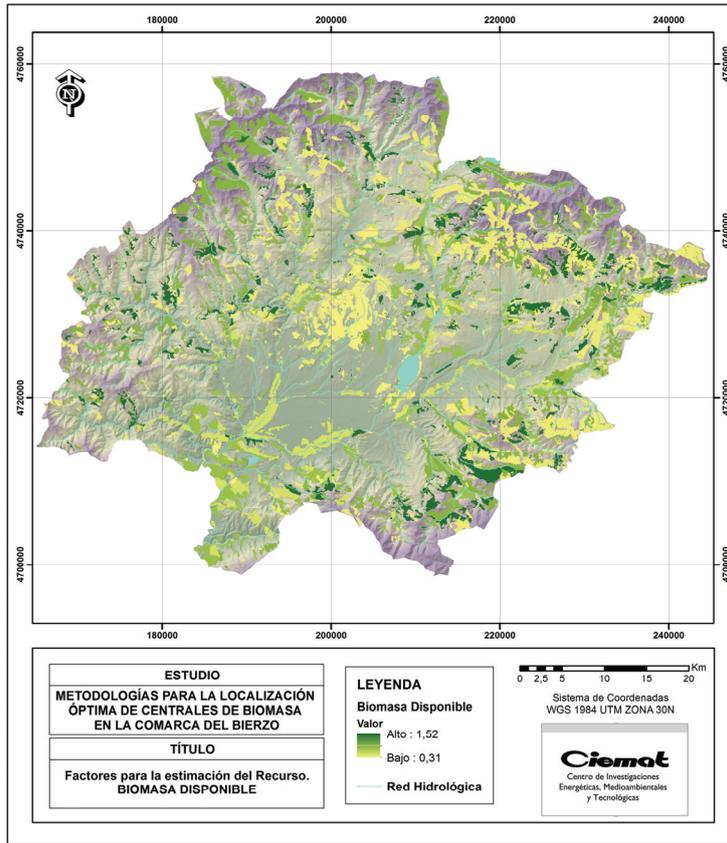
Una vez clasificadas las masas forestales por estratos, se identifican los tratamientos adecuados que pueden ser realizados en cada estrato en un horizonte de 20 años. A partir de las labores silvícolas a realizar se estiman las cantidades de residuos que podrían obtenerse en cada estrato.

Tabla 2. Superficies (ha) y Biomasa Forestal (t ms/ha año) para la comarca de El Bierzo

ESTRATO	ESPECIE DOMINANTE	BIOMASA POTENCIAL (t ms/ha)	SUPERFICIE BIOMASA DISPONIBLE (ha)	PESO BIOMASA DISPONIBLE (t ms/año)	RECURSO DE BIOMASA DISPONIBLE (t ms/ha año)
1	<i>Quercus pyrenaica</i>	45,91	11.544	17.646	1,53
2	<i>Quercus pyrenaica</i>	25,94	13.366	11.693	0,87
3	<i>Quercus pyrenaica</i>	8,63	2.671	835	0,31
7	<i>Quercus pyrenaica</i>	10,36	2.601	969	0,37
8	<i>Pinus sylvestris</i>	10,23	1.759	661	0,38
9	<i>Pinus sylvestris</i>	12,01	692	300	0,43
11	<i>Pinus sylvestris</i>	9,92	8.466	3.017	0,36
12	<i>Quercus ilex</i>	21,75	8.442	6.489	0,77
13	<i>Quercus ilex</i>	13,54	4.251	2.028	0,48
15	<i>Pinus pinaster</i>	10,69	1.041	415	0,40
16	<i>Pinus radiata</i>	7,96	3.102	988	0,32
18	<i>Pinus nigra</i>	9,67	782	279	0,36
20	<i>Quercus pyrenaica</i>	28,48	8.701	7.711	0,89
21	<i>Populus x Canadensis</i>	11,87	4.308	1.993	0,46

En la siguiente figura se muestra el *raster* del recurso de Biomasa Disponible (t ms/ha año) con los valores que se muestran en la tabla 2. Este se ha obtenido a partir del *shape* del Mapa Forestal de España, actualizado con la base de datos del IFN3 y con la estimación de residuos por estratos, convirtiéndolo posteriormente a formato *raster* (*Polígono a Raster /Polygon to Raster*) con un tamaño de celda de 100 x 100 m). Finalmente, se obtiene el *raster* normalizado mediante la ecuación lineal que se describe en la metodología, implementada en ArcGIS (*Calculadora Raster /Raster Calculator*):

**Metodología SIG para la Localización de Centrales de Biomasa  
mediante Evaluación Multicriterio y Análisis de Redes. Modelos de  
Localización-Asignación para el aprovechamiento de Biomasa Forestal**



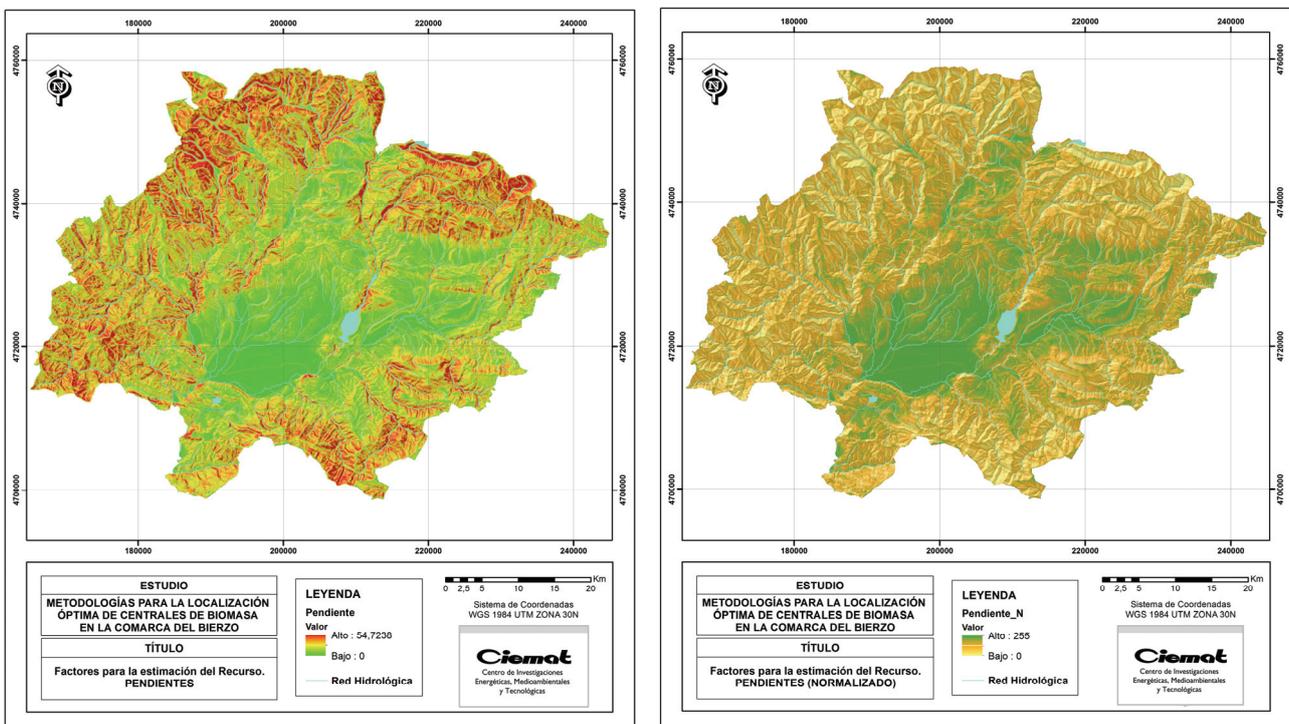
## Factor Pendientes

Este factor es importante para la extracción del recurso disponible de las parcelas forestales, puesto que conlleva la utilización de maquinaria incrementando el coste de extracción. La maquinaria utilizada en estos trabajos forestales trabaja hasta determinados valores máximos de pendiente, de manera que el terreno susceptible de ser utilizado para el acopio de biomasa se clasifica en función de este elemento. Para establecer los valores del factor pendientes se han tenido en cuenta los intervalos de pendiente del terreno-eficiencia de extracción de recursos estimados por Garañeda y Bengoa (2005) para Castilla y León.

Tabla 3. Relación Pendientes (%) y Eficiencia de Extracción de Biomasa (%)

PENDIENTES (%)	EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN (%)
<10%	80%
10 - 30%	70%
30 -50%	20%
>50%	Nula

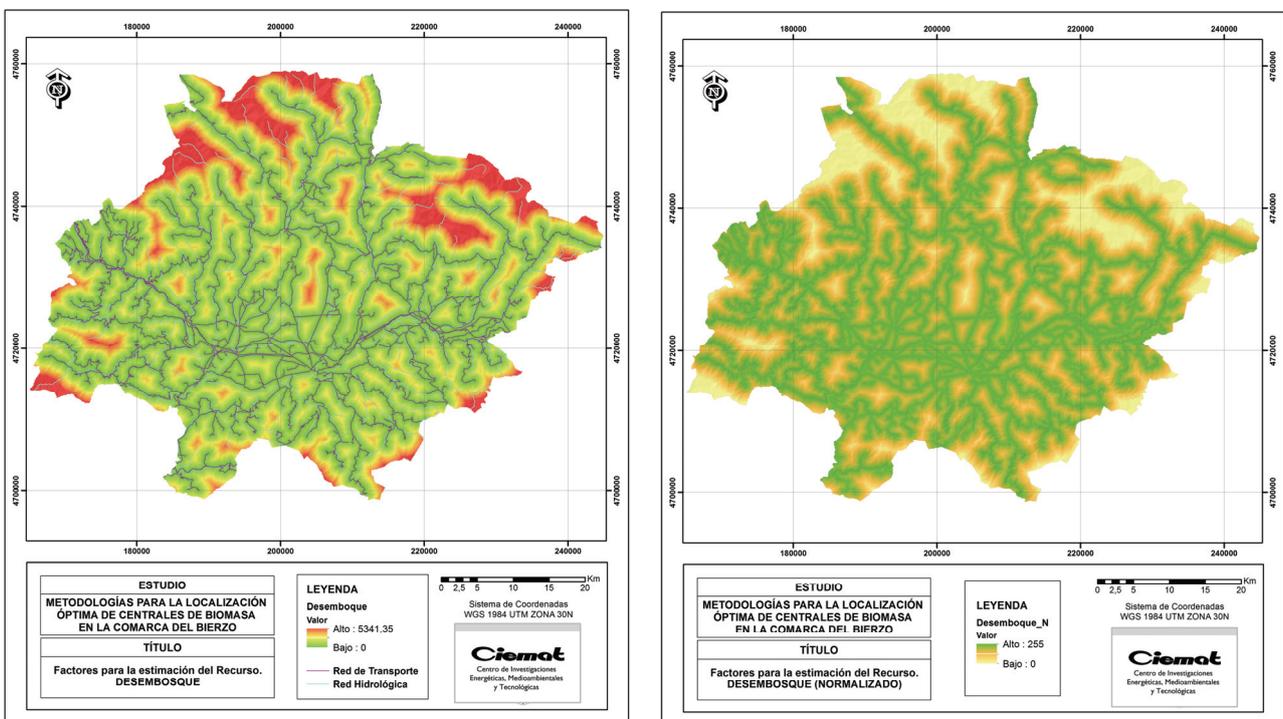
Las pendientes se han obtenido a partir de un MDT de la zona del Bierzo, formado por un mosaico de varios MDTs (tamaño celda de 25x25 m.), que se ha remuestreado (*Remuestrear/Resampling*) para tener un paso de malla de 100 x 100 m. Este *raster* se ha utilizado, finalmente, para obtener las pendientes mediante la herramienta “*Pendiente/Slope*”. A continuación se muestran el *raster* de pendientes de El Bierzo y el *raster* normalizado, en el que se utiliza una gama de colores que van desde el verde (valores más altos) a una amarillo claro (valores bajos).



## Factor de Distancia a vías de comunicación (Desembosque)

El coste de extracción de la biomasa depende de la pendiente del terreno, así como de la distancia de las masas forestales donde se ejecutan los trabajos de extracción hasta las vías de comunicación (carreteras, caminos o pistas) donde habitualmente se sitúan las zonas de acopio de la biomasa forestal residual.

Este factor se obtiene mediante la herramienta “*Distancia Euclideana/Euclidean Distance*” sobre cobertura a caminos, carreteras y autopistas. Como este factor depende de la distancia, se le ha realizado el ajuste opuesto para que las localizaciones más próximas a las vías de comunicación tomen valores más elevados.



## 6.2. ASIGNACIÓN DE PESOS A CADA FACTOR

Una vez obtenidos los factores normalizados, se les asigna un peso en función de la importancia del recurso y la dificultad de extracción, para así obtener un *raster* ponderado con las zonas de aprovechamiento de Biomasa:

Tabla 4. Pesos asignados a cada factor

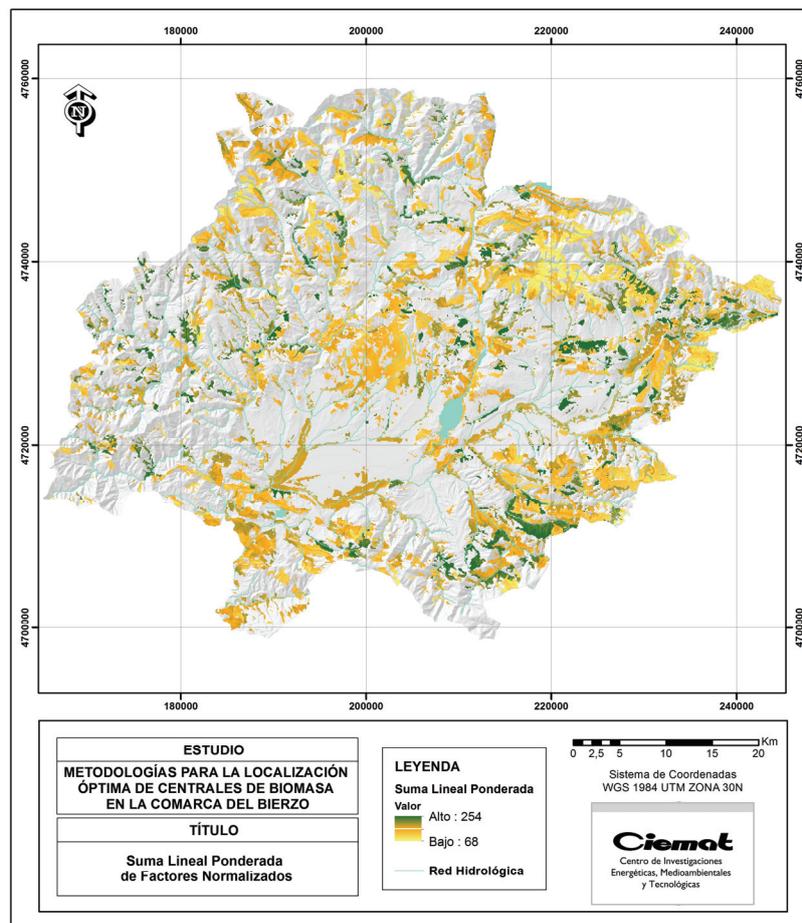
FACTORES	INDICADOR	PESO
Biomasa Forestal	Cantidad de Residuo	0,45
Pendiente	Desnivel en porcentaje	0,30
Desembosque	Distancia a Red Viaria	0,25

El mayor peso, se le asigna a la Biomasa Disponible, dado que esta tecnología se fundamenta en el aprovechamiento de este recurso natural para obtener energía. Se ha fijado un peso medio a la pendiente puesto que condiciona de forma sustancial la extracción de biomasa al impedir el uso de determinada maquinaria, encareciendo demasiado su extracción, y comprometiendo la sostenibilidad ambiental del aprovechamiento. Finalmente, se le ha dado un peso algo menor al factor de desembosque, ya que la infraestructura viaria en este caso (El Bierzo) es bastante densa, por lo que su influencia en este análisis es menos significativa.

### 6.3. 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 de aprovechamiento de Biomasa Forestal, 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*).



## 6.4. RESTRICCIONES DE ÁREAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL

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.

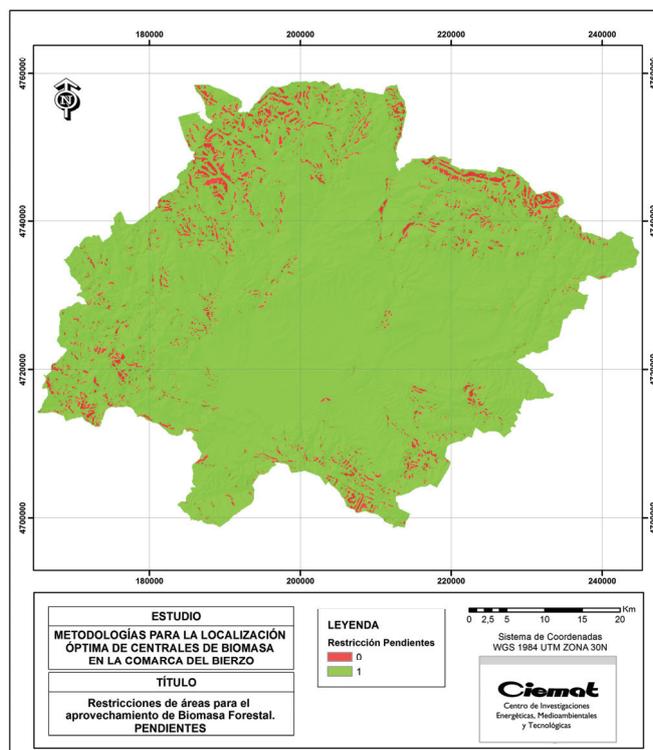
### Restricción Pendientes

Como se ha explicado anteriormente la pendiente condiciona de forma sustancial la extracción de biomasa al impedir el uso de determinada maquinaria. La pendiente superior al 50% es el umbral de restricción de este factor, puesto que por encima de este desnivel el aprovechamiento de este recurso deja de ser rentable, y se clasifica como nula en la clasificación estimada por Garañeda y Bengoa (2005) para Castilla y León.

PENDIENTES (%)	EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN (%)
<10%	80%
10 - 30%	70%
30 -50%	20%
>50%	Nula

Por otro lado, desde el punto de vista ambiental, la permanencia en el monte tras el aprovechamiento de las fracciones más finas de biomasa como los ramillos finos y follaje, además de los sistemas radicales, ayudan a la disminución del riesgo de erosión mediante la captación y almacenamiento de agua y la reducción de la escorrentía. Además, también se verá reducida la compactación que realiza la maquinaria forestal en las labores de aprovechamiento en el monte. Debido al gran problema que es la erosión para la fertilidad del suelo en las masas forestales, algunos autores (EEA, 2006; López-Rodríguez *et al.*, 2009) estiman que pendientes mayores del 20% no son idóneas para la extracción de biomasa.

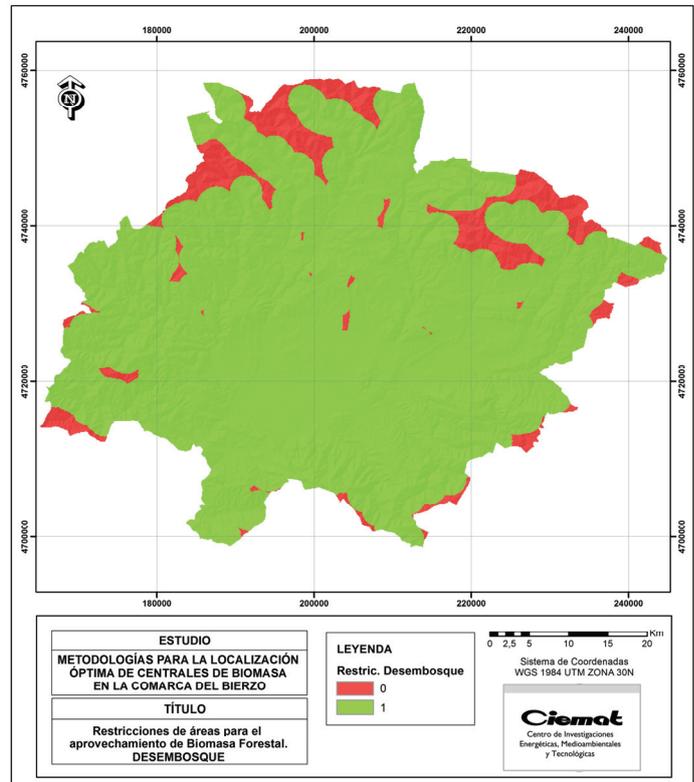
En este trabajo se propone una pendiente del 30% como valor límite de extracción, que permite mantener un riesgo bajo de erosión en las zonas de fuertes pendientes, así como obtener una buena eficiencia de extracción, ya que este parámetro se reduce en gran proporción a partir de este valor de pendiente.



### Restricción de desembosque

Como se ha mencionado anteriormente, la distancia entre las zonas de cortas y clareos de biomasa forestal y la red viaria es un factor importante en la selección de zonas aptas para el aprovechamiento de este recurso. Este factor presenta un umbral de rentabilidad mínima, que atendiendo a datos de relación productividad-distancia de desembosque obtenidos del trabajo de García-Martín et al. (2011) se sitúa en torno a 2.000-3.000 metros de distancia, a partir de los cuales el beneficio es muy bajo o nulo.

En este trabajo se propone una distancia de desembosque de 2.000 m. (*Calculadora Raster /Raster Calculator*) como valor límite para la selección de zonas aptas para el aprovechamiento de la biomasa forestal.

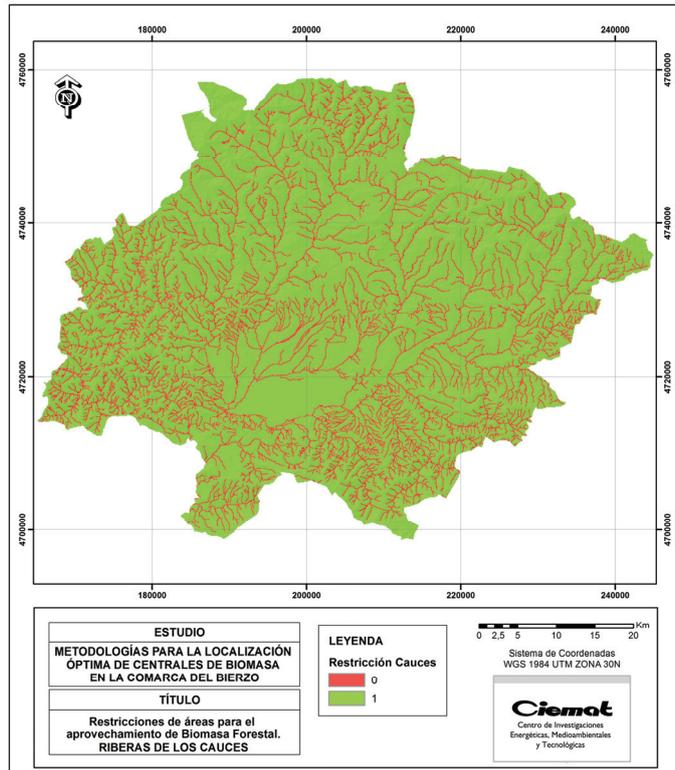


### Restricción para la extracción de biomasa próxima a los cauces (Vegetación de Ribera)

El aprovechamiento de la biomasa forestal de zonas riparias como recurso energético puede conllevar inconvenientes ambientales, puesto que los bosques de ribera constituyen un verdadero ecosistema diferenciado de los entornos que atraviesa, lo cual los convierte en corredores ecológicos, esto es, rutas de migración y dispersión para animales y vegetales. Además, la presencia de vegetación en las riberas contribuye a estabilizar la geometría del cauce, protegiéndolo de la erosión, dando mayor cohesión al suelo a través de sus raíces, y disminuyendo el arrastre de sedimentos. Cuando las orillas soportan vegetación leñosa, la corriente erosiona más el lecho fluvial que los taludes laterales, dando lugar a tramos de cauces encajados y estables. La utilización de maquinaria para la extracción de biomasa en estos entornos fluviales puede suponer afecciones ambientales significativas (contaminación acústica y atmosférica, compactación y erosión de los suelos, etc.).

Uno de los aspectos importantes que condiciona el funcionamiento del ecosistema del río es la regulación de la luz que controla la vegetación de ribera sobre el cauce mediante el sombreado de árboles y arbustos, regulando la temperatura del ambiente y en especial la del agua, influyendo en aspectos tan importantes como el contenido de oxígeno en el agua, la disponibilidad de nutrientes, la composición y estructura de las poblaciones de peces y otros organismos acuáticos.

Estos factores hacen complicado decidir que parte de la biomasa de estos bosques riparios es la que se puede extraer para su aprovechamiento energético. Por este motivo se propone una banda de restricción de 100 m a ambos lados de los ejes de los cauces de la zona estudio que se corresponden con la Zona de Policía, los cuales no podrán ser utilizados para aprovechamiento de biomasa forestal. Esta restricción se ha obtenido mediante la herramienta “*Distancia Euclidean/Euclidean Distance*” a los cauces, realizando posteriormente una consulta con la herramienta “*Calculadora Raster /Raster Calculator*” para obtener finalmente la banda de exclusión de 100 m.

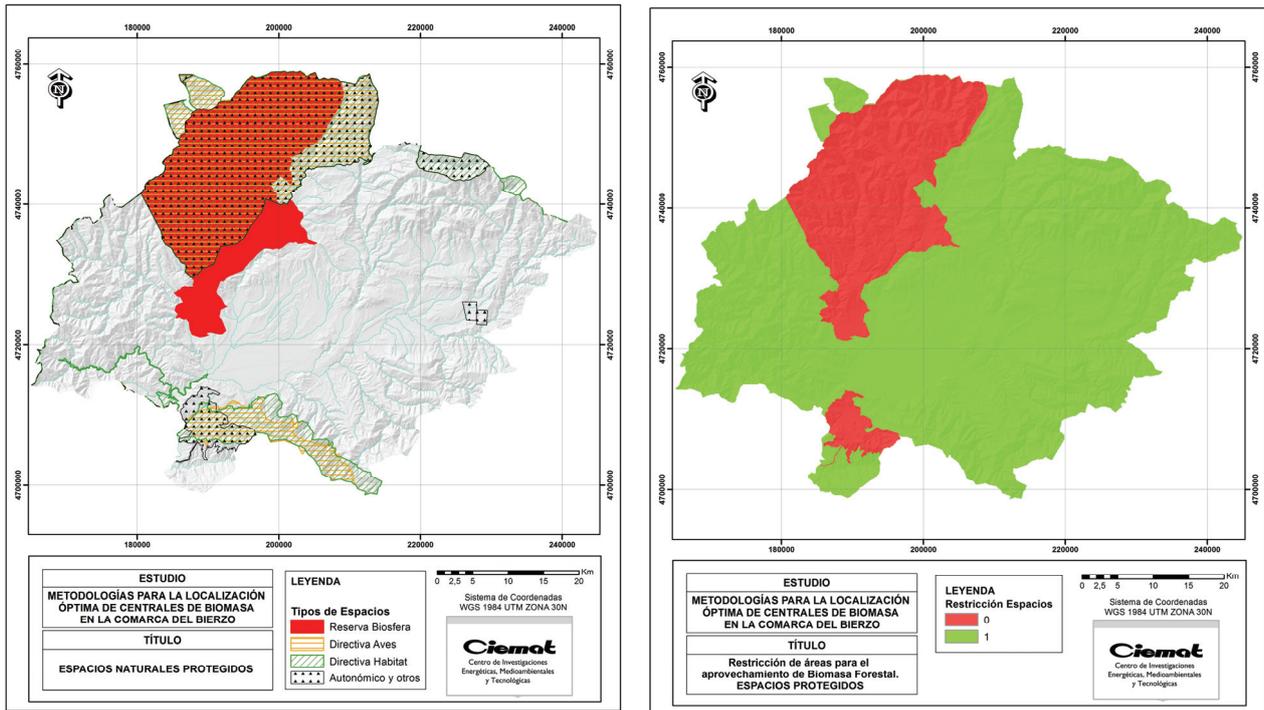


### Restricción de Espacios Naturales Protegidos

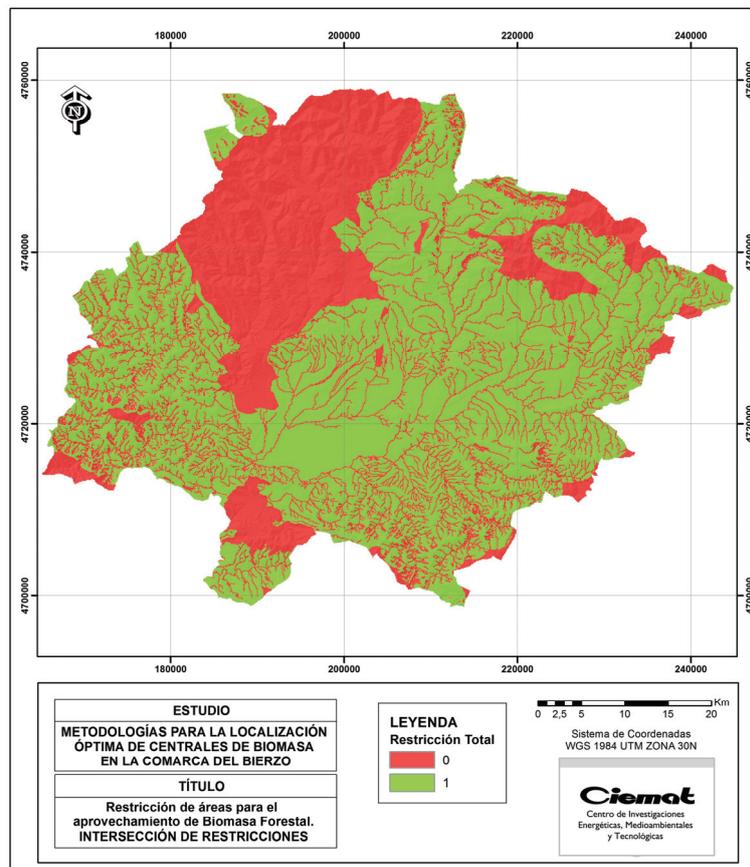
En el caso de la biomasa, muchas de las masas forestales aprovechables con este fin se localizan en espacios naturales protegidos. En este sentido debemos diferenciar distintas figuras, algunas más flexibles y otras por el contrario más prohibitivas que no permiten el desarrollo y explotación de los recursos naturales que conservan por ser zonas con ecosistemas, comunidades o elementos biológicos singulares por su rareza, importancia o fragilidad. Mientras que los Parques Naturales suelen permitir la coexistencia del hombre y sus actividades con la naturaleza mediante el uso equilibrado y sostenible de los recursos, en otras figuras de protección como las Reservas, la explotación de recursos está limitada y se prohíbe la recolección de material biológico o geológico.

Por este motivo se ha considerado como zonas restringidas para el aprovechamiento del recurso la Reserva de la Biosfera de los Ancares y otros espacios como el Parque Cultural de las Médulas que son Bien de Interés Cultural como Zona Arqueológica (1996), Monumento Natural (2002), además de estar incluida en la Lista del Patrimonio Mundial de la Unesco (1997).

Para obtener esta restricción, en primer lugar se ha convertido la capa vectorial de Espacios Naturales Protegidos a *raster* (*Polígono a Raster /Poligon to Raster*), y posteriormente se ha realizado una reclasificación de este *raster* (*Reclasificar/Reclassify*) asignando el valor 0 de exclusión a los espacios considerados restringidos para el aprovechamiento de la biomasa forestal.

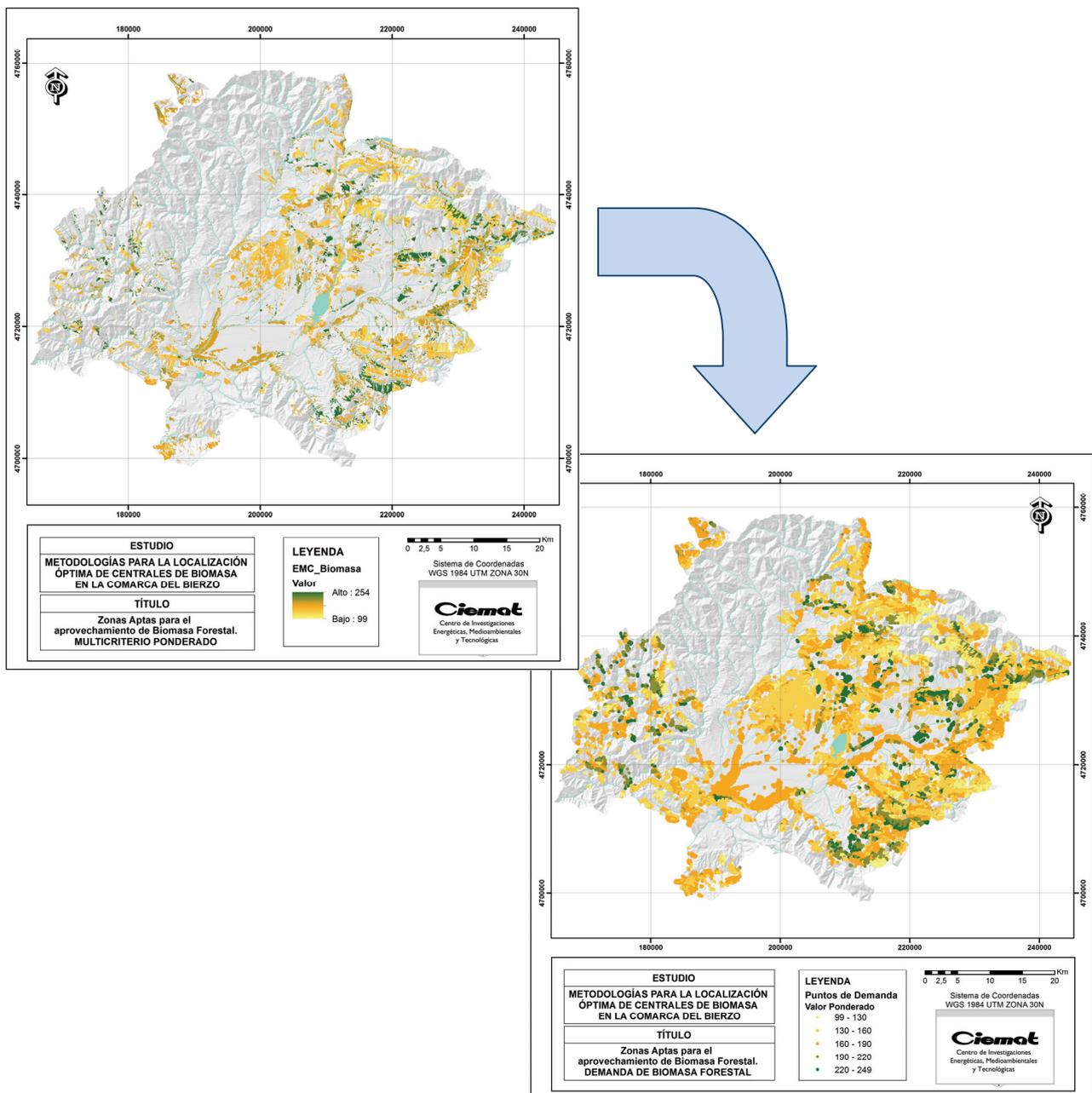


## 6.5. RESTRICCIONES DE ÁREAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL



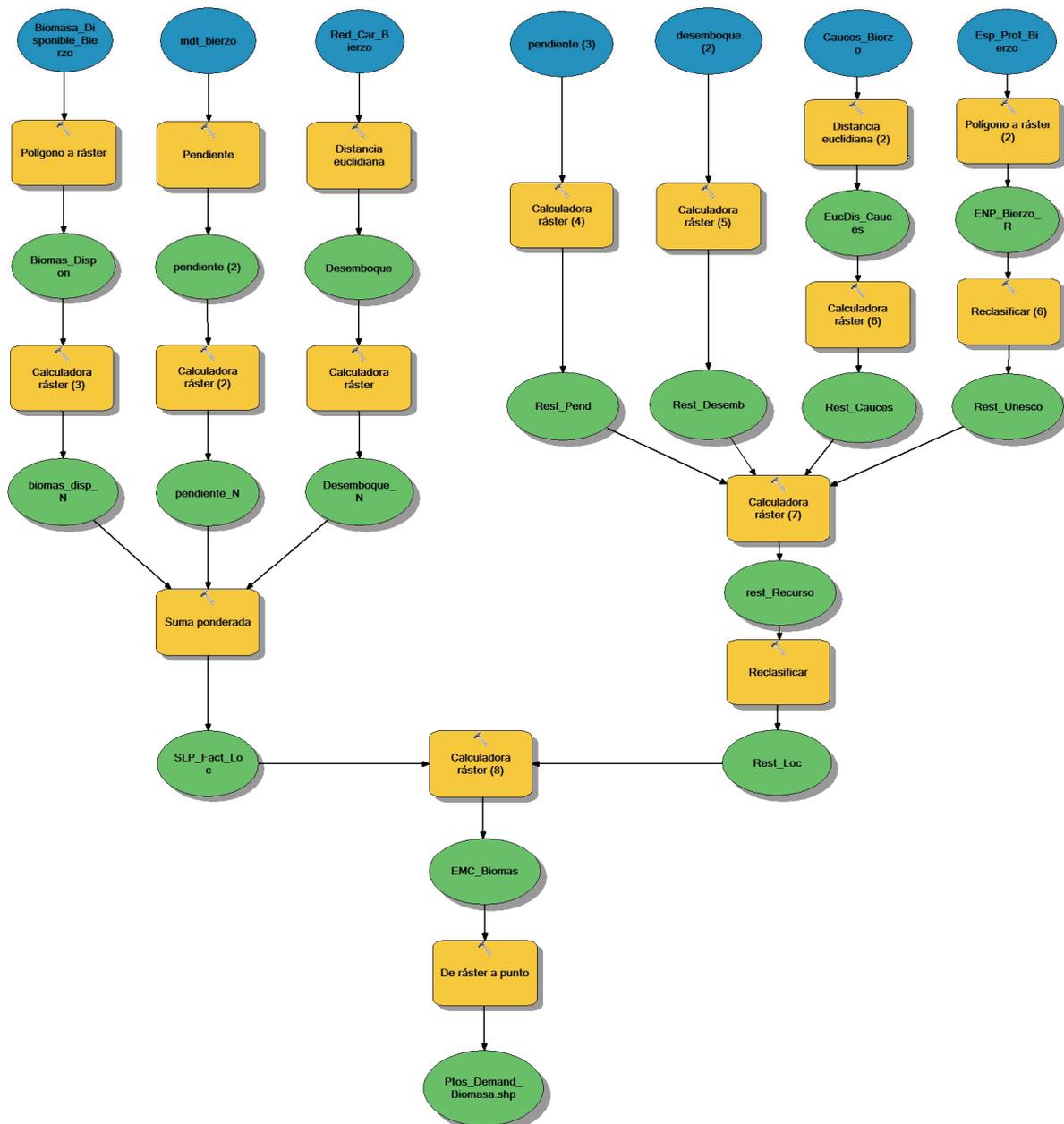
## 6.6. RESULTADO DE LAS ZONAS APTAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL (DEMANDA)

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 Ponderado un *raster* compuesto de celdas de 100 x 100 m (una ha de superficie) con los valores de aptitud de Biomasa Forestal y con las aéreas excluidas del análisis. Este *raster* obtenido se transforma en una capa vectorial de puntos (*De Raster a Punto/Raster To Point*) que denominamos Puntos de Demanda de Biomasa Forestal, manteniendo los valores de aptitud para poder integrarlo posteriormente en un análisis de redes.



## 6.7. RESUMEN DEL PROCESO PARCIAL PARA LA OBTENCIÓN DE LAS ZONAS APTAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL (DEMANDA)

Como se menciona al principio del trabajo, para la gestión, análisis y representación de las distintas bases de datos y capas de información gráfica se ha utilizado ArcGIS 10. Este software presenta una herramienta muy útil para este tipo de Metodologías denominada *Model Builder*, que permite crear nuevas herramientas y automatizar los flujos de trabajo. A continuación se muestra el esquema de procesos llevados a cabo en *Model Builder* para obtener las Zonas Aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal (DEMANDA):

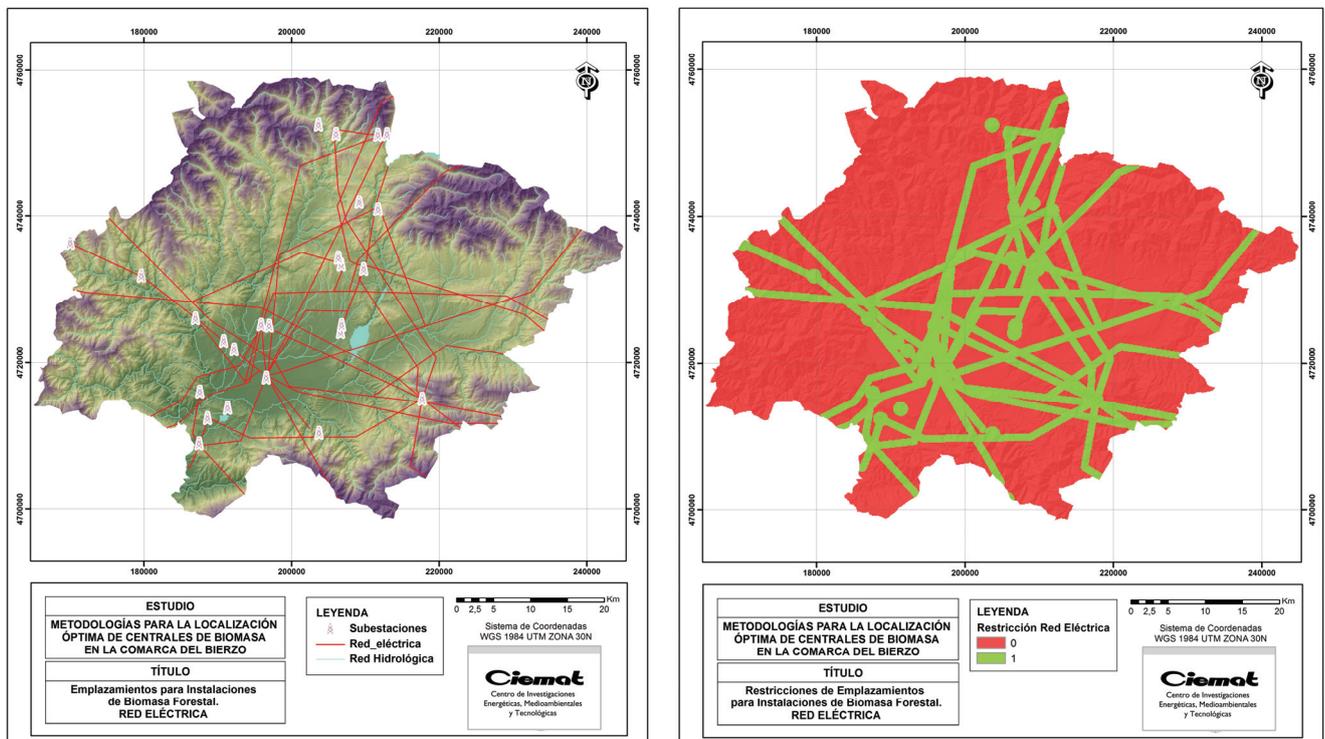


## 6.8. RESTRICCIONES DE ÁREAS PARA LAS INSTALACIONES DE BIOMASA FORESTAL

### Restricción de red eléctrica

Es interesante que la localización de la central de biomasa este próxima 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.

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 /Poligono to Raster*).

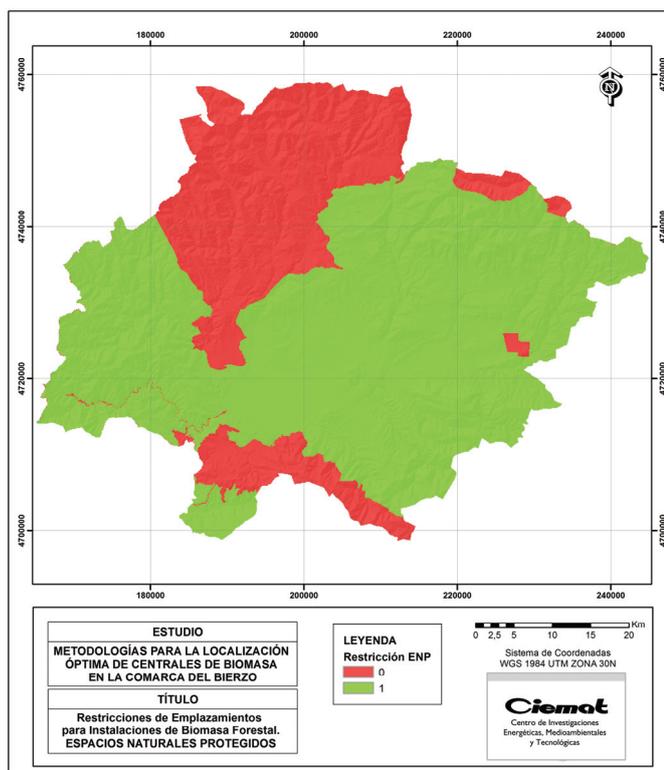


### Restricción de Espacios Naturales Protegidos

Estas áreas responden a una estrategia de conservación, gracias a que reúnen una serie de valores cuya coincidencia en el espacio diferencia a estas áreas del resto del territorio. Por este motivo, el criterio adoptado a la hora de valorar la incidencia sobre cada uno de los espacios contemplados es, estrictamente, el de considerar el nivel de protección otorgado por la Administración oportuna. 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 Protegidos a raster (*Polígono 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.

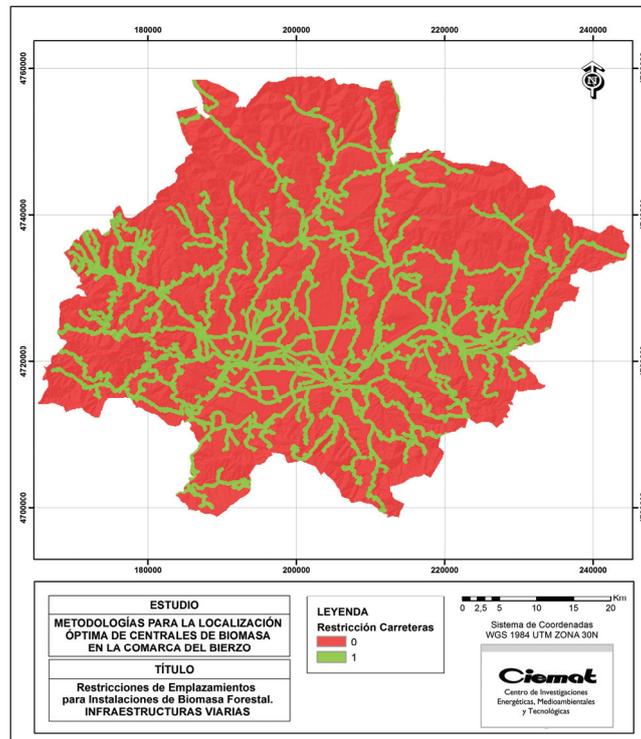


### Restricción de Infraestructuras Viarias

Así como la distancia de las masas forestales (donde se ejecutan los trabajos de extracción), hasta los caminos o pistas (donde se sitúan las zonas de acopio del recurso) es fundamental, también la accesibilidad a las instalaciones es un dato de importancia para el suministro del recurso, así como para la construcción y posterior gestión y mantenimiento de la central de biomasa. En consecuencia se ha estimado que una distancia superior a 200 m a la red viaria conlleva mayor coste de construcción de infraestructuras y posibles afecciones ambientales que pueden hacer inviable el proyecto.

Esta restricción se obtiene mediante la herramienta “*Distancia Euclídeana/Euclidean Distance*” sobre la cobertura de pistas, carreteras y autovías. Posteriormente se ha realizado una consulta con la

herramienta “*Calculadora Raster /Raster Calculator*” para obtener finalmente la franja de 200 m. próxima a la red viaria.



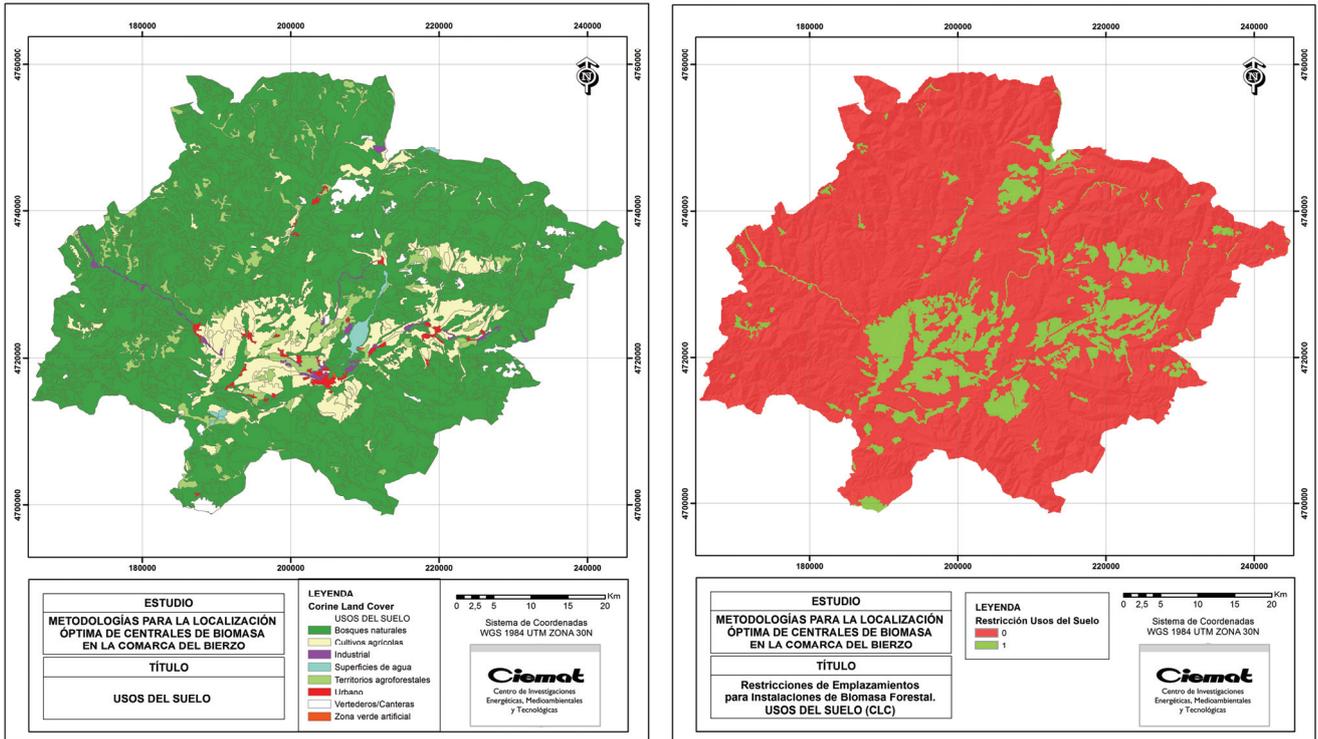
### Restricción de Usos del Suelo

En la selección de una localización para una instalación de carácter industrial, se deben analizar los terrenos con mayor capacidad de acogida para este uso. En este sentido, se han propuesto una serie de usos del suelo con mayor capacidad de acoger la central de Biomasa, por tener una menor afección ambiental potencial sobre el medio. A continuación se muestra una tabla con clases de uso del suelo elaborada a partir del Corine Land Cover, en donde se especifica la clase y su propuesta como apto o restringido para albergar este tipo de instalaciones:

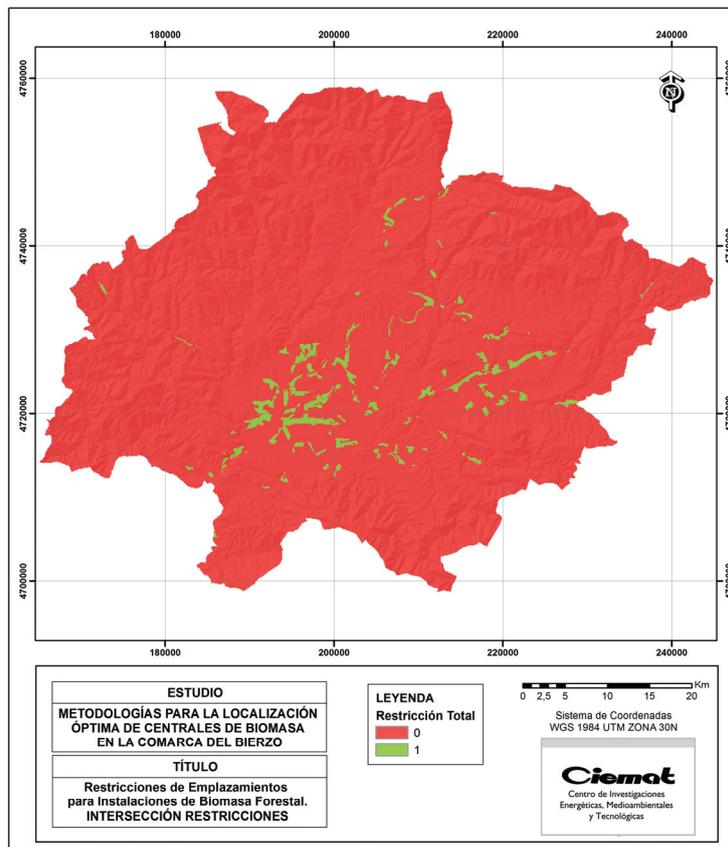
Tabla 5. Capacidad de acogida de los usos del suelo para las instalaciones

USO DEL SUELO	CAPACIDAD DE ACOGIDA
Urbano	Restringido
Industrial	Apto
Zona verde artificial	Restringido
Cultivos agrícolas	Apto
Territorios agroforestales	Restringido
Bosques naturales	Restringido
Vertederos/Canteras	Apto
Superficies de agua	Restringido

Para obtener esta restricción en primer lugar se ha convertido la capa vectorial del Corine a *raster* (*Polígono a Raster /Polygon to Raster*), y posteriormente se ha realizado una reclasificación de este raster (*Reclasificar/Reclassify*) asignando el valor 0 de exclusión a las zonas de menor acogida.

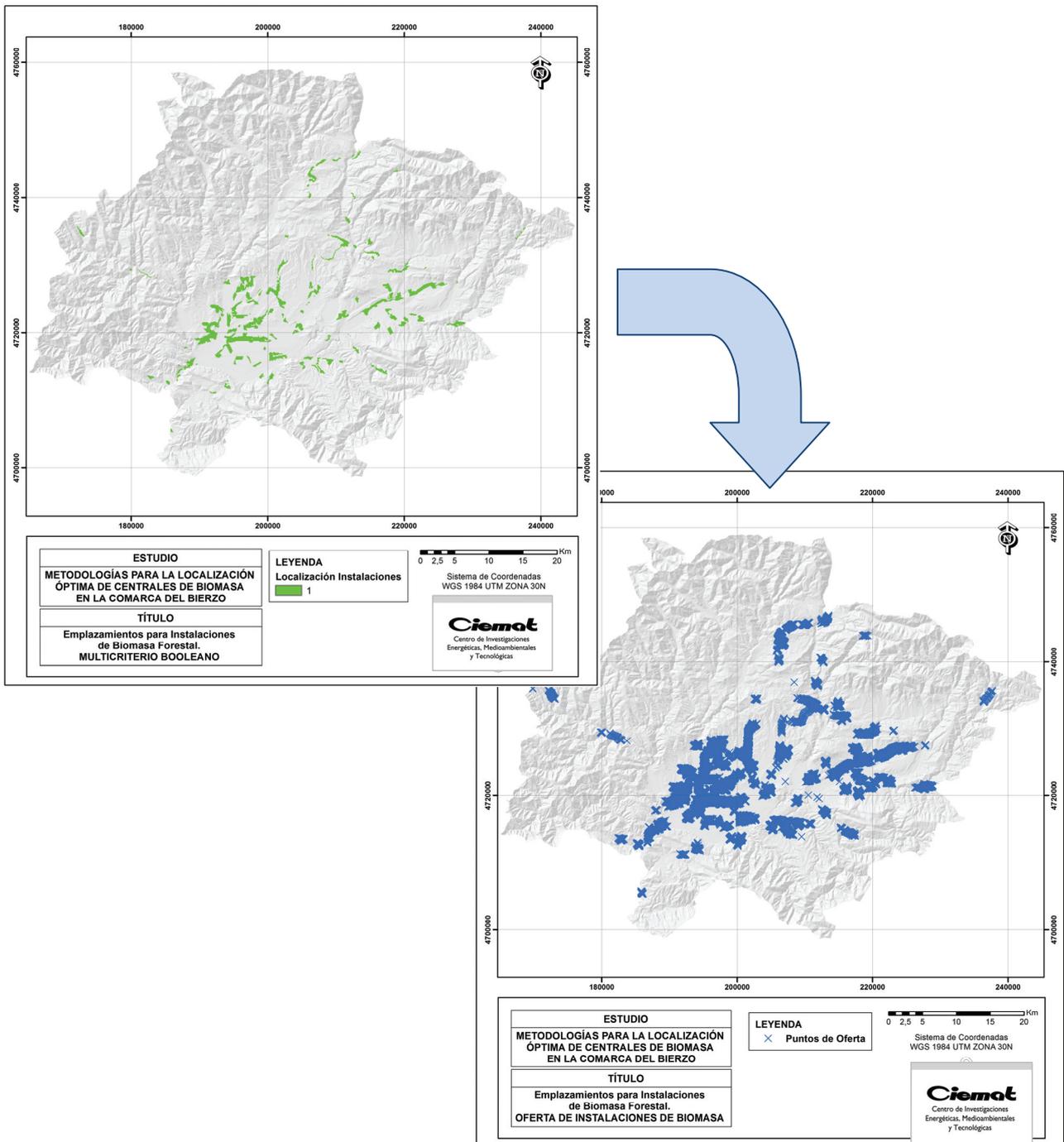


### 6.9. INTERSECCIÓN DEL CONJUNTO DE RESTRICCIONES DE ÁREAS PARA LAS INSTALACIONES DE BIOMASA FORESTAL



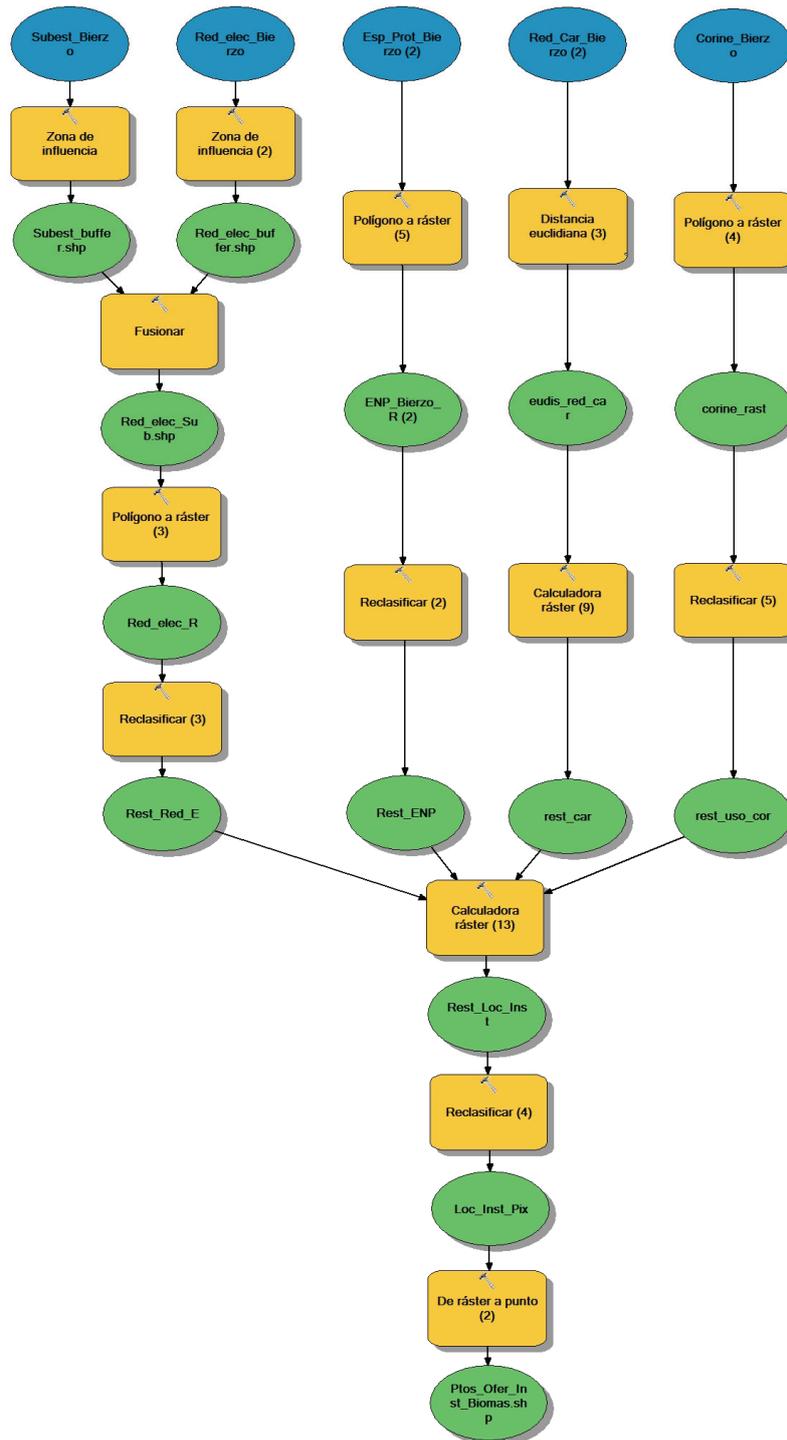
## 6.10. RESULTADO DE LOS EMPLAZAMIENTOS PARA LAS INSTALACIONES DE BIOMASA FORESTAL (OFERTA)

El resultado final de este análisis Multicriterio Booleano es un raster compuesto de celdas de 100 x 100 m que representan las zonas potenciales donde instalar las centrales de biomasa. Este raster obtenido se transforma en una capa vectorial de puntos (*De Raster a Punto/Raster To Point*) que denominamos Puntos de Oferta de Instalaciones, que posteriormente integraremos en un análisis de redes.



### **6.11. RESUMEN DEL PROCESO PARCIAL PARA LA OBTENCIÓN DE LOS EMPLAZAMIENTOS DE INSTALACIONES DE BIOMASA FORESTAL (OFERTA)**

En el siguiente esquema se muestran los procesos llevados a cabo en *Model Builder* para obtener las ubicaciones más adecuadas para las instalaciones de Biomasa Forestal (OFERTA):



## 6.12. OBTENCIÓN DE SOLUCIONES MEDIANTE MODELOS DE LOCALIZACIÓN-ASIGNACIÓN (ANÁLISIS DE REDES)

Este es el proceso definitivo que enlaza los dos análisis multicriterio que se han explicado hasta el momento, donde se ha obtenido la localización óptima del recurso, así como la localización de las instalaciones potenciales para su aprovechamiento. El objetivo de este proceso final consiste en el uso

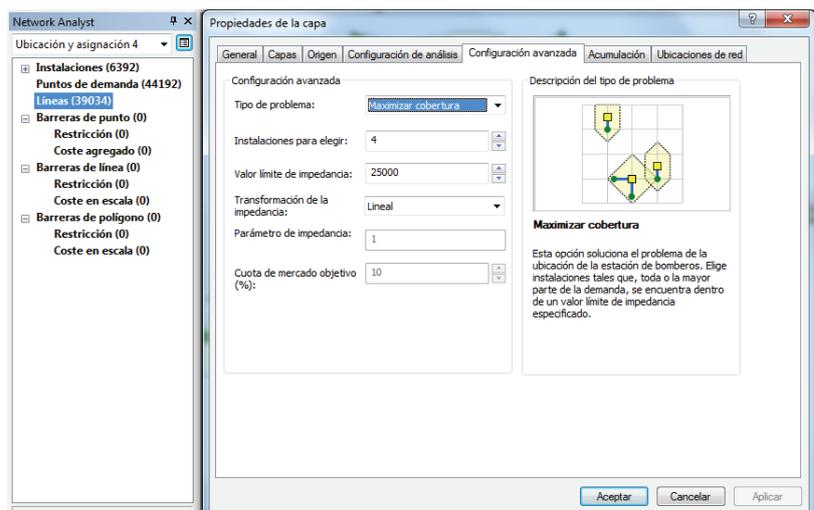
de un modelo de localización-asignación que permita ubicar estas instalaciones de modo que su suministro desde los puntos de demanda (recurso) sea lo más eficiente posible.

Otro factor que ha influido en la inclusión de un análisis de redes en la metodología es el coste de transporte de la madera, que representa el 20-40% de su precio en parque de fábrica y que en el caso de la biomasa se acerca al 45%, viéndose más afectado por el menor coeficiente de apilado (COITF, 2011). Mediante este análisis se pueden conocer las distancias de transporte exactas a través de la red viaria. En este trabajo se ha establecido como límite de cobertura para las instalaciones de biomasa (*Valor límite de impedancia*) una distancia de 25 km a través de la red, que ya ha sido utilizada en otros trabajos (García-Martín et al., 2011; Domínguez, 2000), pero mediante radios de distancia.

Los elementos del modelo de localización-asignación son los siguientes:

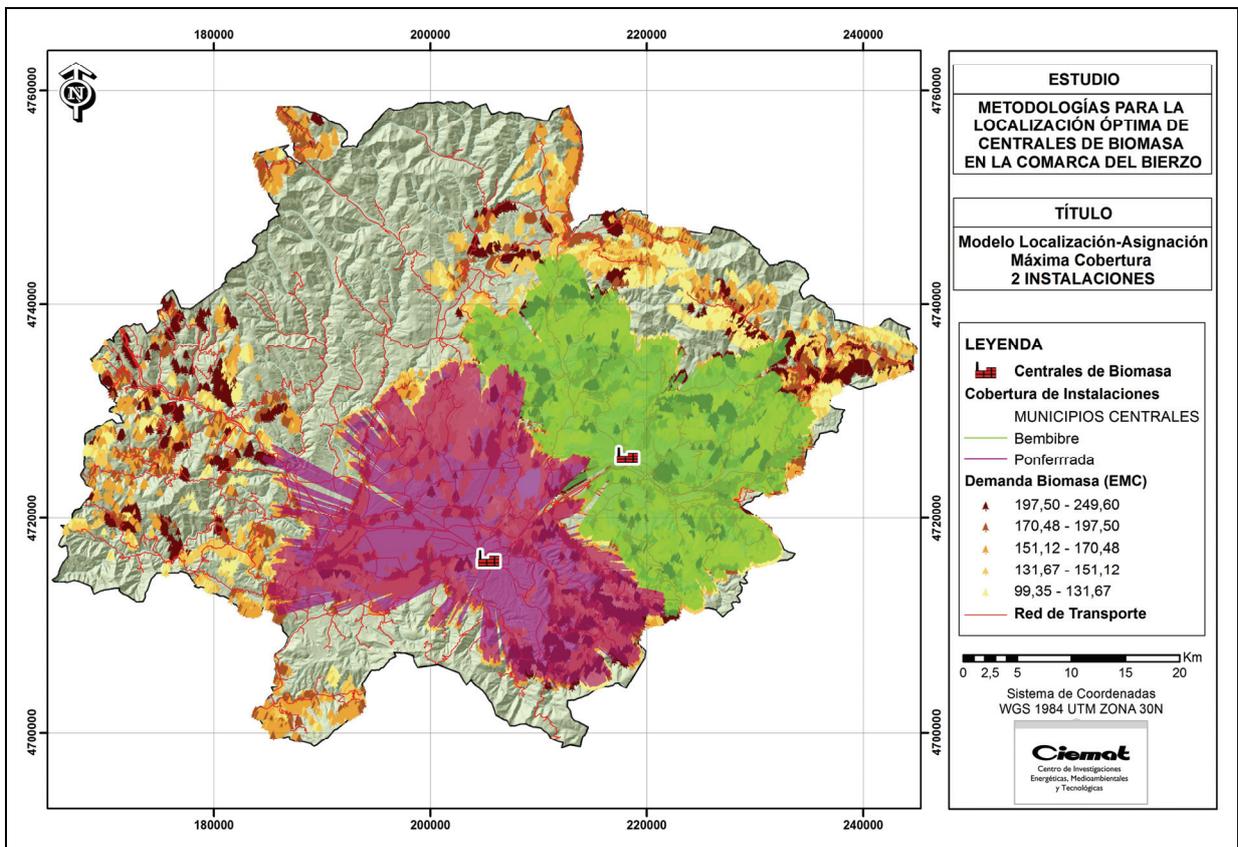
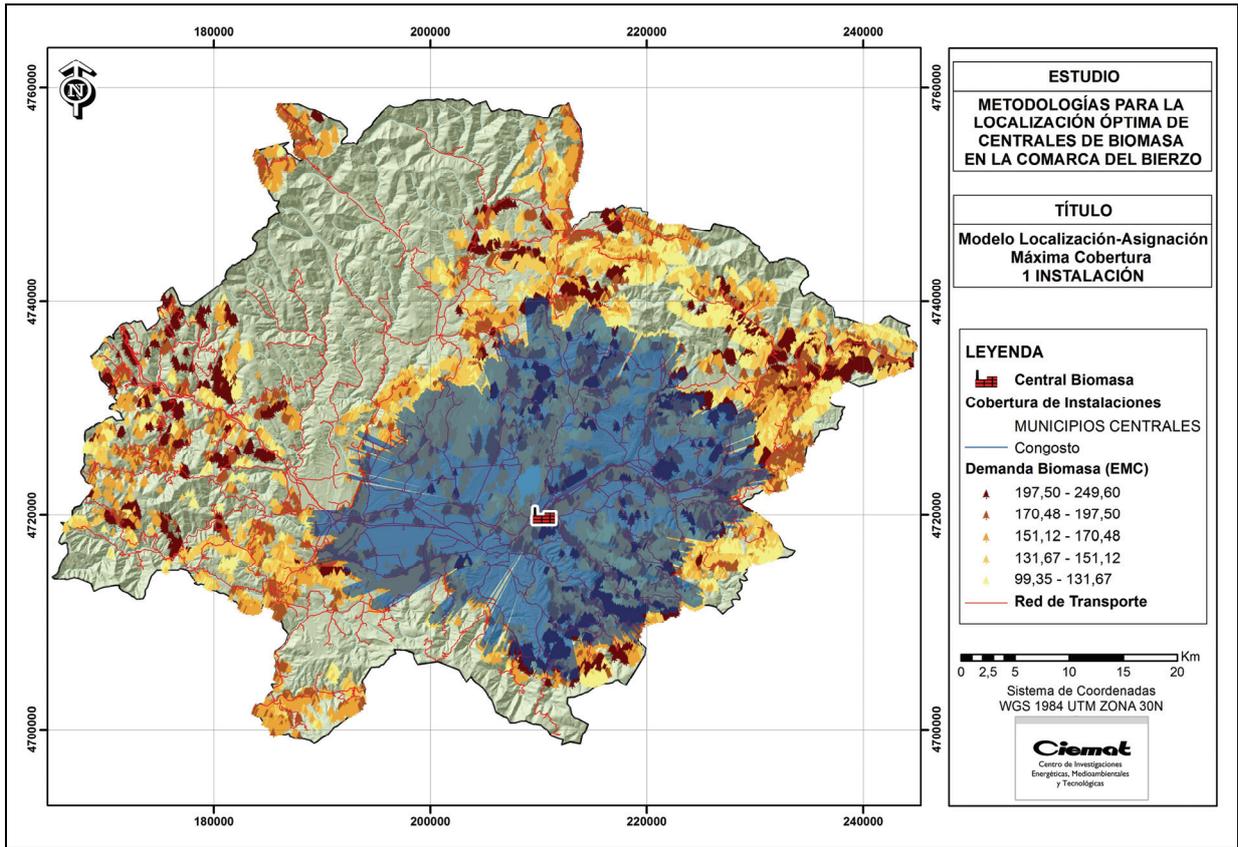
- Puntos de demanda (ponderados): Zonas aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal
- Puntos de oferta: Emplazamientos óptimos para las instalaciones de Biomasa Forestal
- Cálculo de distancias: A través de la red de transporte

Este estudio pretende aprovechar al máximo la localización de las instalaciones, es decir, que abarquen la mayor demanda posible de Biomasa Forestal, por este motivo se ha seleccionado el análisis de **Maximizar Cobertura** de entre los seis tipos de resolución de problemas que ofrece ArcGIS.

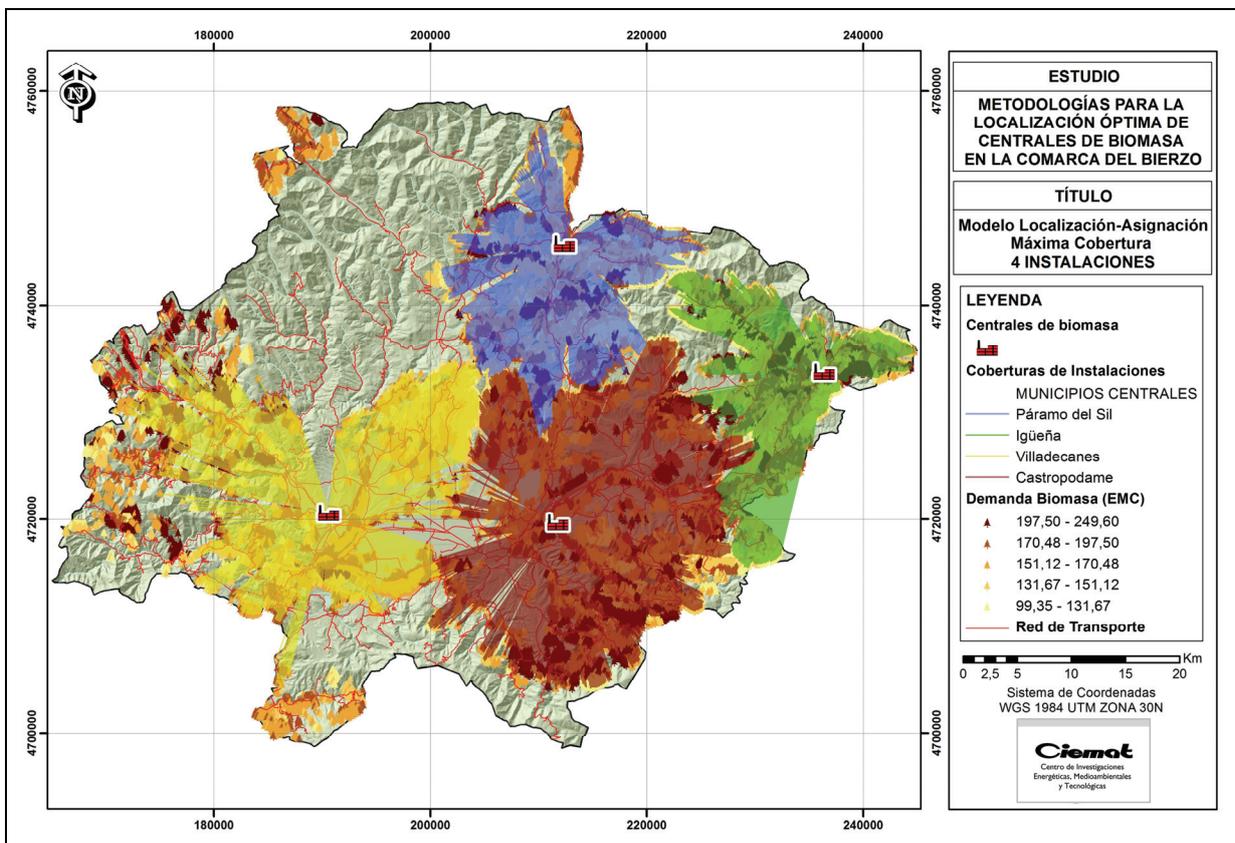
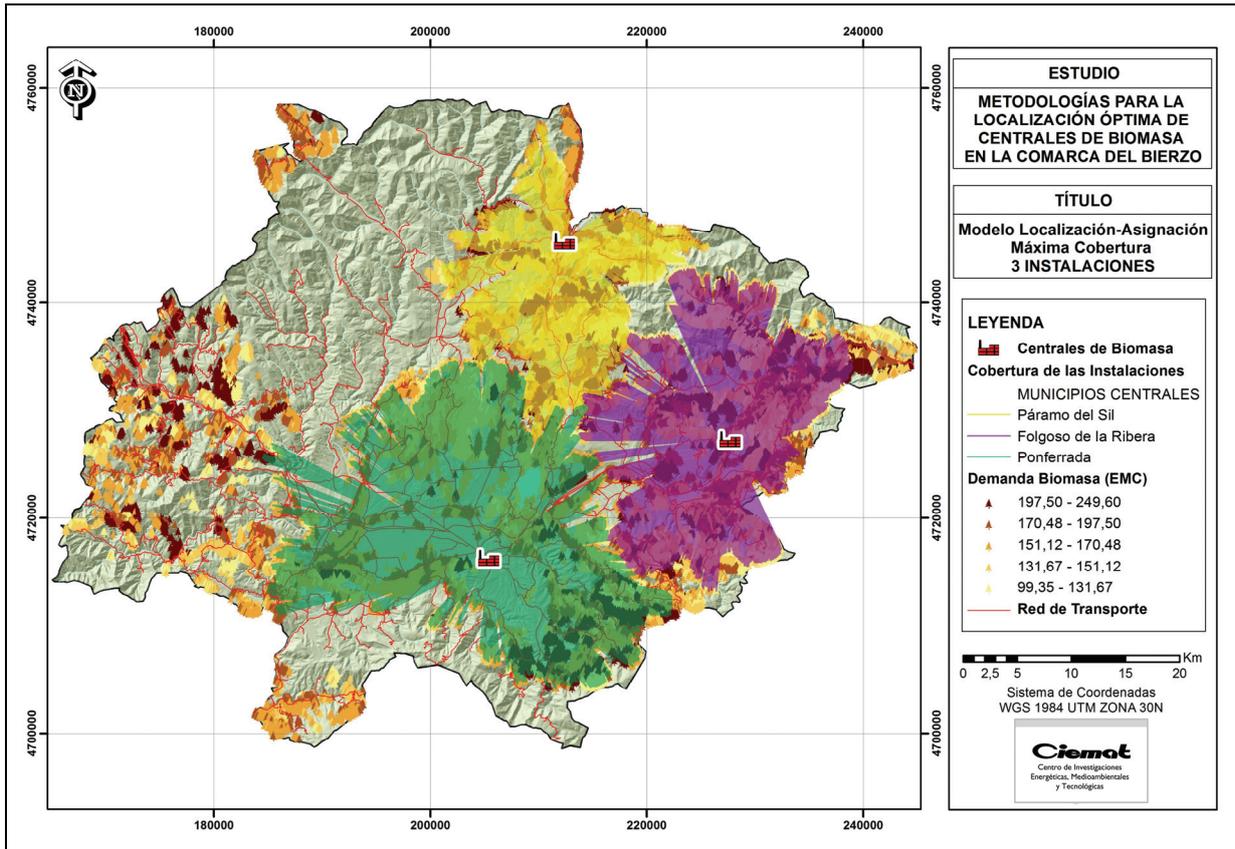


A continuación se muestran las diferentes soluciones obtenidas en función del número de instalaciones a “localizar-asignar” que se introduzcan en el modelo:

**Metodología SIG para la Localización de Centrales de Biomasa  
mediante Evaluación Multicriterio y Análisis de Redes. Modelos de  
Localización-Asignación para el aprovechamiento de Biomasa Forestal**



**Metodología SIG para la Localización de Centrales de Biomasa  
mediante Evaluación Multicriterio y Análisis de Redes. Modelos de  
Localización-Asignación para el aprovechamiento de Biomasa Forestal**



## **Interpretación de los resultados de las soluciones obtenidas**

No cabe duda, observando los mapas de las distintas soluciones, que la ubicación más óptima para el emplazamiento de una instalación de Biomasa en la comarca de El Bierzo se localiza en una pequeña zona entorno a los municipios de Ponferrada, Congosto y Castropodame, puesto que aparece como solución en los cuatro modelos de localización-asignación.

El objetivo principal del modelo de localización-asignación aplicado es ubicar emplazamientos óptimos para instalaciones de biomasa, de modo que su suministro desde los puntos de demanda sea lo más eficiente posible. Además de este modelo, en función de los resultados obtenidos, se pueden extraer una serie de datos de las distintas soluciones generadas, como superficies, porcentajes de biomasa cubierta o distancias medias. Estos datos se pueden interpretar a partir de las distintas estadísticas de las capas obtenidas en el análisis:

### Modelo de 1 Instalación

En la primera solución obtenida, con una sola Instalación de Biomasa quedarían cubiertas 20.542 ha de las 44.192 ha totales de Biomasa Disponible para la distancia de 25 Km establecida a través de la red de transporte. Por otro lado, esta única central cubriría el 47,5% del total de biomasa forestal disponible, atendiendo a la valoración final de este recurso obtenida en el análisis multicriterio ponderado. La distancia media por la red de transporte desde la instalación de biomasa a los puntos de demanda sería aproximadamente de 18 km.

### Modelo de 2 Instalaciones

Este modelo de 2 instalaciones cubriría 29.361 ha aprovechando el 66,78% de la biomasa valorada en el análisis multicriterio. La distancia media por la red de transporte desde las instalaciones a los puntos de demanda estaría en torno a 16 km.

### Modelo de 3 Instalaciones

En el caso de ubicar 3 instalaciones en la comarca de El Bierzo, la biomasa forestal cubierta tendría una superficie de 35.251 ha, ascendiendo a 79,58% la biomasa aprovechable por las 3 centrales. En este caso la distancia media sería de 15,7 km aproximadamente.

### Modelo de 4 Instalaciones

Finalmente, para la solución de 4 instalaciones se cubrirían 39.034 ha, aprovechando el 88,24% del total de biomasa forestal disponible. La distancia media por la red de transporte desde las instalaciones a los puntos de demanda estaría en torno a 14,5 km.

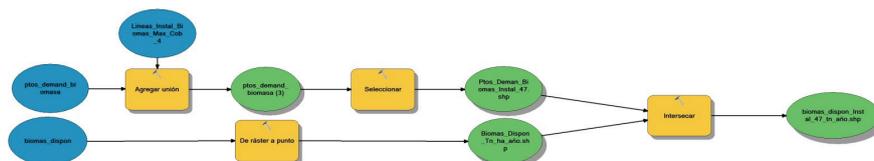
## 7. CONCLUSIONES

El principal objetivo del trabajo propuesto es la localización de zonas óptimas para la instalación de centrales de Biomasa Forestal. 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 de Redes, *Model Builder*, etc.

La aplicación de la metodología multicriterio ha proporcionado la obtención de cartografía de las zonas que presentan mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso (biomasa forestal disponible) por un lado; y por otro, de las localizaciones idóneas para el emplazamiento de instalaciones de Biomasa Forestal. Estas dos salidas cartográficas han podido ser relacionadas mediante un análisis de redes, generando soluciones de localización-asignación que alcancen una distribución espacial eficaz.

La aplicación de análisis de redes en Biomasa mediante modelos de Localización-Asignación ha permitido la ubicación de instalaciones de modo que su suministro desde los puntos de demanda (biomasa disponible) sea más eficiente; permitiendo además, conocer las distancias de transporte exactas a través de la red viaria desde las instalaciones a las zonas de demanda del recurso. Además, estos modelos de localización-asignación pueden proporcionar otras soluciones introduciendo otras variables como por ejemplo, las instalaciones existentes de biomasa e incluso otras industrias como la maderera, que compiten por el mismo recurso.

Como Líneas de Trabajo Futuras se están elaborando modelos que permitan calcular la cantidad total (ton/año) de Biomasa Forestal potencial cubierta por cada central, así como la posibilidad de obtener la cantidad de energía potencial (kW/año) que generaría cada central, en función de estudios realizados en el CIEMAT sobre Poderes Calóricos de las especies forestales aprovechadas.



Otra línea a seguir, sería la mejora de los modelos de Localización-Asignación, mediante la inclusión de más datos relativos al análisis de redes, como el tipo de transporte utilizado y las velocidades de las distintas vías que conforman la red de transporte, obteniendo además de distancias exactas, los tiempos estimados de transporte desde las zonas de demanda del recurso forestal a las instalaciones de biomasa.

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**

**COITF** (2011) «Principales obstáculos y retos para el desarrollo comercial de la biomasa forestal». Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales. Sevilla.

**Domínguez, J.** (2000). «Análisis de la producción potencial de energía con Biomasa en la región de Andalucía (España) utilizando Sistemas de Información Geográfica».

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

**EEA** (2006). «*How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?*» European Environment Agency. Copenhagen.

**Esteban, L.S., García, R., Cabezón, R., Carrasco, J.E.** (2008). «Plan de Aprovechamiento Energético de la Biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana (León) ». Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER) perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

**Esteban, L.S., García, R., Carrasco, J.** (2008). «*Biomass Resources and Costs in Spain and Southern EU Countries. Towards a Common Methodology and Assessment*», en Schmid, J., Grimm, H.P., Helm, P. y Grassi, A. (Ed.): *Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition. Florence, ETA-Renewable Energies.*

**Garañeda, R.J. y Bengoa, L.** (2005) «Estudio de disponibilidad de biomasa en seis zonas de Castilla y León», en S.E.C.F. (Ed.): La ciencia forestal: respuestas para la sostenibilidad. 4º Congreso Forestal Español. Zaragoza, Sociedad Española de Ciencias Forestales, (CD-Rom).

**García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R.** (2011). «Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección», GeoFocus (Artículos), Nº 11.

**IFN-2** (1986-1996). «Segundo Inventario Nacional Forestal». Ministerio de Medio Ambiente. Edit. Dirección General de Conservación de la Naturaleza.

**IDAE** (2005). «Energía de la biomasa». Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

**IDAE** (2007). «Energía de la biomasa». Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

**Jarabo Friedrich, F.** (1999). «La energía de la biomasa». Madrid, S.A.P.T. Publicaciones Técnicas.

**López-Rodríguez F., Atanet C.P., Blázquez F.C., Celma A.R.** (2009). «*Spatial assessment of the bioenergy potential of forest residues in the western province of Spain, Caceres*».

**Lorente, J.M.** (2009). «Situación energética y sector forestal: un análisis desde la perspectiva aragonesa», Foresta.

**MFE50** (2007) «Mapa Forestal de España». Banco de Datos de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente.

**Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M.** (2005). «Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> en los bosques españoles». Monografías INIA, N° 13.

**Velázquez, B.** (2006). «Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética», Ecosistemas.







