

D. Pedro Álvarez Álvarez profesor de la Universidad de Oviedo y del máster en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica por la Universidad de Oviedo autoriza la presentación del Trabajo Fin de Máster "*Análisis de potencialidad productiva en plantaciones energéticas mediante Sistemas de Información Geográfica (Estudio en Cantil II, "Langreo")*" desarrollado por el alumna M^a Nieves Casal Fernández (DNI: 71771123Z).

En Mieres a 11 de Julio de 2013



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS
DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**“Análisis de la Potencialidad Productiva en Plantaciones
Energéticas mediante Sistemas de Información Geográfica
(Estudio en Cantil II, Mieres)”**

**AUTOR: M^a NIEVES CASAL FERNÁNDEZ
DIRECTOR: PEDRO ÁLVAREZ ÁLVAREZ**

JULIO, 2013

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	6
1.1. Biomasa	7
1.2. Cultivos energéticos	8
1.2.1. Cultivos energéticos en escombreras mineras	9
2. Objetivos	10
3. Materiales y métodos	11
3.1. Caracterización de la zona de ensayo	11
3.2. Características de los cultivos	12
3.2.1. Clones empleados en el ensayo (material vegetal)	12
3.3. Dispositivo experimental [¹]	13
3.3.1. Diseño experimental del ensayo	13
3.3.2. Niveles de tratamiento de las parcelas	13
3.3.3. Preparación del terreno	14
3.3.4. Replanteo de parcelas	14
3.3.5. Micorrización	16
3.3.6. Ejecución de la plantación	16
3.3.7. Control de malas hierbas	17
3.4. Material empleado	18
3.4.1. Datos	18
3.4.2. Software	18
3.5. Preparación de la información	19
3.6. Variables de producción analizadas	19
3.6.1. Producción en volumen	19
3.6.2. Producción en biomasa	20
3.7. Métodos de análisis	20
3.7.1. Gráficos de barras apiladas	20
3.7.2. Diagrama de caja y bigotes	20
3.7.3. Correlaciones bivariadas de Spearman	21
3.7.4. Regresión	21
4. Resultados y discusión	23
4.1. Influencia de la fertilización en la producción	23
4.2. Determinación del clon más productivo	27
4.3. Clon Olof	30
4.3.1. Distribución de biomasa por fracciones	30
4.4. Análisis de variables que afectan a la producción del clon Olof	31

4.4.1. Factores fisiográficos _____	31
4.4.2. Factores edáficos _____	32
4.5. Poder calorífico en la plantación actual _____	37
4.6. Poder calorífico en la plantación con tres hectáreas de clon Olof _____	41
5. Conclusiones _____	45
6. Bibliografía _____	47

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I: Mapa final _____	53
---------------------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Clones utilizados e identificación en campo _____	12
Tabla 3.2. Niveles de fertilización e identificación en campo _____	14
Tabla 3.3. Clasificación de la biomasa _____	20
Tabla 4.1. Influencia de la fertilización en la producción _____	24
Tabla 4.2. Correlación entre fertilización y producción _____	26
Tabla 4.3. Correlación entre volumen y biomasa _____	27
Tabla 4.4. Producción de cada clon en volumen y biomasa en campo _____	28
Tabla 4.5. Variables de árbol clones AF2 y Olof _____	28
Tabla 4.6. Correlación entre el número de brotes y la producción _____	29
Tabla 4.7. Correlación entre el número de brotes y la producción de biomasa del clon Olof _____	29
Tabla 4.8. Correlación entre la biomasa total y los factores fisiográficos _____	31
Tabla 4.9. Factores fisiográficos y biomasa total en campo de las parcelas donde se ha instalado el clon Olof _____	32
Tabla 4.10. Correlación entre la biomasa total producida en campo y los factores químicos del suelo _____	32
Tabla 4.11. Correlación entre la biomasa total producida en campo y los factores físicos del suelo _____	34
Tabla 4.12. Capacidad de campo de los suelos _____	34
Tabla 4.13. Permeabilidad de los suelos _____	35
Tabla 4.14. Porcentaje de humedad en la madera de los diferentes clones _____	37
Tabla 4.15. Poder calorífico neto en húmedo (MJ/kg) de los diferentes clones _____	38
Tabla 4.16. Relación entre el porcentaje de humedad y el poder calorífico _____	39
Tabla 4.17. poder calorífico neto en húmedo de la madera en función del porcentaje de humedad _____	39
Tabla 4.18. Poder calorífico total en húmedo por clon _____	40
Tabla 4.19. Resultado obtenido en la regresión lineal por pasos sucesivos _____	41
Tabla 4.20. Poder calorífico de las parcelas con nivel de fertilización F1 del clon Olof _____	41
Tabla 4.21. Poder calorífico con 3 hectáreas de clon Olof _____	42

Tabla 4.22. Comparación entre la producción actual y la posible con tres hectáreas de Olof _____	42
Tabla 4.23. Peso seco de la biomasa total obtenida en campo _____	43
Tabla 4.24. Concentración de elementos en la madera en %/1 _____	43
Tabla 4.25. Poder calorífico total de la biomasa seca de 3 hectáreas de Olof _____	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Localización de la zona de ensayo _____	11
Figura 3.2. Distribución de bloques, clones y fertilización _____	15
Figura 3.3. Distribución de las parcelas sobre el terreno _____	15
Figura 3.4. Esquema y detalle de la distribución de las estaquillas _____	16
Figura 3.5. Ejemplo de distribución de estaquillas en una de las parcelas de la zona de ensayo _____	17
Figura 4.1. Influencia de la fertilización en la producción en volumen _____	24
Figura 4.2. Influencia de la fertilización en la producción de biomasa _____	24
Figura 4.3. Influencia de la fertilización en la producción de volumen visualizada en GIS _____	25
Figura 4.4. Influencia de la fertilización en la producción de biomasa visualizada en GIS _____	25
Figura 4.5. Producción de los clones en volumen _____	28
Figura 4.6. Producción de los clones en biomasa _____	28
Figura 4.7. Distribución de la producción del clon Olof _____	30
Figura 4.8. Influencia de la relación CN en la producción de biomasa del clon Olof _____	33
Figura 4.9. Influencia de la proporción de arcilla en suelo en la producción de biomasa del clon Olof _____	36
Figura 4.10. Influencia de la profundidad efectiva del suelo en la producción de biomasa del clon Olof _____	36

Resumen

El creciente desarrollo de las tecnologías de la información geográfica (Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, SIG) y su utilización como fuentes de información e instrumentos para la gestión forestal, representan una herramienta muy útil en todo tipo de trabajos, ya que permiten realizar análisis complejos de la realidad espacial rápidamente.

En este trabajo se empleará esta tecnología, para estudiar la evolución de los cultivos energéticos situados en el Cantil II en el Concejo de Mieres con el fin de evaluar su potencialidad en la producción de biomasa, un tipo de energía limpia en desarrollo que contribuirá a reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Abstract

The increasing development of geographic information technologies (Remote Sensing and Geographic Information Systems, GIS) and their use as information sources and forest management tools, represent a useful tool in all kinds of work, allowing complex analyses of spatial reality quickly.

In this paper we will use this technology to study the evolution of energy crops in “Cantil II” located in the council of Mieres in order to assess their potential in biomass production, a type of clean energy which development will help to reduce fossil fuels ‘dependency.

1. INTRODUCCIÓN

La crisis energética que se deriva de la creciente escasez de combustibles fósiles unida al problema del cambio climático y a la necesidad de cumplir los compromisos del protocolo de Kyoto, favorece el fomento de la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovables y limpias por parte de los gobiernos, de forma que éstas contribuyan a garantizar el suministro energético de sus países (Hernández *et al.*, 2005)

Tras el éxito del Plan de Energías Renovables 2005 – 2010 que propició un crecimiento de un 5% en el empleo de este tipo de energías, el gobierno español ha puesto en marcha el Plan de Energías Renovables 2011 – 2020, con el que se pretende lograr, tal y como indica la Directiva 2009/20/CE del Parlamento Europeo, que en el año 2020 al menos el 20% del consumo final bruto de energía en España proceda del aprovechamiento de las fuentes renovables (IDAE, 2010).

Una de las energías renovables que se pretende impulsar es la biomasa, como fuente energética con balance neutro de carbono. Para ello, en el plan mencionado anteriormente, se promueve el desarrollo de los cultivos energéticos y de la mecanización específica para la recogida, extracción y tratamiento de la biomasa.

Los cultivos energéticos tienen como fin la obtención de la máxima producción posible de biomasa en periodos de tiempo cortos (IDAE, 2010); con el fin de optimizar aún más su rendimiento se llevan a cabo ensayos con diferentes clones/especies arbóreas en cultivos diseñados específicamente a tal efecto.

Con el objetivo general de aportar conocimientos sobre diversos aspectos de este tipo de cultivos y la cantidad de biomasa que pueden producir se pone en marcha el proyecto "Ensayo de cultivos energéticos en antiguos terrenos de minería a cielo abierto y escombreras de HUNOSA" que permitirá mediante su desarrollo y posterior evaluación de los resultados obtenidos conocer factores esenciales para la implantación de plantaciones energéticas comerciales.

Dentro de este proyecto se establece un diseño experimental en una antigua escombrera restaurada sobre la cual se habían establecido plantaciones de arándanos, dicha escombrera denominada “Cantil Sur”, pertenece a la empresa de explotación y extracción HUNOSA. En el que se han utilizado tres clones de chopo (*Populus sp*) y tres clones de sauce (*Salix sp*).

1.1. Biomasa

El aprovechamiento energético de la biomasa aparece como una gran oportunidad para reducir la dependencia energética exterior y promover el desarrollo de un sector innovador con potencial indiscutible en nuestro país (Dopazo *et al.*, 2009).

Creus (2004) define la biomasa como "*Toda forma que almacena energía solar, en la naturaleza (plantas terrestres o acuáticas) o en residuos de materias o animales (agricultura o estiércol). Es materia orgánica, formada por hidratos de carbono y compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno producida en la superficie terrestre por organismos específicos. Tiene la propiedad de ser utilizada como combustible y permite obtener calor y electricidad por un lado, y combustibles líquidos por otros (biocarburantes), proporcionando bioenergía*".

La biomasa se constituye como una fuente de energía interesante por diversas razones (Hernández, 2006):

- Es renovable y podría ser desarrollado sosteniblemente en el futuro.
- Posee unas características medioambientales favorables porque reduce el número de contaminantes en la atmósfera frente a los combustibles fósiles.
- Puede tener un potencial económico significativo frente al incremento del precio de los combustibles fósiles, beneficiando así la economía agraria
- Es fácil de almacenar, al contrario de lo que ocurre con las energías eólica y solar.
- El producto final es muy homogéneo y con alto poder calorífico.

Por otra parte, suponen una buena alternativa en tierras agrarias, con usos agrícolas y ganaderos cada vez más residuales y más mermados (Cámara, 2008) ya que, como exponen Reinoso y Cuevas (1993) este tipo de aprovechamiento incide favorablemente en zonas rurales mediante la creación de empleo, de forma que se facilita la retención de población al mejorar la calidad de vida de estas áreas.

Existen diferentes tipos de biomasa en función de su procedencia (Hernández, 2006):

- **Biomasa natural:** producida por los ecosistemas naturales.
- **Biomasa residual:** consistente en los residuos o subproductos de la actividad agrícola, ganadera y forestal, de las industrias agroalimentarias y de transformación de maderas.
- **Cultivos energéticos:** cultivos implantados con el fin exclusivo de obtener materiales destinados a su aprovechamiento energético.

Por consideraciones económicas y debido a la dificultad de asegurar una producción estable de biomasa residual, tipo más utilizado hasta el momento, en cantidades suficientes; en la actualidad y de cara al futuro, el sector se basará en gran medida en la implantación de **cultivos energéticos**, que permiten ofrecer una garantía de suministro de una biomasa de calidad, así como una optimización de la logística, lo cual es imprescindible para hacer de este tipo de aprovechamientos una alternativa económicamente sostenible (Vega *et al.*, 2008).

1.2. Cultivos energéticos

Los cultivos energéticos son plantaciones de árboles o plantas de crecimiento rápido cultivadas con el fin específico de producir la mayor cantidad posible de biomasa, mediante rotaciones cortas y densidades altas.

Las especies destinadas a cultivos con fines energéticos deben poseer ciertas características que garanticen la obtención de la máxima cantidad neta posible de energía de forma rentable, así es fundamental que presenten un crecimiento rápido, una buena capacidad de rebrote, tolerancia a altas densidades, resistencia a plagas y enfermedades y una buena calidad de su biomasa (Dopazo *et al.*, 2009). Otros autores (Fernández, 2007; Godino, 2005) añaden a las ya citadas otras características, como la necesidad de que presenten un balance energético positivo, una elevada eficiencia fotosintética, un alto grado de rusticidad y puesto que generalmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo deben presentar la posibilidad de desarrollarse en tierras marginales.

En el ensayo realizado en el “Cantil Sur” se utilizó un tipo determinado de cultivo energético consistente en plantaciones con alta densidad y turnos de corta breves (*Short Rotation Forestry*, SRF en terminología anglosajona). Estos cultivos se caracterizan por la utilización de especies de crecimiento rápido bajo un sistema de manejo intensivo y con un turno de corta entre los 2 y los 10 años (Sixto *et al.*, 2009).

1.2.1. Cultivos energéticos en escombreras mineras

Las actividades mineras, en el caso de Asturias centradas en carbón (antracita y hulla) generan estériles fruto del aprovechamiento, ya que en líneas generales, para obtener el producto a comercializar es necesario extraer una gran cantidad de materiales residuales que por motivos económicos se almacenan en zonas que las empresas disponen en las proximidades de la explotación, estas áreas se denominan escombreras.

Las escombreras procedentes de explotaciones mineras son terrenos muy erosionados en los que la calidad del suelo es extremadamente pobre, lo que provoca que permanezcan estériles en un período de tiempo que va desde los 15 a los 40 años (Singh, 2002).

El cese de la actividad minera en Asturias, hace que cada vez más escombreras estén inutilizadas, lo que conlleva un gran impacto ambiental y económico, por esos motivos la restauración de estos suelos es prioritaria en la actualidad.

En el proyecto de investigación "Ensayo de cultivos energéticos en antiguos terrenos de minería a cielo abierto y escombreras de HUNOSA" en el que se enmarca este trabajo, se han realizado plantaciones energéticas en 5 escombreras. Con la intención de minimizar tanto el impacto ambiental ya que ayuda a la reducción de la emisión de gases con efecto invernadero, principalmente CO₂, a través de la acumulación de carbono en el suelo y la fijación de CO₂ en la biomasa como resultado de la fotosíntesis; como el impacto económico, puesto que se puede conseguir una producción de biomasa económicamente viable (Macías *et al.*, 2009).

2. OBJETIVOS

Los objetivos generales de este trabajo son los siguientes:

- Conocer la influencia de la fertilización en el desarrollo de la plantación.
- Obtener resultados estadísticos del desarrollo de los clones implantados en el “Cantil II” y su implementación en un entorno SIG, de forma que se determine el clon con mayor producción.
- Conocer la influencia de las variables edáficas y fisiográficas sobre el desarrollo del clon más productivo.
- Determinar el poder calorífico en húmedo que produce la plantación en el momento actual.
- Generar una ecuación de regresión que relacione la biomasa en húmedo generada por el clon más productivo con las diferentes variables del medio.
- Determinar la biomasa seca que generaría una hipotética utilización del clon más productivo en las 3 hectáreas correspondientes a la zona de estudio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Caracterización de la zona de ensayo

Situada en el Concejo de Mieres y con una superficie de 3 hectáreas, la parcela “Cantil Sur”, forma parte de una escombrera perteneciente a HUNOSA (Hulleras del Norte, S.A).

La parcela se sitúa en una zona con regímenes de precipitación comprendidos entre 900 y 1500 mm de media anual y una humedad relativa del 80%. Localizada en cumbre, tiene una altitud máxima de 625 metros, pendientes inferiores al 15% y orientación predominante Noroeste. La vegetación existente antes de la implantación de las especies energéticas estaba compuesta principalmente por pequeños rodales de *Salix caprea* y *Salix atrocinerea*, además de un estrato arbustivo compuesto fundamentalmente por tojo (*Ulex europaeus*) y zarza (*Rubus ulmifolius*).



Figura 3.1. Localización de la zona de ensayo

3.2. Características de los cultivos

3.2.1. Clones empleados en el ensayo (material vegetal)

Entre las características importantes que debe cumplir el material vegetal utilizado para la producción de biomasa en alta densidad está el presentar una buena respuesta al recepe (Sixto *et al.*, 2009).

Puesto que las especies de la familia *Salicaceae* (*Populus* y *Salix*) cumplen esta y todas las demás características deseables en una especie destinada a cultivos energéticos, se postulan entre las que mayor interés despiertan en el ámbito europeo (Facciotto *et al.*, 2006).

Esto, unido a los estudios específicos sobre el cultivo con especies de la familia *Salicaceae*, y en concreto aquellos con utilización de especies e híbridos destinados a la producción de biomasa que se llevan realizando en nuestro país desde la década de los ochenta (San Miguel y Montoya, 1984). En este ensayo se hayan utilizado tres clones de chopo, uno de *Salix atrocinerea* y dos de *Salix viminalis*, de forma que se puede aprovechar la ventaja que supone la información sobre el comportamiento en crecimiento, desarrollo y producción obtenida en los estudios anteriormente mencionados.

Espece	Clon	Tipo MFR*	Identificación en campo
<i>Populus x canadensis</i>	AF2	Estaquillas	Pa
<i>Populus x euramericana</i>	I214	Estaquillas	Pi
<i>Populus deltoides x trichocarpa</i>	Raspalje	Estaquillas	Pr
<i>Salix viminalis x (S. schwerinii x S. viminalis)</i>	Olof	Estaquillas	So
<i>Salix schwerinii x Salix viminalis</i>	Tordis	Estaquillas	St
<i>Salix atrocinerea</i>	No definido	Estaquillas	Sa

Tabla 3.1. Clones utilizados e identificación en campo

3.3. Dispositivo experimental ^[1]

3.3.1. Diseño experimental del ensayo

Para este ensayo, se adoptó un diseño *split-pot* o de parcelas subdivididas, en el que se han considerado dos factores cualitativos, 6 niveles del factor clon y otros 3 correspondientes al tratamiento (fertilizante + herbicida), de todas las combinaciones posibles resultantes de intersectar dichas variables surgen un total de 54 parcelas distribuidas en 3 bloques. El esquema básico de actuación se repitió en tres bloques diferentes.

3.3.2. Niveles de tratamiento de las parcelas

- **Nivel 1:** Testigo. No se aplicaron ni fertilizantes ni herbicidas adicionales.
- **Nivel 2:** Se diferencia entre el año 1 y el resto de años:
 - **Año 1:** Aplicación de 80 kg/ha de nitrato amónico (20-25% de nitrógeno) y herbicida de traslocación y contacto (glifosato) a ultrabajo volumen a razón de 4 l/ha.
 - **Año 2 en adelante:** Aplicación de 300 kg/ha de fertilizante de liberación gradual NPK (6:20:12) + 2 MgO y aplicación de herbicida de traslocación y contacto (glifosato) aplicado a ultrabajo volumen a razón de 4l/ha.
- **Nivel 3:** Se diferencia entre el año 1 y los demás años:
 - **Año 1:** Aplicación de 160 kg/ha de nitrato amónico (20-25% de nitrógeno) y herbicida de traslocación y contacto (glifosato) a volumen ultrabajo (4 l/ha).
 - **Año 2 en adelante:** aplicación de 300 kg/ha de fertilizante de liberación gradual NPK (6:20:12) + 2MgO + aplicación de herbicida de traslocación y contacto (glifosato) aplicado a ultrabajo volumen a razón de 4 l/ha.

El resumen de lo expuesto anteriormente se muestra en la siguiente tabla:

[¹] En el Cantil II se ha llevado a cabo el dispositivo experimental del estudio: "Ensayo de cultivos energéticos en antiguos terrenos de minería a cielo abierto y escombreras de HUNOSA"

Nivel	Fertilización	Identificación en campo
1	No	F ₀
2	Si	F ₁
3	Si	F ₂

Tabla 3.2. Niveles de fertilización e identificación en campo

3.3.3. Preparación del terreno

Sobre el terreno, se realizó primeramente un **desbroce total y a hecho** para eliminar la vegetación preexistente. Se debía eliminar el matorral y los rodales arbolados existentes por lo que se utilizó un tractor agrícola de 150 CV al que se le acopló una desbrozadora de cadenas. Los pies fueron arrancados con un bulldozer.

Con el fin de airear bien el terreno y facilitar y mejorar el establecimiento de los sistemas radicales, se realizó un **subsulado cruzado**, el pase cruzado del subsolador extrajo la gran cantidad de manguera existente bajo la superficie como consecuencia del antiguo emplazamiento de una plantación de arándanos en el terreno. Se utilizó un bulldozer al que se le acopló un subsolador con tres rejon es que realizaron una labor de una profundidad media-alta (0,6-1,0 metros).

Para conseguir un aumento de la profundidad útil del perfil y la mejora de la permeabilidad del terreno se realizó un **gradeo** con un tractor agrícola y una grada de discos. Una vez realizado el gradeo se llevó a cabo una **fertilización de fondo** con fertilizante NPK (8:24:16) en dosis de 500 kg/ha.

Por último se llevó a cabo un **retovateado** con el que se incorporó al suelo el fertilizante aplicado en el paso anterior y se acondicionó el suelo de modo que estuviera bien mullido y meteorizado en el momento de la plantación.

3.3.4. Replanteo de parcelas

Una vez preparado, el terreno se dividió en parcelas, delimitadas usando estacas con etiquetas de identificación, con el fin de maximizar la producción de biomasa en los cultivos. Para ello, según Mitchell *et al.* (1999), se recomienda que los ensayos de cultivos con plantas leñosas para la producción de biomasa se realicen en parcelas con un tamaño mínimo de 400 m².

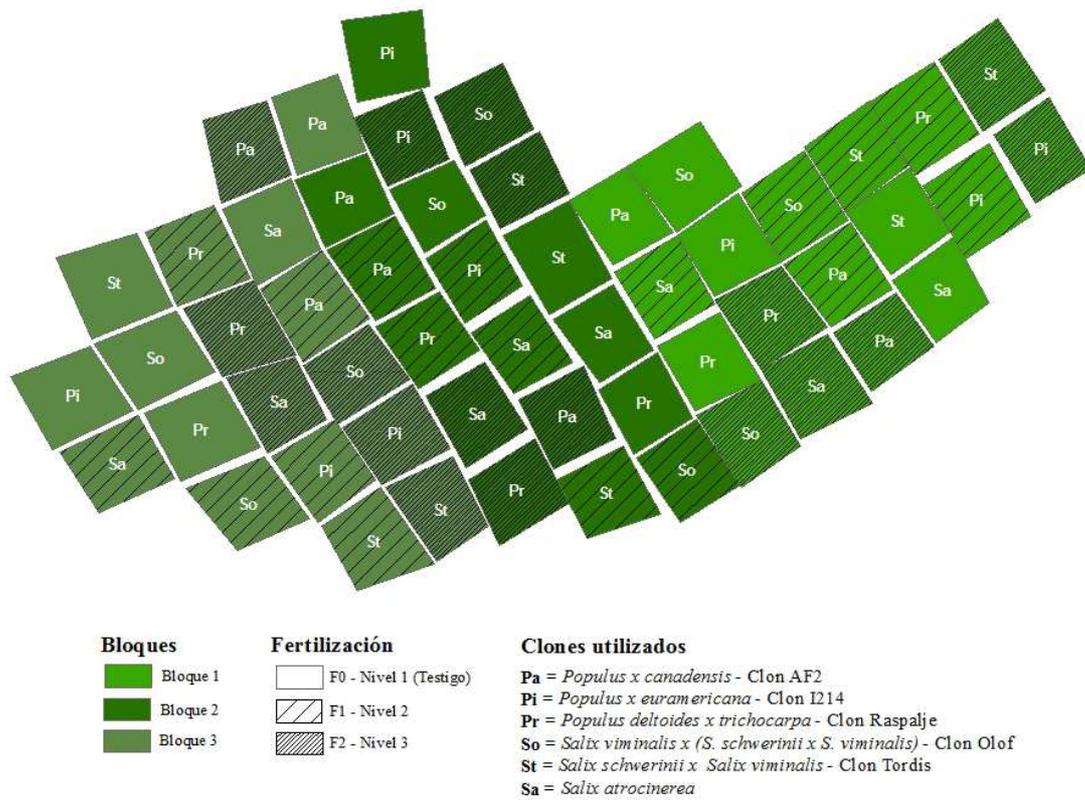


Figura 3.2. Distribución de bloques, clones y fertilización



Figura 3.3. Distribución de las parcelas sobre el terreno

3.3.5. Micorrización

Con la finalidad mejorar la absorción de agua y sales minerales del suelo en la planta, incrementando así su crecimiento, se micorrizaron tanto las estaquillas como la planta de abedul con un gel inoculante tipo *slurry* que contiene una mezcla de micelios y esporas de endomicorrizas y hongos de los géneros *Pisolithus*, *Gastroderma*, *Laçaria* y *Boletus*.

La micorrización se llevó a cabo mediante la inmersión del material vegetal en cubos con esta mezcla justo antes del momento de la plantación.

3.3.6. Ejecución de la plantación

Se plantaron estaquillas de tallo de sauce y chopo lignificadas, de brotes de un año, sanas, rectas y sin lesiones en la corteza con un tamaño medio de 20 cm de longitud y 1,5 - 2 cm de diámetro.

Se siguió el esquema sueco de doble fila por ser el método más frecuente y con mejores resultados en este tipo de cultivos. Puesto que la densidad de planta en todas las parcelas es 10.000 pies/ha, la separación entre plantas dentro de una misma línea es 0,9 metros.

La distancia entre líneas adyacentes es siempre 0,75 metros, mientras que entre dobles líneas es 1,5 metros para permitir el paso de la maquinaria (Mead, 2005). Las estaquillas, una vez micorrizadas, se clavaron en el suelo dejando, al menos, dos yemas por encima del mismo.

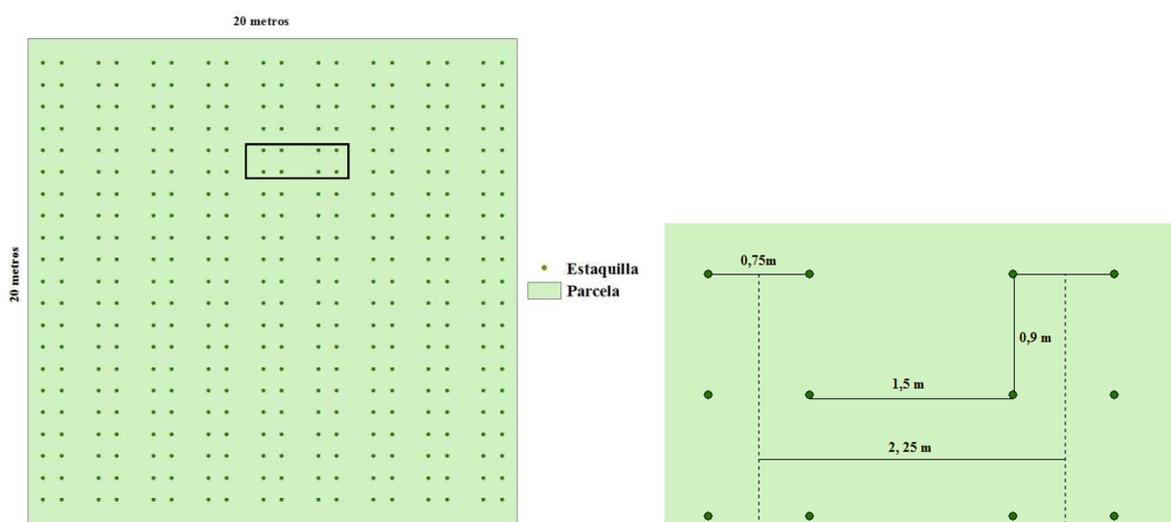


Figura 3.4. Esquema y detalle de la distribución de las estaquillas

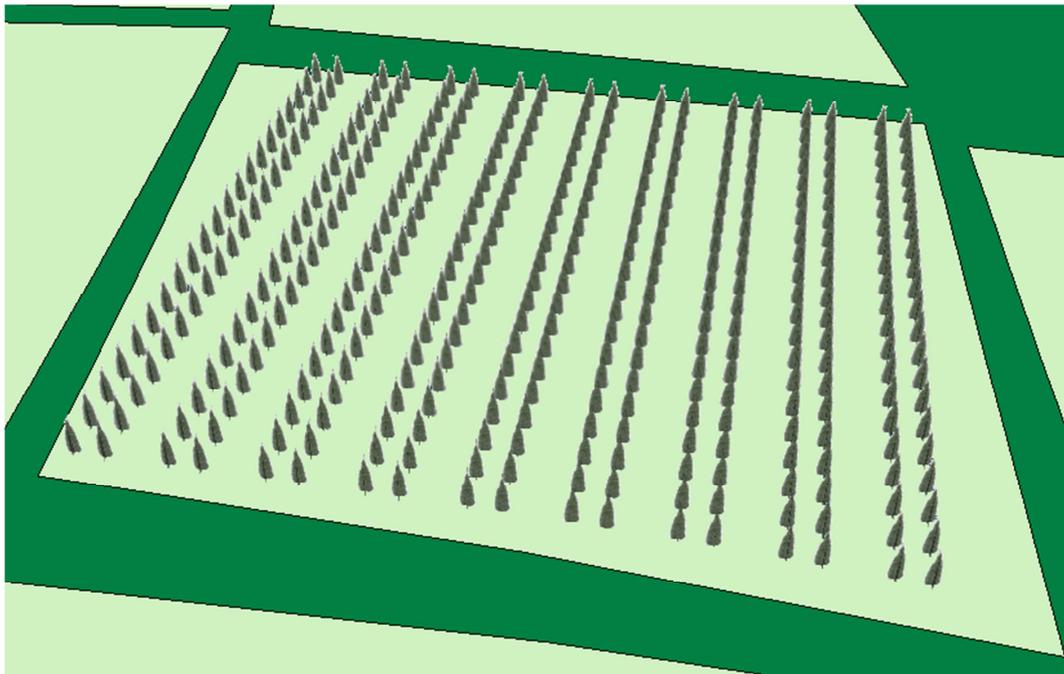


Figura 3.5. Ejemplo de distribución de estaquillas en una de las parcelas de la zona de ensayo

3.3.7. Control de malas hierbas

El control inadecuado de las poblaciones de malas hierbas se considera uno de los factores de fracaso más habitual en el correcto establecimiento de plantaciones energéticas en alta densidad y corta rotación, ya que éstas compiten por el espacio y los recursos (Buhler *et al.*, 1998)

Debido a esto y puesto que es un problema que aparece de forma habitual, una vez realizada la plantación, se aplicó en el terreno un tratamiento de herbicida de preemergencia sobre las estaquillas sin brotar con la materia activa oxifluorfén a razón de 5 l/ha. Utilizando una mochila convencional de 2 bares de presión y aplicador forrado con faldones de caucho para canalizar el flujo y evitar así el contacto del producto con las plantas.

3.4. Material empleado

3.4.1. Datos

Los datos utilizados proceden de tres inventarios realizados en la plantación durante el año 2012:

- *Inventario dasométrico:* tiene por finalidad precisar la forma en que se representa el estado de la plantación desde el punto de vista de su masa arbórea. Las variables dasométricas medidas fueron altura, diámetro basal y diámetro normal.
- *Inventario de suelo:* se tomaron muestras de suelo de las diferentes parcelas y se realizó su análisis en laboratorio.
- *Inventario de biomasa:* se realizó un inventario en la plantación para determinar la biomasa correspondiente a las distintas fracciones en que esta se divide, con un método consistente en pesar en verde la totalidad de la copa, y tomar en verde una muestra para secar en laboratorio, el tronco se trocea y pesa para proceder posteriormente a su secado (Balboa, *et al.*, 2004).

3.4.2. Software

En este trabajo se realizará un análisis de la producción de los diferentes clones implantados y su correlación con las diversas variables catalogadas en los inventarios enumerados anteriormente. Para esto, se utilizarán dos tipos diferentes de software:

- *Estadístico: SPSS Statistics 17.0,* es un conjunto de herramientas de tratamiento de datos para el análisis estadístico. Tiene la capacidad de trabajar con bases de datos de gran tamaño y lleva a cabo las tres etapas claves para la realización del estudio estadístico: implementación organizada y ordenada de la base de datos, colabora en la manipulación de datos e implementa técnicas estadísticas para el análisis de los datos.
- *Sistema de Información Geográfica (SIG): ArcGis 10* es un conjunto de aplicaciones y herramientas de software desarrollado por la compañía Esri. Bajo el nombre genérico se agrupan diversas aplicaciones que permiten la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

3.5. Preparación de la información

En primer lugar se realizó un trabajo de campo consistente en la recopilación de las coordenadas de las cuatro esquinas de cada una de las parcelas. Con esta información y el nombre de las parcelas se creó una base de datos que posteriormente se incorporó a ArcGis mediante la herramienta “*Display XY Data*”, se obtienen una serie de puntos con las coordenadas de las parcelas. Estos puntos se exportan a formato “*shape*”.

A partir de los puntos obtenidos, utilizando como campo de unión el nombre de la parcela en la herramienta “*Points to line*” se unen los cuatro vértices de cada parcela para formar un polígono; los centros de las parcelas se obtienen mediante la función “*Feature to point*”.

Por último, se realiza un “*Join*” entre los polígonos y la base de datos que contiene la información de los inventarios de suelo y biomasa y se exporta a formato “*shape*” para poder comenzar a trabajar con todos los datos.

3.6. Variables de producción analizadas

3.6.1. Producción en volumen

El **volumen** es una variable de gran importancia, ya que una gestión eficiente de los recursos depende de la precisión de su estimación (Diéguez-Aranda *et.al.*, 2005).

Para realizar el cálculo del volumen se recurre a procesos matemáticos; la forma más simple es la asimilación del fuste a una forma geométrica conocida, en este caso y puesto que se trata de una formación clara de frondosas, el árbol se asemejará a un cono (Izco, 2003), para la determinación del volumen medio de cada parcela se utilizará la fórmula:

$$Volumen = \frac{1}{3} \cdot S \cdot h$$

$$S = \pi \cdot \frac{1}{4} \cdot \varnothing^2$$

S: sección del árbol

\varnothing^2 : diámetro medio de los árboles de la parcela (cm)

h: altura media de los árboles de la parcela (cm)

3.6.2. Producción en biomasa

Todas las técnicas empleadas para la estimación de biomasa han de incluir una determinación de la biomasa del árbol individual mediante las denominadas técnicas de “árbol tipo” y su agregación para determinar la biomasa total por unidad de superficie (Satoo y Madgwick, 1982).

Como se ha comentado anteriormente, el inventario se realizó de este modo con la finalidad de conocer la distribución de biomasa en sus distintas fracciones, ya que la presencia de nutrientes en las fracciones más finas, hojas y ramillos tiene gran implicación en la calidad de combustión de la biomasa (Kauter *et al.*, 2003) y en la sostenibilidad nutricional (Merino *et al.*, 2005). Así, en adelante se hará referencia a la biomasa según la siguiente tabla:

Diámetro de la fracción	Clasificación
$\varnothing \leq 0,5 \text{ cm}$	Fracción fina
$0,5 \text{ cm} < \varnothing \leq 2 \text{ cm}$	Fracción intermedia
$\varnothing > 2 \text{ cm}$	Fracción gruesa

Tabla 3.3. Clasificación de la biomasa

3.7. Métodos de análisis

Se utilizarán tres métodos estadísticos distintos con la intención de determinar la influencia que tienen sobre la producción los factores de suelo y la fertilización.

3.7.1. Gráficos de barras apiladas

Es un tipo de gráfica que representa una serie de rectángulos colocados unos sobre otros; el área de cada rectángulo es proporcional a la cantidad que representa, es decir, las barras apiladas muestran la relación de los elementos individuales con el conjunto.

3.7.2. Diagrama de caja y bigotes

Son una presentación visual que describe varias características importantes al mismo tiempo. Para su realización se representan los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos sobre un rectángulo. Dicho rectángulo está dividido por un segmento que indica donde se posiciona la mediana (Tomeo y Uña, 2003). Las líneas que sobresalen de la caja se llaman bigotes y tienen como extremos los valores mínimo y máximo de la variable; éstos presentan un límite de prolongación, de modo que

cualquier dato que no se encuentre dentro del límite es marcado e identificado individualmente.

3.7.3. Correlaciones bivariadas de Spearman

El concepto de correlación se refiere al grado de variación conjunta existente entre dos o más variables. El procedimiento “**Correlaciones Bivariadas**” de SSPSS permite seleccionar las variables del archivo de datos que poseen formato numérico y seleccionar el coeficiente de correlación deseado, en este caso el coeficiente de Spearman, cuya función es determinar si existe una relación lineal entre dos variables a nivel ordinal y que esta relación no sea debida al azar; es decir, que la relación sea estadísticamente significativa.

Una vez realizado el proceso estadístico, la salida proporcionada por el SPSS es una matriz de tipo simétrica que toma valores unitarios en la diagonal. Se muestra para cada par de variables el coeficiente de correlación ρ de Spearman, la significación del contraste realizado, de modo que cuanto menor sea su valor más fiable será el dato arrojado por el coeficiente de correlación seleccionado; y el número de casos no perdidos considerados.

La existencia de correlación se indica con un asterisco sobre el coeficiente ρ si la correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral) o dos asteriscos si la correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). Pueden darse dos tipos de correlación:

- *Positiva*: los valores de las dos variables cambian de forma parecida.
- *Negativa*: los valores de las dos variables cambian al revés.

3.7.4. Regresión

El modelo de regresión nos permite establecer la relación que existe entre una variable dependiente (Y) y un conjunto de variables independientes (X_1, X_2, \dots, X_n). El resultado se expresa mediante la anotación matemática del modelo o ecuación de regresión, semejante a la siguiente:

$$Y = cte + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

En este caso se utilizará seleccionando las variables una a una, método denominado “**pasos sucesivos**”. La finalidad es buscar entre todas las posibles variables explicativas las que mejor expliquen la variable dependiente sin que ninguna de ellas sea combinación lineal de las restantes. Las tablas resultado obtenidas en el análisis con SPSS, serán como las siguientes (todas las tablas y la ecuación que aparecen en este apartado son un ejemplo para facilitar el entendimiento de cómo funciona la regresión, en ningún caso son un resultado):

Resumen del modelo: explica la validez del modelo a través del valor de R^2 , cuanto más cercano a 1 sea su valor, mejor será el modelo.

Anova: la prueba de análisis de la varianza, que nos muestra si la varianza explicada por la regresión es significativamente distinta (y superior) a la varianza no explicada.

Modelo de regresión: a partir de los coeficientes no estandarizados se deducirá la ecuación de regresión.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se utilizarán los materiales anteriormente descritos y se aplicarán los métodos necesarios para la determinación del clon más productivo a partir de los datos de su producción de **biomasa en campo** y el análisis de los factores tanto edáficos como fisiográficos que pueden afectar a su producción de biomasa.

Por otra parte, se evaluará el poder calorífico de la plantación en la actualidad; a continuación se calculará el porcentaje de humedad de la biomasa en campo y se obtendrá una fórmula para el cálculo de la biomasa total mediante regresión, además se estimará la producción total de biomasa seca en la plantación si las tres hectáreas estuvieran plantadas con el clon más productivo, para a continuación realizar una estimación del poder calorífico que se podría obtener.

4.1. Influencia de la fertilización en la producción

La fertilidad del suelo se entiende como su capacidad para suministrar todos y cada uno de los nutrientes que necesitan las plantas en cada momento, en la cantidad necesaria y en forma asimilable (García-Serrano *et al.*, 2010). Los fenómenos a los que se encuentra sometido el suelo, tales como erosión y lavado, pueden provocar la pérdida de nutrientes provocando así que las plantas no puedan cumplir sus necesidades nutritivas.

Para evitar esto, la asociación italiana para la biomasa (Itabia, 2006) cita en su guía de producción en SRF, la conveniencia de incorporar al terreno fertilizantes orgánicos (Sixto *et al.*, 2007) que cubran las carencias del suelo y permitan cumplir las exigencias que en determinados momentos de su desarrollo tienen las plantas.

En los cultivos que ocupan este trabajo, como ya se comentó anteriormente, se llevaron a cabo tres niveles de fertilización distintos con el fin de evaluar la influencia de la fertilización sobre la producción.

En los gráficos y la tabla siguientes se valora de forma independiente la incidencia de la fertilización sobre el volumen producido y la biomasa.

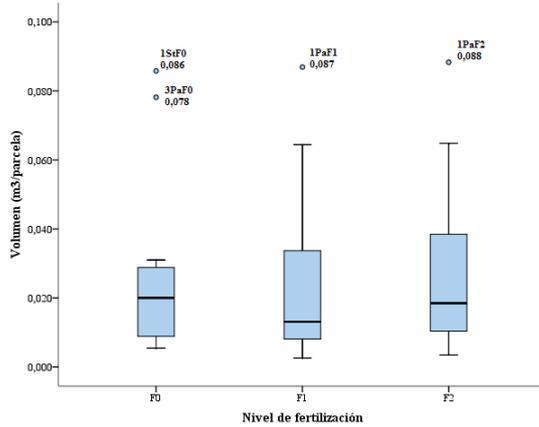


Figura 4.1. Influencia de la fertilización en la producción en volumen

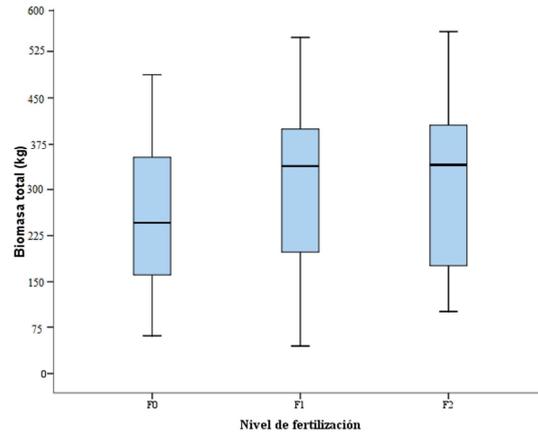


Figura 4.2. Influencia de la fertilización en la producción de biomasa

Nivel de fertilización	Volumen (m³/parcela)	Biomasa (kg/parcela)
F0	0,017	200,20
F1	0,025	236,38
F2	0,028	239,91

Tabla 4.1. Influencia de la fertilización en la producción

Analizando los resultados de los gráficos y la tabla se puede observar en ambos casos una diferencia clara entre las parcelas sin fertilización (F0) y las parcelas con fertilización. Lo que indica una influencia favorable de la fertilización, ya que se produce un aumento de la producción.

Sin embargo, si se comparan los niveles de fertilización F1 y F2 se observa que muestran resultados parejos, tanto en la producción en volumen como en la biomasa total, esto indica que no existe acción favorable de la fertilización, hecho que se contrapone con lo que cabría esperar.

Este hecho se observa también en la visualización de la influencia de la fertilización sobre las variables de producción, como demuestran los siguientes mapas:

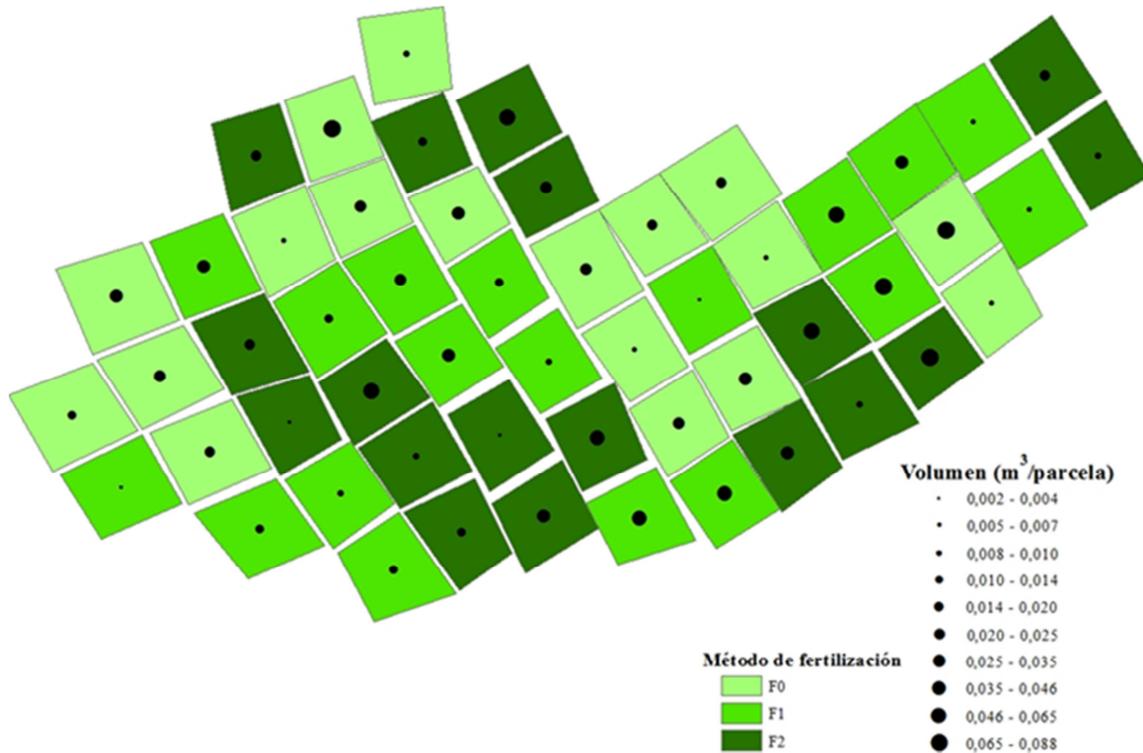


Figura 4.3. Influencia de la fertilización en la producción de volumen visualizada en GIS

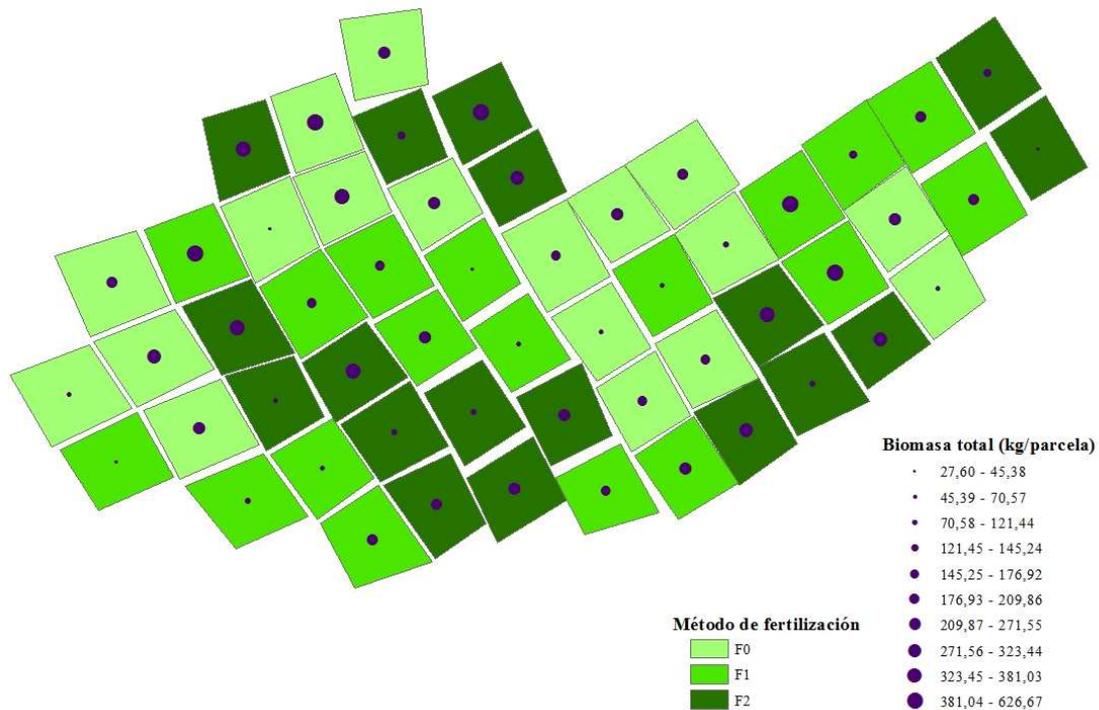


Figura 4.4. Influencia de la fertilización en la producción de biomasa visualizada en GIS

Los puntos más gruesos deberían aparecer únicamente en las parcelas con fertilización F2, pero también aparecen en parcelas de tipo F1, nuevamente se demuestra lo mencionado anteriormente, entre F1 y F2 no existe un aumento que justifique un beneficio producido por la fertilización.

Para buscar la explicación a esto se analizará la correlación entre el nivel de fertilización y las variables de producción. Dicho análisis se muestra en la siguiente tabla:

		V(cm ³)	Fracción fina (kg)	Fracción intermedia (kg)	Fracción gruesa (kg)	Biomasa total (Kg)
Nivel de fertilización	<i>Coefficiente de correlación</i>	0,32	0,141	0,22	0,31	0,62
	<i>Sig. (bilateral)</i>	0,818	0,309	0,876	0,844	0,638
	<i>N</i>	54	54	54	42	54

Tabla 4.2. Correlación entre fertilización y producción

Se observa que no existe ninguna correlación entre la fertilización y las variables de producción, lo que justifica que ésta no provoque un incremento notable.

El hecho de que la fertilización no produzca el efecto esperado se debe a un fallo en la aplicación del herbicida para el control de malas hierbas realizado en la primavera de 2010. Como consecuencia de este fallo el herbicida no realizó su función y tanto el matorral como las malas hierbas continuaron presentes en las parcelas, así los nutrientes suministrados en la posterior fertilización estaban disponibles tanto para las estaquillas plantadas como para el matorral y las malas hierbas, haciendo más fuerte la competencia y perjudicando el crecimiento de las plantas, lo que conlleva que éstas alcancen valores de diámetros y altura menores de lo esperados y produzcan menos biomasa de la que se suponía (Castaño Díaz, M., comentario personal [2]).

[2] María Castaño Díaz es la responsable del estudio: "Ensayo de cultivos energéticos en antiguos terrenos de minería a cielo abierto y escombreras de HUNOSA" en el momento de redacción de este trabajo.

4.2. Determinación del clon más productivo

Debido a la importancia de la biomasa y al interés de prolongar el ensayo en el futuro obteniendo la más alta producción, es muy importante conocer el clon con mayor productividad.

Existen dos variables productivas en este trabajo, por una parte el volumen y por otra la biomasa, cabría esperar que el clon más productivo en volumen lo fuese también en biomasa, pero la existencia de otras variables con influencia hace necesaria la comparación entre ambos tipos de aprovechamiento para determinar el clon más interesante desde el punto de vista de obtención de biomasa.

En primer lugar se realizará una correlación entre el volumen, las diferentes fracciones de biomasa y la biomasa total. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

		Fracción fina (kg)	Fracción intermedia (kg)	Fracción gruesa (kg)	Biomasa total (Kg)
V(m³)	<i>Coefficiente de correlación</i>	0,381**	0,779**	0,500**	0,745**
	<i>Sig. (bilateral)</i>	0,005	0,000	0,001	0,000
	<i>N</i>	54	54	42	54

Tabla 4.3. Correlación entre volumen y biomasa

Se observa una clara relación entre el volumen y las variables mencionadas, lo que podría indicar que el clon más productivo en volumen, lo será también en biomasa, sin embargo para no cometer un error en la elección del clon que más biomasa produce, ya que esto podría producir grandes pérdidas, han de aplicarse otros métodos de análisis.

Se comparará entonces la producción de los diferentes clones, tanto en volumen como en biomasa:

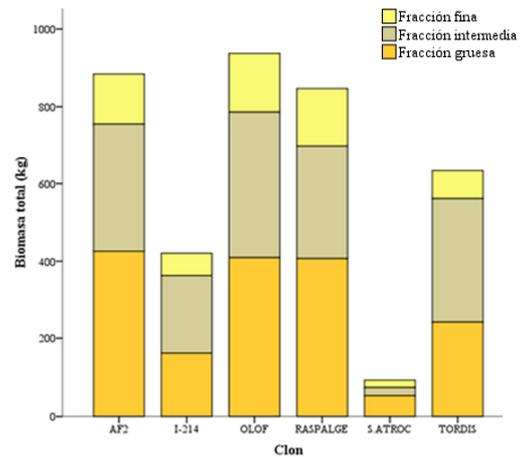
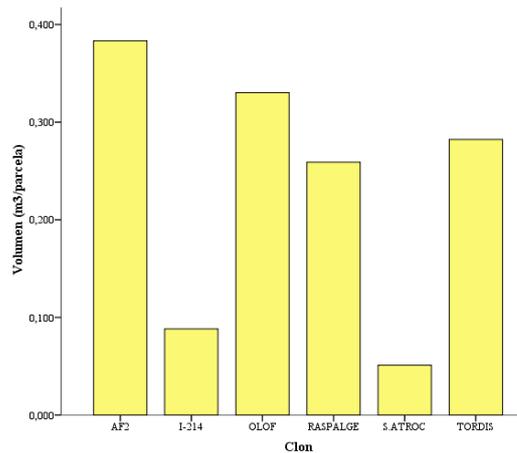


Figura 4.5. Producción de los clones en volumen Figura 4.6. Producción de los clones en biomasa

Clon	Volumen (m³/parcela)	Biomasa total (kg/parcela)
AF2	0,043	313,25
I-214	0,010	114,98
Olof	0,037	320,34
Raspalje	0,029	292,10
<i>S.Atrocinerea</i>	0,006	64,39
Tordis	0,031	198,98

Tabla 4.4. Producción de cada clon en volumen y biomasa en campo

La comparación entre producciones muestra que el clon que produce un mayor volumen es AF2, mientras que en biomasa la producción es superior en el Olof.

Para encontrar una explicación a esta diferencia se estudiarán las variables de árbol diámetro medio a 25 cm, altura media y número medio de brotes por planta, ya que ambos clones tienen capacidad de brotar de cepa, esto supone que de una misma cepa puede salir un número diferente de brotes. La siguiente tabla muestra dichas variables:

Clon	Diámetro medio a 25 cm (cm)	Altura media (m)	Nº medio de brotes por planta
AF2	1,43	167,39	1
Olof	1,24	208,22	2

Tabla 4.5. Variables de árbol clones AF2 y Olof

Los valores dasométricos (diámetro y altura) son semejantes para ambos clones, pero el clon AF2 tiene un diámetro medio más elevado lo que implica un mayor volumen al ser esta variable elevada al cuadrado en el cálculo del volumen.

El número de brotes es un dato muy importante desde el punto de vista de determinación de biomasa ya que en la cantidad total de ésta se incluye el conjunto de la planta, es decir, el brote principal, los brotes secundarios y las ramas de todos ellos mientras que el cálculo del volumen incluye únicamente el fuste del brote principal.

Para justificar lo anteriormente expuesto se examinarán los datos en busca de una correlación entre el número de brotes y las dos variables de producción.

En la siguiente tabla se observa que existe una correlación entre el número de brotes de las plantas y la fracción intermedia de biomasa, compuesta fundamentalmente por el ramaje; mientras que la correlación entre el número de brotes y el volumen es inexistente, ya que como se mencionó anteriormente para el cálculo del volumen únicamente se utiliza un brote.

		V(cm ³)	Fracción fina (kg)	Fracción intermedia (kg)	Fracción gruesa (kg)	Biomasa total (Kg)
Nº de brotes	<i>Coefficiente de correlación</i>	0,180	0,011	0,297*	0,127	0,092
	<i>Sig. (bilateral)</i>	0,193	0,936	0,029	0,428	0,508
	<i>N</i>	54	54	54	41	54

Tabla 4.6. Correlación entre el número de brotes y la producción

Por último un nuevo análisis de las variables, demuestra que existe una correlación entre el número medio de brotes del clon Olof y la biomasa total producida por éste, hecho que también contribuye a justificar que el clon más productivo en volumen sea diferente al más productivo en biomasa.

		Fracción fina (kg)	Fracción intermedia (kg)	Fracción gruesa (kg)	Biomasa total (Kg)
Nº de brotes	<i>Coefficiente de correlación</i>	0,427	0,603	0,126	0,703*
	<i>Sig. (bilateral)</i>	0,252	0,086	0,748	0,035
	<i>N</i>	9	9	9	9

Tabla 4.7. Correlación entre el número de brotes y la producción de biomasa del clon Olof

Analizadas todas estas variables y dado que el dato más influyente en este estudio es la cantidad de biomasa producida, se determina como más productivo el clon **Olof** (*Salix viminalis* x (*S. schwerinii* x *S. viminalis*)). Las distintas variables edáficas y fisiográficas que afectan al desarrollo, crecimiento y producción de la plantación serán analizadas en función de su influencia sobre este clon de sauce.

4.3. Clon Olof

Olof (*Salix viminalis* x (*S. schwerinii* x *S. viminalis*)). Olof es un cruce entre la variedad Bowles Hybrid y Björn, tiene hojas en forma de lanceta y un tallo recto. La variedad, muy ramificada, tiene un rendimiento muy alto, y una buena resistencia a la roya de la hoja (web “Agrobransle”).

4.3.1. Distribución de biomasa por fracciones

Se puede observar la distribución de la producción en fracciones del clon en el siguiente mapa:

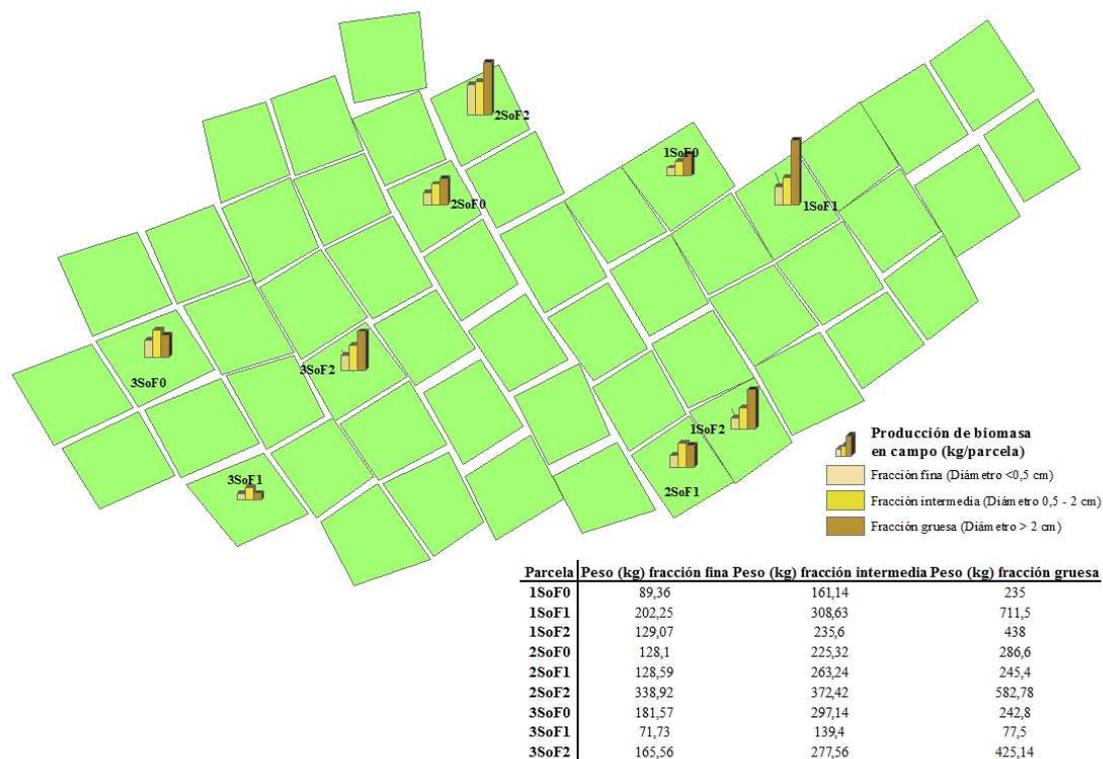


Figura 4.7. Distribución de la producción del clon Olof

4.4. Análisis de variables que afectan a la producción del clon Olof

4.4.1. Factores fisiográficos

La fisiografía de un lugar, de una zona o de una comarca es la descripción del relieve terrestre. Es importante tener en cuenta los factores fisiográficos pues que estos influyen de forma local sobre los factores edáficos y provocar anomalías en el desarrollo de los árboles (Serrada, 1998).

En este caso se analizarán conjuntamente tres factores fisiográficos:

- Altitud: su influencia está marcada por el rango óptimo para el desarrollo de las especies implantadas, puesto que la variación de la altitud tiene como consecuencia una fluctuación en la presión atmosférica, la temperatura, el déficit hídrico, las radiaciones del espectro visible y ultravioleta y la precipitación
- Pendiente: tiene una gran influencia, en la cantidad de agua disponible para las plantas (Serrada, 1998)
- Orientación: marca su influencia sobre la exposición y ésta influye directamente sobre las horas de insolación y la radiación recibida por las plantas. Lo que conlleva fluctuaciones de la temperatura y la cantidad de agua disponible.

Para determinar la incidencia de estas variables sobre la producción de biomasa total se analizará si existe una correlación, los datos obtenidos en ésta se muestran en la siguiente tabla:

		Pendiente (%)	Orientación	Altitud (m)
Biomasa total (kg/parcela)	<i>Coefficiente de correlación</i>	0,188	-0,076	-0,130
	<i>Sig. (bilateral)</i>	0,173	0,585	0,412
	<i>N</i>	54	54	54

Tabla 4.8. Correlación entre la biomasa total y los factores fisiográficos

Se observa que no existe una correlación entre las variables, lo que indica que la producción del clon Olof no está influenciada por ninguno de los factores, esto se puede comprobar en la tabla siguiente, donde aparecen los valores de las variables para cada una de las parcelas donde se ha implantado el clon.

Parcela	Pendiente (%)	Orientación (°)	Altitud (m)	Biomasa total en campo (Kg)
1SoF0	1,54	146,92	621,30	194,2
1SoF1	7,25	201,94	620,41	488,952
1SoF2	1,01	155,16	619,69	321,068
2SoF0	1,52	351,15	614,36	256,008
2SoF1	4,69	157,08	619,52	254,892
2SoF2	11,98	334,35	607,47	517,648
3SoF0	4,83	236,52	619,64	288,604
3SoF1	9,86	325,42	620,78	115,452
3SoF2	3,04	332,97	620,34	347,304

Tabla 4.9. Factores fisiográficos y biomasa total en campo de las parcelas donde se ha instalado el clon Olof

Se observa que parcelas con una producción similar en biomasa, como la **2SoF0** y la **2SoF1** presentan valores de orientación y pendiente alejados; de lo que se puede deducir que la producción no está determinada por los factores fisiográficos.

4.4.2. Factores edáficos

Son variables cuyo análisis es de gran utilidad en el proceso de analizar y caracterizar los factores de desarrollo de los cultivos, ya que de las propiedades químicas y físicas del suelo depende la capacidad de este para suministrar a la planta todos y cada uno de los elementos nutritivos que esta exige, en la forma, cantidad y momento adecuados (Báscones, 2004).

- Factores químicos

Estas propiedades resultan del proceso de formación y evolución del suelo y su conocimiento permite elaborar criterios valiosos para su clasificación y especialmente para la interpretación de las relaciones suelo – planta.

	pH	CE	MO	C	N	CN	P	Ca	Mg	K	Na	Al	CICE	
Biomasa total (kg)	<i>Coficiente de correlación</i>	0,23	0,47	-0,38	-0,38	0	-0,68*	0,47	0,22	0,35	0,37	0,17	0,18	0,53
	<i>Sig. (bilateral)</i>	0,55	0,20	0,32	0,32	1	0,04	0,20	0,58	0,36	0,33	0,66	0,64	0,14
	<i>N</i>	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Tabla 4.10. Correlación entre la biomasa total producida en campo y los factores químicos del suelo

La relación Carbono/Nitrógeno es un parámetro que evalúa la calidad de los restos orgánicos de los suelos. En un suelo que va mineralizando su materia orgánica e incorporándola al humus, la relación entre estos dos elementos se va modificando conforme avanza el proceso (Ferreira, 2011). Un valor bajo de la relación CN favorece la mineralización, lo que implica una fuerte producción de nitrógeno inorgánico utilizable para las plantas (Fuentes, 1999). Esto está en consonancia con la existencia de una correlación negativa entre la biomasa total producida y la relación CN, ya que un valor más bajo de la relación CN en el suelo permite que se produzca una mayor cantidad de biomasa. Se puede observar claramente en el mapa siguiente, donde las marcas de producción son de mayor tamaño en las zonas más claras, es decir en aquellas con un valor de la relación CN más bajo.



Figura 4.8. Influencia de la relación CN en la producción de biomasa del clon Olof

- Factores físicos

La condición física de un suelo, determina, la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes (Ruks *et al.*, 2004). Se considera necesario, conocer estas propiedades para entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas.

Para determinar la influencia que los factores físicos tienen sobre la producción de la plantación se estudia la correlación entre la biomasa total obtenida en campo y estos factores. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

		Arena	Limo	Arcilla	Profundidad efectiva
Biomasa total (kg/parcela)	<i>Coefficiente de correlación</i>	-0,233	0,500	0,720*	-0,689*
	<i>Sig. (bilateral)</i>	0,546	0,170	0,29	0,040
	<i>N</i>	9	9	9	9

Tabla 4.11. Correlación entre la biomasa total producida en campo y los factores físicos del suelo

La producción de biomasa total muestra una relación positiva con la arcilla y negativa con la profundidad efectiva. Esto se debe a la elevada exigencia de las especies del género *Sáliz* (Cerrillo, 2011), esta necesidad de agua se sacia en mayor medida en suelos arcillosos, ya que tienen una mayor capacidad de acogida (García – Serrano, 2010), esto es, el volumen de agua que es capaz de retener el suelo. La comparación de esta característica en suelos arcillosos con otro tipo de suelos se puede ver en la siguiente tabla:

Tipo de suelo	Capacidad de campo (mm) ^[3]
Arenosos	0,33 – 0,85
Ligeros	0,85 – 1,25
Medios	1,25 – 1,90
Arcillosos	1,90 – 2,10

Fuente: Hidalgo, 1993

Tabla 4.12. Capacidad de campo de los suelos

^[3] 1 mm. Equivale a 1 litro por cada m² de parcela

Así, son los suelos arcillosos los que mejor se adaptan a las necesidades del clon, la producción aumenta a medida que lo hace la cantidad de arcilla, puesto que en este caso habrá más cantidad de agua disponible para las plantas.

Por otro lado, los suelos arcillosos ofrecen una mayor resistencia a ser atravesados por el agua, es decir, la velocidad de infiltración del agua en el suelo es baja comparada con el resto de suelos, como se puede ver en la siguiente tabla, entonces a mayor profundidad menor disponibilidad de agua.

Tipo de suelo	Permeabilidad (mm/hora)
Arenosos	19 – 25,5
Ligeros	12 – 19
Medios	10 – 1,5
Arcillosos	7,5 - 9

Fuente: Hidalgo, 1993

Tabla 4.13. Permeabilidad de los suelos

De esto se puede deducir que los suelos arcillosos acumulan más cantidad de agua en las zonas poco profundas del suelo, mientras que la resistencia que presentan a la penetración del agua hace que en las zonas más profundas la disponibilidad de ésta sea mucho menor. Por tanto, el clon Olof por su carácter higrófilo prefiere suelos arcillosos poco profundos.

Lo anteriormente expuesto queda reflejado en los siguientes mapas, donde se aprecia que el clon Olof produce más biomasa a mayor cantidad de arcilla y menos a mayor profundidad.

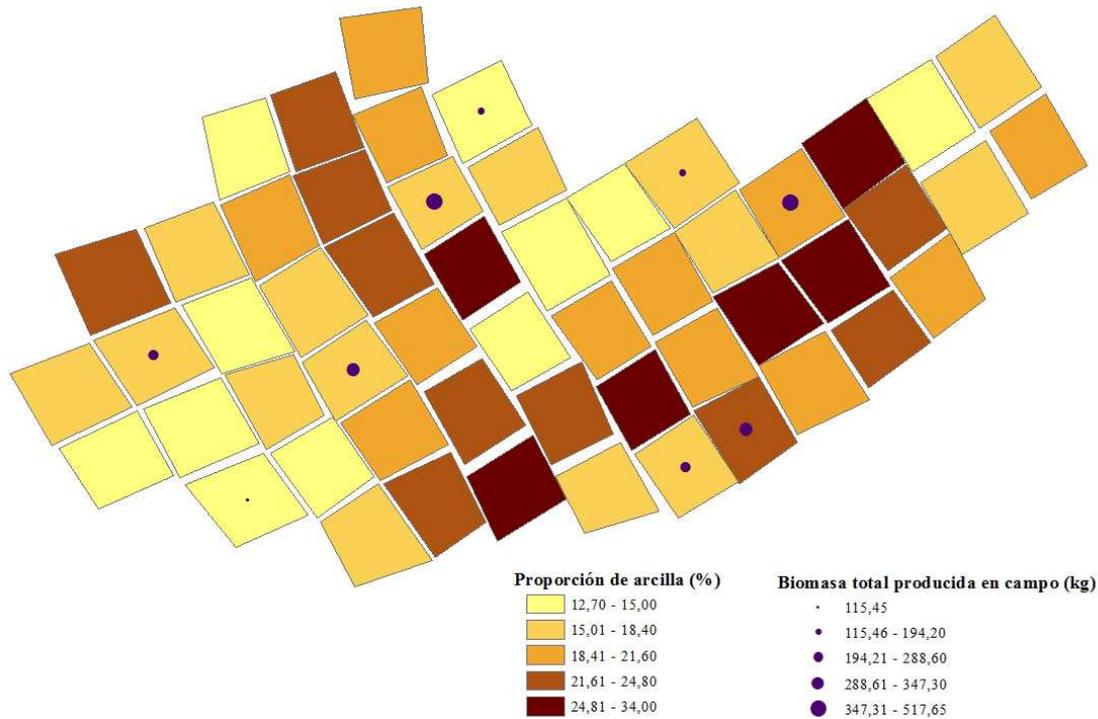


Figura 4.9. Influencia de la proporción de arcilla en suelo en la producción de biomasa del clon Olof

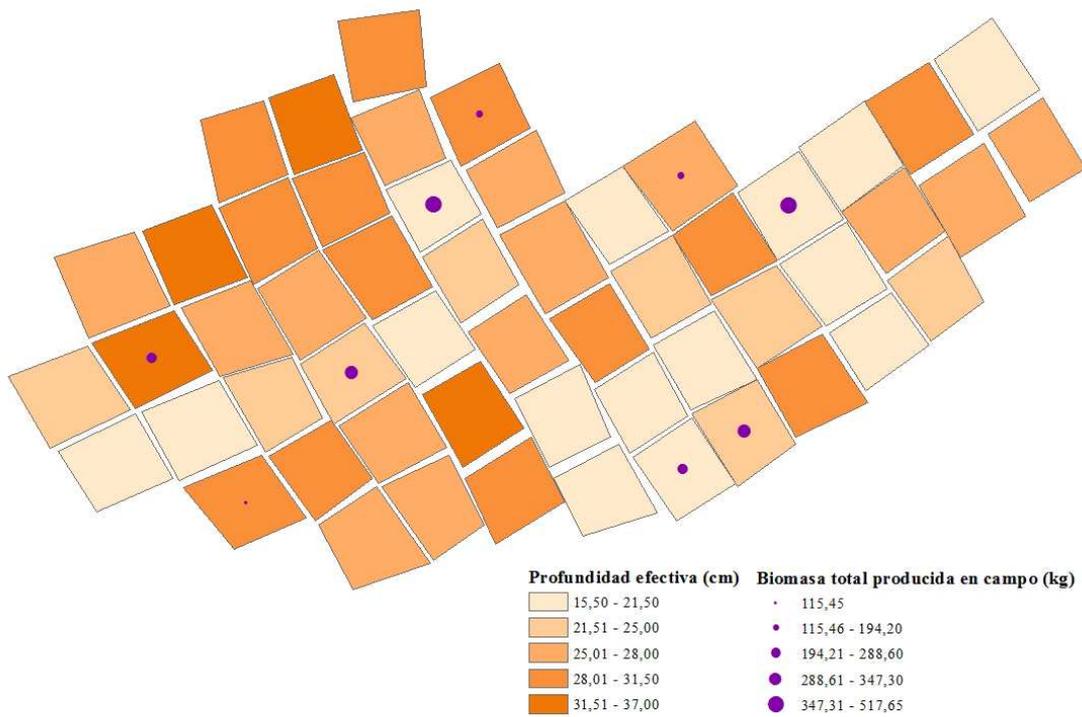


Figura 4.10. Influencia de la profundidad efectiva del suelo en la producción de biomasa del clon Olof

4.5. Poder calorífico en la plantación actual

El poder calorífico es la cantidad de energía liberada por el combustible, en este caso la biomasa, al ser quemado. Se clasifica en dos tipos Poder Calorífico Superior (PCS) y Poder Calorífico Inferior (PCI) Las diferencias se deben al contenido en agua de la madera. Conceptualmente, el PCS es la energía desprendida en la combustión de 1 Kg de combustible cuando el agua evaporada se recoge condensada. En el PCI el agua de la combustión se escapa, en forma de vapor, al medio ambiente (Marcos y Villegas, 1997). También pueden denominarse Poder Calorífico Bruto y Poder Calorífico Neto. Así, el PCS será el resultado de la suma del valor de PCI más el calor desprendido en la condensación del agua.

Desde el punto de vista energético es indispensable conocer la humedad de la madera, puesto que es, junto a la especie la propiedad que más incide en el poder calorífico (Latorre y Ruano, 2009).

Por lo tanto, en primer lugar se debe calcular el porcentaje de humedad de cada clon, ya que se ha utilizado la biomasa en campo (con humedad). Para ello se empleará la siguiente fórmula:

$$Humedad_{base húmeda} = 100 \cdot \left(\frac{Peso_{húmedo} - Peso_{seco}}{Peso_{húmedo}} \right)$$

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO), 2004

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Clon	%humedad fracción fina	%humedad fracción intermedia	%humedad fracción gruesa	%humedad medio
AF2	69,66	63,75	59,81	64,40
I214	71,83	55,16	65,10	63,89
Raspalje	69,76	65,34	57,97	64,36
Olof	65,40	58,10	55,61	59,94
Tordis	67,48	55,29	50,51	58,67
S.Atrocinerea	68,43	63,86	58,24	65,36

Tabla 4.14. Porcentaje de humedad en la madera de los diferentes clones

El poder calorífico neto en húmedo de una biomasa que contiene un porcentaje de agua conocido puede calcularse a partir del poder calorífico neto de la biomasa seca, utilizando la siguiente fórmula:

$$H_{u(w)} = \left[\frac{H_{u(wf)} \cdot (100 - w) - 2,44 \cdot w}{100} \right]$$

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO), 2004

$H_{u(w)}$: poder calorífico neto en húmedo(MJ/kg)

$H_{u(wf)}$: poder calorífico neto de la biomasa totalmente seca (MJ/kg)

w: humedad total (en %)

constante 2,44: corresponde a la energía de evaporación del agua

El poder calorífico neto de la biomasa totalmente seca de los sauces en corta rotación es 18,4 MJ/kg, mientras que la biomasa de los chopos con tratamiento a corta rotación posee un poder calorífico neto de 18,5 MJ/kg (Smith, Kaltschmitt y Thrän, 2001). El poder calorífico neto en húmedo de la biomasa en condiciones de humedad conocida se conoce al aplicar la fórmula y ésta proporciona los siguientes resultados:

Clon	Poder calorífico neto en húmedo (MJ/kg)
AF2	5,01
I214	5,12
Raspalje	5,02
Olof	5,91
Tordis	6,17
<i>S.Atrocínerea</i>	4,78

Tabla 4.15. Poder calorífico neto en húmedo (MJ/kg) de los diferentes clones

El poder calorífico neto del clon Olof es de los más elevados, concretamente en segunda posición, lo que resulta muy interesante desde el punto de vista energético, puesto que al ser el clon más productivo y tener un poder calorífico neto en húmedo cuantioso se obtendrá una cantidad de energía procedente de biomasa mayor que con el resto de clones.

Si se analiza la relación entre humedad y poder calorífico se obtienen los siguientes resultados:

Clon	%humedad medio	Poder calorífico neto en húmedo (MJ/kg)
AF2	64,40	5,01
I214	63,89	5,12
Raspalje	64,36	5,02
Olof	59,94	5,91
Tordis	58,67	6,17
S.Atrocinerea	65,36	4,78

Tabla 4.16. Relación entre el porcentaje de humedad y el poder calorífico

Estos datos se representan en el siguiente gráfico, donde se puede apreciar que existe una relación lineal, con un valor de R^2 muy próximo a uno, lo que indica que tiene un muy buen ajuste. Esta relación muestra un claro descenso del poder calorífico a medida que aumenta la humedad de la madera. Esto concuerda con lo expresado por Smith, Kaltschmitt y Thrän en 2001, que afirman: “La madera recién recolectada se caracteriza por una humedad aproximada del 50% o más, por lo que el poder calorífico neto es bajo”.

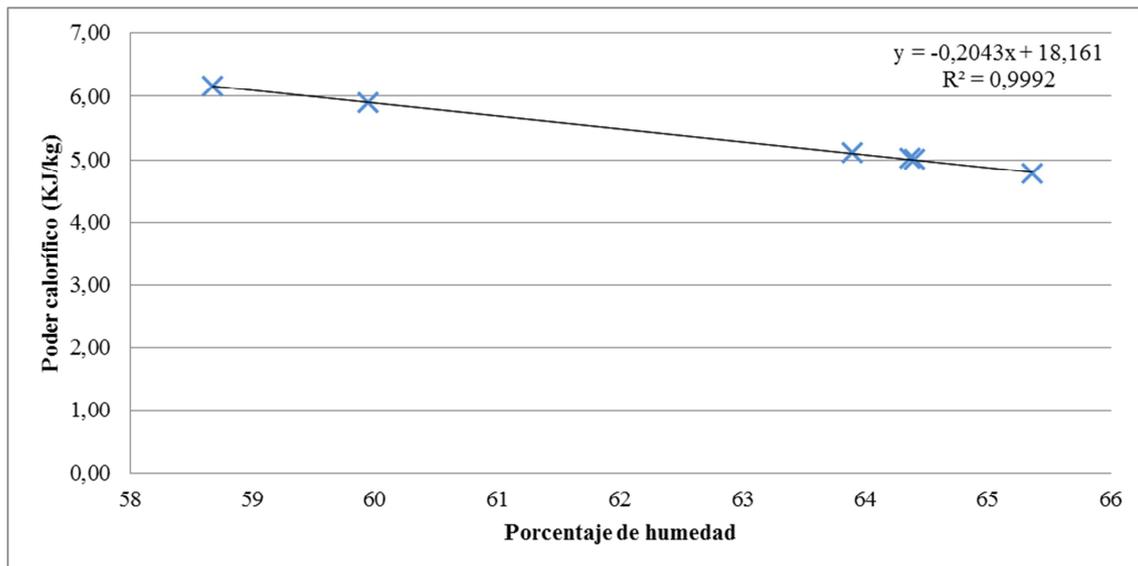


Tabla 4.17. poder calorífico neto en húmedo de la madera en función del porcentaje de humedad

Para calcular el poder calorífico de la plantación en el momento actual, se multiplicará la biomasa total en campo de cada clon por su correspondiente poder calorífico en MJ/kg y a continuación, se realizará una suma de todos los resultados obtenidos. Los resultados son los siguientes:

Clon	Biomasa total en campo (kg)	Poder calorífico neto en húmedo (MJ/kg)	Poder calorífico total de la plantación en húmedo(MJ)
AF2	2819,25	5,01	14124,44
I214	1034,86	5,12	5298,48
Raspalje	2628,94	5,02	13197,28
Olof	2884,13	5,91	17045,21
Tordis	1790,83	6,17	11049,42
S.Atrocinerea	579,52	4,78	2770,11
		Poder calorífico total en húmedo	63484,94

Tabla 4.18. Poder calorífico total en húmedo por clon

Como era de esperar puesto que es el clon más productivo y tiene un poder calorífico neto elevado, el mayor poder calorífico total se obtiene del clon Olof. Esto concuerda con el análisis llevado a cabo en otra de las zonas de estudio, concretamente Mozquita, dónde el clon Olof es descrito como el clon con una mayor productividad, con diferencias altamente significativas respecto a los demás clones (Fernández y Viguera, 2011).

El poder calorífico de la plantación en el momento actual se representará en el mapa final, incluido en el Anexo I.

4.6. Poder calorífico en la plantación con tres hectáreas de clon Olof

Para determinar el poder calorífico que se obtendría en la plantación si se utilizara el clon más productivo en la totalidad de la zona de estudio (3 hectáreas) se trata de encontrar una ecuación de regresión que permita relacionar la cantidad total de biomasa producida con las variables de suelo y fisiográficas para posteriormente multiplicar el valor obtenido por el poder calorífico neto calculado en el apartado anterior.

Mediante SPSS se realiza una **regresión lineal por pasos sucesivos**; el resultado obtenido se muestra en la siguiente tabla:

Advertencia

No se han introducido variables en la ecuación

Tabla 4.19. Resultado obtenido en la regresión lineal por pasos sucesivos

Esto significa que no existe una ecuación que relacione la biomasa producida con las variables inventariadas, por lo que será necesario hacer un cálculo de la biomasa media por parcela y adaptarla al caso de que se plantaran 3 hectáreas completas.

Para el cálculo de la biomasa media se utilizarán las parcelas correspondientes al nivel de fertilización F1, ya que aunque la producción obtenida con fertilización F2 es ligeramente superior, no compensa el sobrecoste derivado de este tipo de tratamiento. Los datos utilizados para este cálculo se pueden observar en la siguiente tabla:

Clon	Parcelas con nivel de fertilización F1	Biomasa total en campo (kg)
Olof	1SoF1	488,95
	2SoF1	254,89
	3SoF1	115,45
	Biomasa media parcelas F1	237,09

Tabla 4.20. Poder calorífico de las parcelas con nivel de fertilización F1 del clon Olof

El dato obtenido hace referencia a los kilogramos de biomasa en campo que proporcionaría una única parcela con Olof a nivel de fertilización F1. La densidad de plantación aplicada en los estudios realizados es de 10.000 pies por hectárea, lo que supone que una parcela de 400 m², como es el caso, contendrá un total de 400 pies. Dado que se pretende estudiar el poder calorífico total en húmedo implantando Olof en

las 3 hectáreas de terreno, se contará con un total de 30.000 pies que producirán un total de 17781,75 kg de biomasa en campo.

Por tanto, teniendo en cuenta el poder calorífico neto en húmedo calculado anteriormente para el clon Olof (5,91 MJ/kg) y la biomasa producida en campo, se podrá calcular el poder calorífico neto en húmedo que proporcionará el clon Olof instalado en tres hectáreas. El resumen de estos datos se puede observar en la siguiente tabla:

Pies implantados	Biomasa producida en campo (kg)	Poder calorífico neto en húmedo (MJ/kg)	Poder calorífico total en húmedo (MJ)
400 pies	237,09	5,91	1401,20
30000 pies	17781,75	5,91	105090,14

Tabla 4.21. Poder calorífico con 3 hectáreas de clon Olof

Si se comparara el poder calorífico total en húmedo que se obtendría utilizando Olof en las tres hectáreas de la zona de estudio con el proporcionado por la plantación en las condiciones actuales, como se hace en la tabla que sigue, se puede observar un incremento del 60% favorable a la hipotética situación de tres hectáreas con Olof.

Estado de la zona de estudio	Poder calorífico total en húmedo (MJ)
Actualmente (6 clones distintos)	63484,94
3 hectáreas con clon Olof	105090,14

Tabla 4.22. Comparación entre la producción actual y la posible con tres hectáreas de Olof

Este nuevo dato reafirma lo comentado anteriormente; el clon Olof es el más productivo en biomasa y a la vez en poder calorífico en húmedo por lo que sería interesante realizar un ensayo destinado únicamente a su estudio.

Por otra parte y partiendo de la hipotética masa total que se obtendría en campo y de la humedad media de las parcelas con nivel de fertilización F1, se puede obtener el peso seco de la biomasa, aplicando la siguiente fórmula:

$$Biomasa\ seca\ (kg) = \frac{Biomasa\ en\ campo\ (kg) \cdot (100 - \text{porcentaje medio de humedad})}{100}$$

Así, tal y como se expresa en la siguiente tabla, el peso seco de la biomasa total obtenida será:

Clon	Biomasa total en campo (kg)	% medio de humedad	Peso seco de la biomasa (kg)
Olof	17781,75	48,23	9205,61

Tabla 4.23. Peso seco de la biomasa total obtenida en campo

Este peso seco junto con el poder calorífico superior calculado en el siguiente paso determinará el poder calorífico final en seco que tendrá la plantación.

Para determinar el Poder Calorífico Superior (PCS) ha de tenerse en cuenta que todas las formas de biomasa consisten en una parte orgánica, que se quema en la combustión y una inorgánica, que influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido posterior a la combustión (Web “Unión Calor. Energía sostenible”).

Así, para evaluar el PCS, se utiliza la fórmula de Dulong-Petit citada por Kollmann en 1959 que implica dicha tanto a la parte orgánica como a la inorgánica:

$$PCS = 8100 \cdot C + 34000 \cdot \left(\frac{H - O}{8} \right) + 2500 \cdot S$$

Donde: C, H, O y S son los contenidos de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre respectivamente, referidos al peso seco y expresados en tanto por uno.

En el caso del género *Salix* el contenido de estos elementos en tanto por uno en la madera seca es el siguiente:

Elemento	C	H	O	S
Concentración (%/1)	0,4766	0,052	0,447	0,0003

Fuente: RWEDP, FAO 2002

Tabla 4.24. Concentración de elementos en la madera en %/1

El resultado aportado por esta fórmula indica que el poder calorífico del clon Olof se encuentra en torno a 16,18 MJ/kg, dato semejante a los 18,4 MJ/kg indicados por Smith, Kaltschmitt y Thrän en 2001; si bien existe una pequeña diferencia debida a que Smith, Kaltschmitt y Thrän determinan el poder calorífico para sauces en tratamiento de corta rotación y la fórmula de Dulong-Petit se refiere a sauces en turno de corta de 10 años. Esta ligera disminución del poder calorífico se debe a la diferencia de edad existente entre los momentos de corta puesto que el poder calorífico referido a la energía

disponible en la biomasa varía influenciado por la densidad de la madera y por la edad (López, 2006).

El dato obtenido y el estimado por Smith, Kaltschmitt y Thrän en 2001, aunque lejos de los 42,27 MJ/kg producidos por el gasóleo y de los 43,95 MJ/kg de la gasolina se encuentra próximo a los 21,3 MJ/kg que produce la turba (Mulero y Cachadiña, 2007), lo que verifica que este tipo de energía aún en un estado incipiente puede producir tanto como un tipo de carbón haciendo mucho menos daño al medio ambiente.

En este caso, para determinar el poder calorífico total que tendría la biomasa seca en el caso de proceder de 3 hectáreas de Olof se utilizará el dato aportado por Smith, Kaltschmitt y Thrän, es decir, 18,4 MJ/kg, ya que es el referido a los sauces en tratamiento de corta rotación, procedimiento aplicado en los ensayos analizados.

Así, el poder calorífico aportado por la totalidad de la biomasa seca será:

Clon	Superficie	Biomasa seca total (kg)	Poder calorífico (MJ/kg)	Poder calorífico total (MJ)
Olof	3 hectáreas	9205,61	18,4	169383,224

Tabla 4.25. Poder calorífico total de la biomasa seca de 3 hectáreas de Olof

El poder calorífico total producido por 3 hectáreas de *Salix viminalis* x (*S. schwerinii* x *S. viminalis*), más conocido como Olof, con un nivel de fertilización F1 rondará los **170000 MJ**.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden extraer de este trabajo son las siguientes:

- No se puede evaluar de forma efectiva la influencia de la fertilización en el desarrollo y crecimiento de los árboles debido a un problema en la aplicación del herbicida, que supuso un incremento de la competencia de la maleza con las estaquillas.
- No existe correlación entre la fertilización y la producción por el fallo anteriormente mencionado.
- Aunque existe correlación entre el volumen y la biomasa, el clon más productivo en biomasa no es el más productivo en volumen, como consecuencia del distinto método de cálculo de las dos variables productivas.
- El clon más productivo en biomasa húmeda (en campo) es *Salix viminalis* x (*S. schwerinii* x *S. viminalis*, denominado Olof).
- La biomasa producida por el clon Olof no tiene correlación con los factores fisiográficos.
- La biomasa producida por el clon Olof se correlaciona de forma negativa con la correlación CN en el suelo, puesto que a menor valor de la relación CN más cantidad de Nitrógeno inorgánico aprovechable existe en el suelo y por tanto la producción es mayor.
- La producción de Olof se relaciona de forma positiva con la cantidad de arcilla en el suelo, ya que éstas favorecen la producción al retener el agua en el suelo y mantenerla disponible para los sauces, grandes exigentes en este aspecto.
- Olof produce más cantidad de biomasa cuanto menor es la profundidad efectiva, ya que las arcillas (predominantes en el suelo de la plantación) tienen una permeabilidad más lenta que otros suelos, por lo que a mayor profundidad menos agua disponible y peores condiciones para el crecimiento del Olof.
- Se demuestra que el poder calorífico disminuye a medida que aumenta la humedad de la madera.

- El poder calorífico en húmedo de la producción de biomasa actual del área de estudio se cifra en torno a 63500 MJ.
- No existe una ecuación de regresión que relacione la biomasa producida por el clon Olof con las diversas variables estudiadas.
- La hipotética situación de una plantación de Olof ocupando las 3 hectáreas del área de estudio, produciría un poder calorífico total en húmedo de aproximadamente 105100 MJ, lo que supone un incremento del 60% respecto a la situación actual.
- El poder calorífico por kilogramo de la biomasa seca de la plantación con 3 hectáreas de Olof obtenido con la fórmula de Dulong-Petit, para sauces en turno de corta de 10 años, se evalúa en 16,18 MJ/kg, mientras que la estimada por Smith, Kaltschmitt y Thrän, para sauces en tratamiento de rotación corta (turno de corta de 3 años) se cifra en 18,4 MJ/kg.
- Se deduce que el poder calorífico disminuye a medida que aumenta la edad del árbol.
- El dato del poder calorífico obtenido y citado por Smith, Kaltschmitt y Thrän se encuentra muy cercano al estimado para cada kilogramo de turba.
- Será interesante de cara a un nuevo estudio evaluar el resultado de la hipotética plantación de 3 hectáreas de Olof, pues la energía generada por la biomasa seca producida por este clon rondaría los 170000 MJ.

6. BIBLIOGRAFÍA

- BALBOA MURIAS, M. A.; ÁLVAREZ GONZALEZ, J. G.; MERINO GARCÍA, A.; BARRIO ANTA, M. 2004. **Revisión y discusión metodológica para la determinación de la biomasa forestal**. Sociedad Española de Ciencias Forestales (S.E.F.T.). Cuaderno 18: 35-39.
- BÁSCONES MERINO, E. 2004. **Análisis de suelo y consejos de abonado**. **Escuela Universitaria de Ingeniería Agrícola**. Excelentísima Diputación Provincial de Valladolid
- BUHLER, D.; NETER, D.; RIEMENSCHNEIDER, E.; HARTLER, R. 1998. *Weed biofuel production management in short rotation poplar and herbaceous perennial crops grown for*. Biomass and Bioenergy 14 (4) 385-394
- CÁMARA OBREGÓN, A. 2008. **Cultivos forestales energéticos: ¿Una apuesta de futuro?** Revista Foresna. Revista de la asociación forestal de Navarra. Nº 19, Abril 2008.
- CERRILLO, T. 2011. **Sauces en el Delta**. Capítulo III, 7. Subprograma sauces en el Delta. Mejoramiento Genético del Sauce - EEA Delta del Paraná. Argentina.
- CREUS SOLÉ, A. 2004. **Energías renovables**. CEYSA. Barcelona, España.
- DIÉGUEZ-ARANDA, U.; CASTEDO DORADO, F.; ÁLVAREZ GÓNZALEZ, J.G.; ROJO, A. 2005. **Sistema de funciones de volumen compatibles para plantaciones de *Pinus sylvestris* L. en Galicia**. Sociedad Española de Ciencias Forestales (S.E.C.F). Tomo 4CFE05-373-T1, página 324.
- DOPAZO AMOEDO, R.; VEGA-NIEVA, D.J.; ORTIZ TORRES, L.; MARTÍNEZ CHAMORRO, E. 2009. **El aprovechamiento de biomasa residual y de cultivos energéticos: experiencias recientes y modelos de producción de biomasa forestal en montes gallegos**. 5º Congreso Forestal Español. Ávila 21-25 Septiembre.
- FACCIOTTO, G.; BERGANTE, S.; GRAS, M.; LIDIA, C.; MUGHINI, G.; MEZZALIRA, G.; NERVO, G. 2006. *Biomass production for energy purposes in Italy, Proceedings of the Great Wall Renewable Energy Forum*, Vol. 1, 5 pp.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. **Regional Wood Energy Development Programme in Asia (RWEDP)**. *Wood Energy Database*. Kuala Lumpur, Malasia.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2004. **Terminología unificada sobre la bioenergía TUB. Terminología de los combustibles sólidos**. Departamento Forestal de la FAO. Dendroenergía.
- FERNÁNDEZ, J., 2007. **Cultivos energéticos y cultivos alimentarios: Dos actividades agrícolas**. Seminario sobre cultivos energéticos, biomasa y biocombustibles, 6 y 7 de diciembre de 2007.
- FERNÁNDEZ, M.J.; VIGUERA, B. 2011. **Estudio comparativo de la producción en una plantación energética de tres clones de sauce en terrenos de escombrera minera**. V Jornadas de Jóvenes Investigadores en Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales. CENEAM. Valsaín, 3 y 4 de febrero de 2011
- FERREIRA LOSA, N. 2011. **Relación factores de suelo – crecimiento de cultivo energéticos (Salix sp., Populus sp. y Betula sp.) en una antigua escombrera restaurada en Mieres, Asturias**. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural. Proyecto de Investigación Aplicada. Universidad de Oviedo.
- FUENTES YAGÜE, J. L. 1999. **El suelo y los fertilizantes**. Ed. Mundi-Prensa (5ª edición)
- GARCÍA MARTÍN, A.; PÉREZ CABELLO, F.; DE LA RIVA FERNÁNDEZ, J.; PASCUAL PUIGDEVALL, J.; ALONSO HERRANZ, E. 2002. **Estimación de la biomasa residual forestal mediante técnicas de Teledetección y SIG en masas puras de Pinus halepensis y Pinus sylvestris**. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- GARCÍA-SERRANO JIMÉNEZ, P.; LUCENA MAROTTA, J.J.; NOGALES GARCÍA, M.; RUANO CRIADO, S. 2010. **Guía práctica para la fertilización racional de los cultivos en España**. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- GODINO GARCÍA, M., 2005. **Análisis de los cultivos de Populus × euroamericana Dode, clon I-214, a turnos muy cortos con fines energéticos**. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

- HERNÁNDEZ GARASA, M.J.; MONTES PITA, F.; VISCASILLAS GÓMEZ, A.; SIXTO BLANCO, H.; CAÑELLAS REY DE VIÑAS, I. 2005. **Evolución del índice de área foliar en plantaciones de chopo con fines energéticos. Comparación entre métodos semidirectos e indirectos de estimación.** 5º Congreso Forestal Español. Ávila 21-25 Septiembre.
- HERNÁNDEZ INGELMO, M. 2006. **Cultivos energéticos.** Cuadernos didácticos.
- HIDALGO, L. 1993. **Tratado de viticultura general.** Mundi-Prensa Libros.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía). 2010. Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER), 2011-2020.
- ITABIA, 2006. **Poplar SRF production guide.** Italian Biomass Association. Grafica Snc, Roma. 22 pp.
- IZCO CABEÓN, F. 2003. **Manual de mediciones forestales.** Capítulo: Cubicación de árboles derribados y en pie: 37-44. Asociación Forestal de Navarra (FORESNA). Gobierno de Navarra.
- KAUTER, D.; LEWANDOWSKI, I.; CLAUPEIN, W. 2003. **Quantity and quality of harvestable biomass from Populus short rotation coppice for solid fuel use – a review of the physiological basis and management influences.** Biomass and Bioenergy 24 (6): 411-427.
- KOLLMANN, F. 1959. **Tecnología de la madera y sus aplicaciones.** Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones y experiencias de la madera. Madrid.
- LATORRE MONTEAGUDO, B.; RUANO MARTÍNEZ, J.R. 2009. **Caracterización energética de la biomasa de Paulownia sp. procedente de plántulas cultivadas de una savia.** Montes, revista de ámbito forestal. N°98, III trimestre. 77-83.
- LÓPEZ, M.D. 2006. **Determinación de la capacidad energética de la comunidad serial de Salix alba L. en el sur de Moravia – Europa Central.** Actas Jornadas de Salicáceas. Buenos Aires, Argentina.
- MACIAS, F.; GIL BUENO, A.; MONTERROSO, C. 2009. **Fijación de carbono en biomasa y suelos de mina revegetados con cultivos energéticos.** 5º Congreso Forestal Español. Ávila 21-25 Septiembre.
- MARCOS, F.; VILLEGAS, S. 1997. **Nueva fórmula para la determinación del poder calorífico en función de la humedad.** Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.

- MEAD, D.J. 2005. *Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic.* Biomass and Bioenergy 28: 249-266.
- MERINO, A.; BALBOA, M.A.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G. 2005. *Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe.* Forest Ecology and Management 207: 325-339.
- MITCHELL, C.P.; STEVENS, E.A.; WATTERS, M.P. 1999. *Short-rotation forestry operations, productivity and cost based on experience gained in the UK.* Forest Ecology and Management, 121: 123-136.
- MULERO, A; CACHADINA, I. 2007. **Termodinámica y termotecnia.** Tema 3: Combustibles y energías renovables. Escuela de Ingenierías Agrarias de Extremadura. Badajoz.
- REINOSO, C.; CUEVAS, A. 1993. **Aprovechamiento de biomasa forestal en Galicia con fines energéticos.** Unión Fenosa. Investigación y Nuevas Tecnologías. Congreso Forestal Español. Lourizán.
- RUCKS, L.; GARCÍA, L.; KAPLÁN, A.; PONCE DE LEÓN, J.; HILL, M. 2004. **Propiedades físicas del suelo.** Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.
- SAN MIGUEL, A.; MONTOYA, J.M. 1984. **Resultados de los 5 años de producción de tallares de chopo en rotación corta (2-5 años).** Anales INIA, Serie Forestal 8, 73-91.
- SATOO, T.; MADGWICK, H.A.I. 1982. *Forest Biomass.* Forestry Sciences, Kluwer Academic Publishers Group. Dordrecht.
- SERRADA HIERRO, R. 1998. **Avance apuntes de selvicultura, Tomo I.** Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.
- SING, R.N. 2002. **Restauración de escombreras mediante técnicas innovadoras.** Nagpur, India.
- SIXTO, H.; HERNÁNDEZ, M.J.; BARRIO, M.; CARRASCO, J.; CAÑELLAS, I. 2007. **Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión.** Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 2007 16(3), 277-294.

- SIXTO, H.; RUEDA, J.; GARCÍA-CABALLERO, J.L.; MONTOTO, J.L. 2009. **Evaluación de genotipos para la producción de biomasa con fines energéticos en la Comunidad de Castilla y León.** 5º Congreso Forestal Español. Ávila 21-25 Septiembre.
- SMITH, K.R.; KALTSCHMITT, M.; THRÄN, D. 2001. *Energy from Biomass.* Contribución a la “*Encyclopedia of Physical Science and Technology*”. Academic Press, San Diego (California, Estados Unidos).
- TOMEIO PERUCHA, V., UÑA JUÁREZ, I. 2003. **Lecciones de Estadística descriptiva. Curso teórico-práctico.** ITES-Paraninfo. Madrid
- VEGA-NIEVA, D. J.; DOPAZO, R.; ORTIZ, L. 2008. **Cultivos Energéticos Leñosos: una necesidad para el sector de la biomasa.** +Q Energía 7: 26-29.

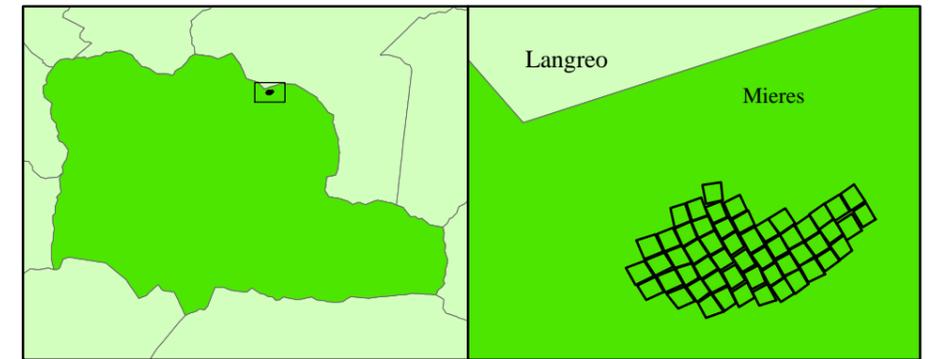
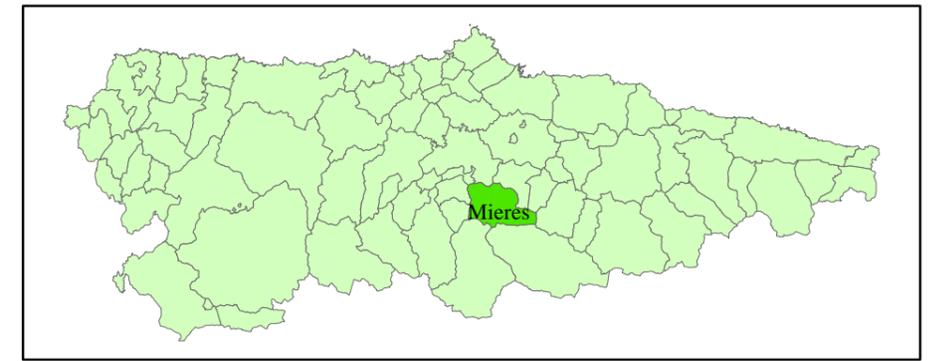
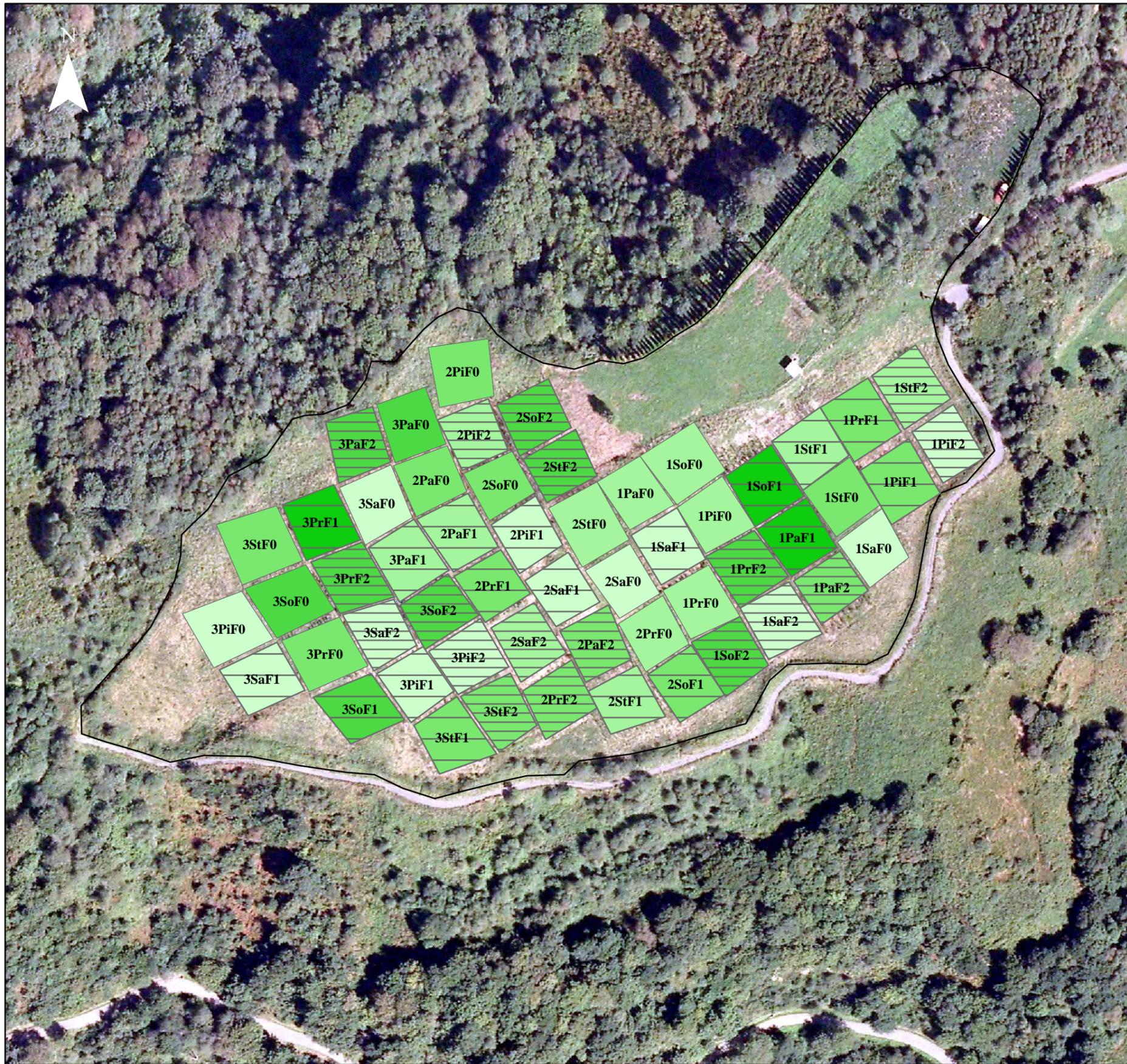
Páginas web consultadas:

- Agrobränsle Willow Varieties, May 2006. www.agrobransle.se [Consulta: 9 de Julio de 2013].
- Biblioteca ICMAB, Institut de Ciència de Materials de Barcelona. <http://departments.icmab.es/sdib/> [Consulta: 30 de Junio de 2013].
- Congreso Forestal Español. <http://www.congresoforestal.es/> [Consulta: 6 de Julio de 2013].
- Google Académico. <http://scholar.google.es/> [Consulta: 27 de Julio de 2013].
- Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales. <http://www.forestales.net/> [Consulta: 9 de Julio de 2013].
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO). <http://www.fao.org/home/es/> [Consulta: 29 de Junio de 2013].
- Q-Sensei. <http://www.qsensei.com/> [Consulta: 2 de Julio de 2013].
- Salix Energy. <http://www.salix-energy.com/en/> [Consulta: 20 de Junio de 2013].
- Scirus, “For scientific information only. <http://www.scirus.com/> [Consulta: 7 de Julio de 2013].
- Scopus Database. <http://www.scopus.com/home.url> [Consulta: 5 de Julio de 2013].
- Sociedad Española de Ciencias Forestales (S.E.C.F). <http://www.secforestales.org/> [Consulta: 2 de Julio de 2013].

Unión Calor. Energía sostenible. <http://www.unioncalor.com/> [Consulta: 12 de Julio de 2013].

Web Of Knowledge. <http://apps.webofknowledge.com> [Consulta: 1 de Julio de 2013].

ANEXO I: Mapa final



Nivel de fertilización

F0 F1 F2

Poder calorífico (MJ)

200,05 - 585,64
 585,65 - 1342,77
 1342,78 - 2130,06
 2130,07 - 3014,97
 3014,98 - 4681,01
 Área de estudio

Clones utilizados

Pa: *Populus x canadensis* (AF2)
Pi: *Populus x euramericana* (I-214)
Pr: *Populus deltoides x trichocarpa* (Raspalje)
Sa: *Salix atrocinerea*
So: *S.viminalis x (S.schwerinni x S.viminalis)* (Olof)
St: *Salix schwerinnii x Salix viminalis* (Tordis)

Fecha: 14/07/2013	Título del proyecto: "Análisis de la potencialidad productiva en plantaciones energéticas mediante Sistemas de Información Geográfica (Estudio en Cantil II, Mieres)"	 Máster Universitario en Teledetección y SIG  CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL		
Autora: M ^a Nieves Casal Fernández	Sistema de Coordenadas: ETRS 89 UTM Zona 30N	Escala: 1:1500	Número de plano: 1 de 1	Título del plano: "Poder calorífico (MJ) proporcionado por la plantación en el momento actual"