UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
AGRÓNOMOS**

**EVALUACIÓN DE *Ulmus pumila* L. Y *Populus* spp.
COMO CULTIVOS ENERGÉTICOS EN CORTA
ROTACIÓN**

TESIS DOCTORAL

IGNACIO PÉREZ GARCÍA

Ingeniero de Montes

2016

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN AGRARIA
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
AGRÓNOMOS**

**EVALUACIÓN DE *Ulmus pumila* L. Y *Populus* spp.
COMO CULTIVOS ENERGÉTICOS EN CORTA
ROTACIÓN**

TESIS DOCTORAL

IGNACIO PÉREZ GARCÍA

Ingeniero de Montes

DIRECTORA DE TESIS:

M^a PILAR CIRIA CIRIA

Dra. Ingeniera Agrónoma

AGRADECIMIENTOS

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido de una u otra manera a la realización de este trabajo:

En primer lugar a mi directora de tesis, Pilar, por su esfuerzo y dedicación, por haber estado siempre dispuesta a ayudarme, independientemente del día de la semana o la hora que fuese y por sus palabras de ánimo en aquellos momentos en que pensaba que no conseguiría terminarla.

A Javi que durante cuatro años ha sido, además de mi hermano, mi compañero del grupo de cultivos energéticos, porque con su trabajo, su cariño y su comprensión ha hecho que todo fuese mucho más fácil.

A Miguel Latorre y a Juan Carrasco del CEDER-CIEMAT, por haber puesto a mi disposición todos los medios necesarios y a la gente de la unidad biomasa, por sus consejos y por toda la ayuda prestada durante estos años.

A Jesús Fernández y a M^a Dolores Curt de la Escuela de Ingenieros Agrónomos de Madrid por su apoyo en el inicio de las plantaciones de olmo y por haber estado siempre ahí para cualquier consulta.

A Anselmo de SORIACTIVA por haber permitido que trabajase con la parcela de olmos que gestionaban ellos en Almazán.

A Gianni Facciotto y sus compañeros de la Unidad de Biomasa del centro de investigación de Casale Monferrato, por todo lo que me enseñaron y lo bien que me trataron durante mi estancia allí.

A todas las personas que hicieron prácticas en el grupo de cultivos durante los cuatro años que estuve en el CEDER, sobre todo a Jesús, Tamara y Blanca, que son los que más tiempo pasaron con nosotros, por su esfuerzo y su paciencia en la toma de datos de campo, incluso cuando las condiciones meteorológicas invitaban a volver al despacho.

Y finalmente a mi familia, a mis amigos y a esa persona tan especial con la que tengo la suerte de compartir mi vida, por haber estado, como siempre, apoyándome y por hacer que todo merezca la pena.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ABREVIATURAS.....	XV
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT.....	XIX

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Objetivos e interés del tema.....	3
1.2. La biomasa como recurso energético.....	4
1.2.1. Definición y tipos	4
1.2.2. Ventajas del uso de la biomasa y los cultivos energéticos	6
1.2.3. Los cultivos energéticos y la producción de alimentos.....	8
1.2.4. Situación de la biomasa en el mundo	9
1.2.5. Situación de la biomasa en España	11
1.2.5.1. Problemática del sector	13
1.3. Características de las plantaciones de cultivos energéticos lignocelulósicos leñosos	14
1.3.1. Densidad de plantación	15
1.3.2. Diseño de la plantación	17
1.3.3. Turno de corta	17
1.3.4. Duración de la plantación.....	18
1.3.5. Número de rebrotes	19
1.4. Principales especies leñosas empleadas en bioenergía	20
1.4.1. El chopo (<i>Populus</i> spp.)	21
1.4.2. El olmo de Siberia (<i>Ulmus pumila</i> L.)	23
1.5. Tratamientos culturales en las parcelas de cultivos energéticos leñosos en corta rotación.	25
1.5.1. Preparación del terreno.....	25
1.5.1.1. Abonado de fondo.....	25
1.5.1.2. Subsulado.....	25

1.5.1.3.	Labores de alzado	26
1.5.1.4.	Gradeo.....	26
1.5.1.5.	Control de malas hierbas.....	26
1.5.2.	Plantación	26
1.5.2.1.	Material vegetal	26
1.5.2.2.	Método de plantación.....	27
1.5.3.	Trabajos de mantenimiento	28
1.5.3.1.	Reposición de marras.....	28
1.5.3.2.	Control de malas hierbas.....	28
1.5.3.3.	Abonado.....	29
1.5.3.4.	Riego	30
1.6.	Las necesidades hídricas de los cultivos energéticos leñosos.....	31
1.6.1.	Estudios llevados a cabo anteriormente	32
1.6.2.	La evapotranspiración potencial.....	33
1.6.3.	La eficiencia en el uso del agua (EUA).....	34
1.6.4.	Potencial hídrico foliar (Ψ_f) y xilemático (Ψ_{xm}).....	35
1.6.4.1.	La selección de las muestras	36
1.6.4.2.	Errores en la medición	37
1.6.4.3.	Otros estudios sobre el estrés hídrico	38
1.7.	La Producción de Biomasa Foliar.....	39
1.7.1.	El índice de área foliar (LAI)	40
2.	MATERIAL Y MÉTODOS	43
2.1.	Cultivo de chopo	45
2.1.1.	Localización	45
2.1.2.	Características climáticas	45
2.1.2.1.	Registros meteorológicos en el CEDER.....	45
2.1.3.	Características edáficas	50
2.1.4.	Diseño de la experiencia	51
2.1.5.	Implantación y manejo de las parcelas.....	51
2.1.5.1.	Preparación del suelo y plantación	51
2.1.5.2.	Abonado.....	52
2.1.5.3.	Control de malas hierbas.....	53
2.1.5.4.	Plagas y enfermedades.....	53
2.1.5.5.	Aporte hídrico	55
2.1.5.5.1	Mediciones con TDR.....	57
2.1.6.	Observaciones, mediciones y determinaciones experimentales.....	59

2.1.6.1.	Brotación.....	59
2.1.6.2.	Mortalidad.....	59
2.1.6.3.	Número de brotes.....	60
2.1.6.4.	Crecimiento y producción de biomasa seca.....	60
2.1.6.5.	Eficiencia en el uso de agua (EUA).....	60
2.1.6.6.	Producción de biomasa foliar	60
2.1.6.6.1	Índice de área foliar (LAI).....	61
2.1.6.7.	Estrés hídrico	62
2.2.	Cultivo de olmo de Siberia.....	65
2.2.1.	Localización	65
2.2.2.	Características climáticas	65
2.2.2.1.	Registros meteorológicos en el CEDER.....	65
2.2.2.2.	Registros meteorológicos en Almazán	66
2.2.3.	Características edáficas	69
2.2.4.	Diseño de la experiencia	70
2.2.5.	Implantación y manejo de las parcelas.....	71
2.2.5.1.	Preparación del suelo y plantación	71
2.2.5.2.	Abonado.....	73
2.2.5.3.	Control de malas hierbas.....	74
2.2.5.4.	Plagas y enfermedades.....	74
2.2.5.5.	Aporte hídrico	74
2.2.6.	Observaciones, mediciones y determinaciones experimentales.....	76
2.2.6.1.	Brotación.....	76
2.2.6.2.	Mortalidad.....	76
2.2.6.3.	Número de brotes.....	76
2.2.6.4.	Crecimiento y producción de biomasa seca.....	76
2.2.6.5.	Eficiencia en el uso del agua (EUA).....	77
2.2.6.6.	Producción de biomasa foliar	78
2.2.6.6.1	Índice de área foliar (LAI).....	78
2.2.6.7.	Estrés hídrico	79
3.	RESULTADOS	81
3.1.	Cultivo de chopo	83
3.1.1.	Brotación	83
3.1.2.	Mortalidad	83
3.1.3.	Humedad edáfica.....	85
3.1.4.	Número de brotes	87
3.1.4.1.	Mortalidad brotes durante el segundo ciclo.....	89

3.1.5. Crecimiento y producciones	90
3.1.5.1. Alturas y Áreas basimétricas	90
3.1.5.1.1 Al final del primer ciclo de tres años	90
3.1.5.1.2 Al final del segundo ciclo de tres años	91
3.1.5.2. Humedad de la biomasa	97
3.1.5.3. Producción de biomasa seca	97
3.1.5.3.1 Al final del primer ciclo de tres años	97
3.1.5.3.2 Al final del segundo ciclo de tres años	98
3.1.6. Producción foliar	101
3.1.6.1. Índice de área foliar (LAI)	101
3.1.7. Estrés hídrico	102
3.2. Cultivo de olmo de Siberia	105
3.2.1. Brotación	105
3.2.2. Mortalidad	106
3.2.3. Número de brotes	106
3.2.4. Crecimiento y producciones	107
3.2.4.1. Alturas y Áreas basimétricas	107
3.2.4.1.1 Evolución a lo largo del ciclo	107
3.2.4.1.2 Final del tercer periodo vegetativo (R3T3)	109
3.2.4.1.3 Final del cuarto periodo vegetativo (R4T4)	111
3.2.4.1.4 Rebrote (R4T1)	113
3.2.4.2. Humedad de la biomasa	114
3.2.4.3. Producción de biomasa seca	115
3.2.5. Producción foliar	117
3.2.5.1. Índice de área foliar (LAI)	118
3.2.6. Estrés hídrico	119
 4. DISCUSIÓN	 123
 4.1. Cultivo de chopo	 125
4.1.1. Brotación	125
4.1.2. Mortalidad	126
4.1.3. Número de brotes	127
4.1.4. Crecimiento y producción	128
4.1.4.1. Alturas y áreas basimétricas	128
4.1.4.1.1 Al final del primer ciclo de tres años	128
4.1.4.1.2 Al final del segundo ciclo de tres años	129
4.1.4.2. Humedad de la biomasa	129

4.1.4.3.	Producción de biomasa seca	130
4.1.4.3.1	Al final del primer ciclo de tres años	130
4.1.4.3.2	Al final del segundo ciclo de tres años.....	131
4.1.5.	Eficiencia en el uso del agua (EUA)	133
4.1.6.	Producción foliar	135
4.1.6.1.	Índice de área foliar (LAI)	135
4.1.7.	Estrés hídrico.....	137
4.2.	Cultivo de olmo de Siberia.....	140
4.2.1.	Brotación	140
4.2.2.	Mortalidad	140
4.2.3.	Número de brotes	141
4.2.4.	Crecimiento y producción	142
4.2.4.1.	Alturas y áreas basimétricas	142
4.2.4.2.	Humedad de la biomasa.....	144
4.2.4.3.	Producción de biomasa seca	144
4.2.4.3.1	Modelos de regresión	144
4.2.4.3.2	Evolución de la producción a lo largo del ciclo	147
4.2.4.3.3	Comparación producción turno 4 años y 3+1 años	149
4.2.4.3.4	Comparación con otros estudios.....	151
4.2.5.	Eficiencia en el uso del agua (EUA)	151
4.2.6.	Producción foliar	153
4.2.6.1.	Índice de área foliar (LAI)	154
4.2.7.	Estrés hídrico.....	157
5.	CONCLUSIONES.....	159
6.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	163
7.	PUBLICACIONES FRUTO DE LA INVESTIGACIÓN	167
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2.1. Consumo de energía en el mundo según sus fuentes y consumo de bioenergía según su uso.....	10
Figura 1.2.2. Distribución de consumo de energía primaria en España en el año 2010	12
Figura 1.4.1. Morfología de las hojas de diferentes clones de chopo	22
Figura 1.4.2. Hojas (izquierda) y sámaras (derecha) del olmo de Siberia.....	24
Figura 1.5.1. Maquinaria para plantación de estaquillas de leñosas en alta densidad en el CEDER-CIEMA	28
Figura 2.1.1. Localización de las parcelas de ensayo de chopo	45
Figura 2.1.2. Diagramas Ombrotérmicos en el CEDER durante los 6 años de estudio (2008-2013).	47
Figura 2.1.3. Adulto de <i>Melasoma populi</i> alimentándose sobre una hoja de chopo.....	53
Figura 2.1.4. Parcela de chopo afectada por la roya (<i>Melampsora alli-populina</i>) a comienzos de agosto de 2011	54
Figura 2.1.5. Volumen de riego aportado en las parcelas de chopo en cada quincena (%) respecto al total. Considerados los dos ciclos de cultivo.....	57
Figura 2.1.6. Medidor TDR empleado en las parcelas experimentales para medir la humedad del suelo a diferentes profundidades. Sistema de sonda de tubo de acceso TRIME-T3 con el medidor portátil TRIME-FM3	58
Figura 2.1.7. Componentes del medidor SunScan (SS1). Sonda con 64 sensores PAR de 1 m de larga, Sensor de Insolación tipo BF3 y PDA para almacenar los datos.....	61
Figura 2.1.8. Cámara de Scholander empleada en el estudio.....	63
Figura 2.2.1. Localización de las dos parcelas de ensayo de olmo de Siberia. A la izquierda CEDER (T.M. de Cubo de la Solana) y a la derecha Almazán.	65
Figura 2.2.2. Diagramas Ombrotérmicos de los años 2010, 2011, 2012 y 2013 en Almazán.....	67
Figura 2.2.3. Temperatura media mensual (°C) y precipitación media mensual (mm) registrada durante los años 2010, 2011, 2012 y 2013 en el CEDER y Almazán	68
Figura 2.2.4. Espaciamiento de las plantaciones en las dos densidades estudiadas en las parcelas de olmo de Siberia del CEDER.	71
Figura 2.2.5. Ejemplar de olmo el día de su plantación en el CEDER y estado de la parcela en Almazán durante las primeras semanas de ensayo.....	72

Figura 2.2.6. Estado de las parcelas del CEDER a finales de febrero de 2010.....	73
Figura 2.2.7. Volumen de riego aportado en las parcelas de olmo en cada quincena (%) respecto al total. Considerados los cuatro años de estudio (2010-2013).....	75
Figura 3.1.1. Porcentaje de supervivencia de los distintos clones de chopo al finalizar el primer ciclo del cultivo (2010) y durante los tres años del segundo ciclo (2011, 2012 y 2013).....	84
Figura 3.1.2. Humedad edáfica (%) registrada en cinco de las subparcelas de chopo durante los 3 años de la segunda rotación (2011, 2012 y 2013).....	86
Figura 3.1.3. Número de brotes por planta en el conjunto de las subparcelas de chopo el primer año del segundo ciclo.....	87
Figura 3.1.4. Altura total media (m) de los diferentes clones de chopo al finalizar el primer ciclo de tres años.....	90
Figura 3.1.5. Área basimétrica (AB) media por planta (cm ²) en los diferentes clones de chopo al finalizar el primer ciclo de tres años.....	91
Figura 3.1.6. Altura total media (m) de cada clon en cada una de las 8 dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años.....	92
Figura 3.1.7. Altura total media (m) de cada clon en el conjunto de las dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años.....	92
Figura 3.1.8. Altura total media (m) por dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años (considerados los 4 clones en conjunto).....	93
Figura 3.1.9. Área basimétrica (AB) media por planta (cm ²) en cada una de las 8 dosis de riego en cada uno de los 4 clones al finalizar el segundo ciclo de tres años.....	95
Figura 3.1.10. Área basimétrica (AB) media por planta (cm ²) en los cuatro clones estudiados al finalizar el segundo ciclo de tres años.....	95
Figura 3.1.11. Área basimétrica (AB) media por planta (cm ²) en cada dosis de riego (considerados los 4 clones) al finalizar el segundo ciclo de tres años.....	96
Figura 3.1.12. Producción (kg MS ha ⁻¹ año ⁻¹) de los diferentes clones de chopo al finalizar el primer ciclo de tres años.....	98
Figura 3.1.13. Producción (kg MS ha ⁻¹ año ⁻¹) de los cuatro clones estudiados en cada una de las 8 dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años.....	99
Figura 3.1.14. Producción (kg MS ha ⁻¹ año ⁻¹) de los cuatro clones estudiados al finalizar el segundo ciclo de tres años (consideradas todas las dosis).....	100
Figura 3.1.15. Producción (kg MS ha ⁻¹ año ⁻¹) en cada dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años (considerados los cuatro clones).....	100

Figura 3.1.16. Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) durante el año 2012 (segundo periodo vegetativo del segundo ciclo) en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214	102
Figura 3.1.17. Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) durante el año 2013 (tercer periodo vegetativo del segundo ciclo) en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214.	102
Figura 3.1.18. Potencial hídrico foliar (Ψ_f) a media mañana en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214 durante el año 2012 (segundo año del segundo ciclo).	103
Figura 3.1.19. Potencial hídrico foliar (Ψ_f) a media mañana y a mediodía y potencial hídrico xilemático (Ψ_{xm}) a mediodía en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214 durante el año 2013 (tercer año del segundo ciclo).....	104
Figura 3.2.1. Fotografía de las parcelas de olmo de Siberia a comienzos del mes de mayo de 2013, donde se puede observar la brotación desigual que se produjo ese año.	105
Figuras 3.2.2. Altura total del olmo de Siberia (m) a lo largo del primer ciclo de cultivo en las diferentes condiciones de cultivo	108
Figuras 3.2.3. Área basimétrica (AB) total por planta (m) a lo largo del primer ciclo de cultivo en las diferentes condiciones de cultivo	109
Figuras 3.2.4. Altura total (m) al finalizar el tercer periodo vegetativo (R3T3)	110
Figuras 3.2.5. Área basimétrica (AB) por planta (cm^2) al finalizar el tercer periodo vegetativo (R3T3).....	111
Figuras 3.2.6. Altura total del olmo de Siberia (m) al finalizar el cuarto periodo vegetativo (R4T4).....	112
Figuras 3.2.7. AB total por planta del olmo de Siberia (m) al finalizar el cuarto periodo vegetativo (R4T4).....	113
Figura 3.2.8. Altura total del olmo de Siberia (m) el primer periodo vegetativo tras el rebrote (R4T1)	114
Figuras 3.2.9. Producción de biomasa seca en las parcelas de olmo de Siberia cortadas con turno de tres años (R3T3)	115
Figuras 3.2.10. Producción de biomasa seca en las parcelas de olmo de Siberia cortadas con turno de cuatro años (R4T4)	116
Figuras 3.2.11. Producción de biomasa seca en las parcelas de olmo de Siberia tras el primer año de rebrote (R4T1)	116
Figura 3.2.12. Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) durante el tercer periodo vegetativo en las parcelas del CEDER	118
Figura 3.2.13. Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) durante el cuarto periodo vegetativo del primer ciclo (edad R4T4) en las parcelas del CEDER y Almazán.....	119

Figura 3.2.14. Potencial hídrico foliar (Ψ_f) a media mañana durante el tercer periodo vegetativo (2012). Parcelas con densidad de plantación de 6.666 pl ha ⁻¹	120
Figura 3.2.15. Potencial hídrico foliar (Ψ_f) a media mañana y a mediodía y potencial hídrico xilemático (Ψ_{xm}) a mediodía durante el cuarto periodo vegetativo (2013) en plantas con edad R4T4	121
Figura 4.1.1. Eficiencia en el Uso del Agua (g l ⁻¹) de los distintos clones de chopo durante el primer y el segundo ciclo de cultivo.....	133
Figura 4.1.2. Eficiencia en el Uso del Agua (g l ⁻¹) en las distintas dosis de riego durante el segundo ciclo (considerados los 4 clones).....	134
Figura 4.1.3. Índice de área foliar (LAI) durante los años 2012 y 2013 (m ² m ⁻²) en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214, considerando únicamente los valores registrados a partir del 15 de junio.	136
Figura 4.1.4. Regresión lineal entre la humedad edáfica y el Ψ_f a media mañana durante 2012 y entre la humedad edáfica y el Ψ_{xm} a mediodía durante 2013.	139
Figura 4.2.1. Evolución de la producción de biomasa (kg MS ha ⁻¹) a lo largo del primer ciclo de cuatro años	148
Figura 4.2.2. Comparación de la producción de biomasa (kg ⁻¹ MS ha ⁻¹) con turno de 3 años + rebrote y con turno de 4 años	150
Figura 4.2.3. Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) en g l ⁻¹ en las parcelas de olmo de Siberia del CEDER a lo largo del primer ciclo de cuatro años	152
Figura 4.2.4. Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) media en g l ⁻¹ durante el primer ciclo de cuatro años y durante el primer año de rebrote en el CEDER y en Almazán.	152
Figura 4.2.5. Valor medio del índice de área foliar (LAI) durante los años 2012 y 2013 (plantas R3T3 y R4T4), considerados solamente los registros de LAI a partir del 15 de junio.....	155
Figura 4.2.6. Relación entre los valores medios de LAI (m ² m ⁻²) y la Producción de biomasa anual (kg MS ha ⁻¹) en el tercer y el cuarto periodo vegetativo (plantas R3T3 y R4T4), considerados solamente los registros de LAI a partir del 15 de junio.	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.2-I: Producción de biomasa en España	12
Tabla 1.2-II: Biomasa potencial y necesaria según PER 2011-2020.....	13
Tabla 2.1-I: Temperatura media anual (°C) en el CEDER durante el periodo 2008-2013	46
Tabla 2.1-II: Precipitación mensual (mm) registrada en el CEDER durante el periodo 2008-2013.....	46
Tabla 2.1-III: Temperatura media de las máximas (°C) en el CEDER durante el periodo 2008-2013.....	48
Tabla 2.1-IV: Temperatura media de las mínimas (°C) en el CEDER durante el periodo 2008-2013.....	48
Tabla 2.1-V: Radiación total global (MJ m ⁻²) en el CEDER durante el periodo 2008-2013,	49
Tabla 2.1-VI: Características del suelo de la parcela experimental antes de la plantación a dos profundidades.	50
Tabla 2.1-VII: Clones de chopo empleados en el ensayo.	51
Tabla 2.1-VIII: Fertilización en la parcela experimental durante 2 ciclos de cultivo ..	52
Tabla 2.1-IX: Evapotranspiración Potencial (ETP), valores Kc para chopo, Evapotranspiración de Referencia (ETc), precipitación registrada en el periodo 2006-2010 y estimación del volumen de riego necesario en la parcelas de chopo del CEDER.	56
Tabla 2.1-X: Volumen de agua aportado cada año a las parcelas (m ³ ha ⁻¹).	56
Tabla 2.2-I: Temperatura media anual (°C) en Almazán durante el periodo 2010-2013.	66
Tabla 2.2-II: Precipitación mensual (mm) registrada en Almazán durante el periodo 2010-2013.....	67
Tabla 2.2-III: Radiación total global (MJ m ⁻²) en Almazán en el periodo 2010-2013.	69
Tabla 2.2-IV: Características del suelo en las parcelas de Almazán y del CEDER.....	70
Tabla 2.2-V: Condiciones de cultivos de las parcelas del CEDER y Almazán. Diseño realizado por duplicado para cada uno de los turnos de corta estudiados (3 y 4 años)..	71
Tabla 2.2-VI: Fertilización en la parcela de olmos ubicada en el CEDER.....	73

Tabla 2.2-VII: Volumen de agua ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) y fecha de inicio y finalización del riego en las parcelas de olmo del CEDER.....	75
Tabla 3.1-I: Fecha de brotación de los distintos clones y grados-día acumulados hasta esta fecha.	83
Tabla 3.1-II: Porcentaje de supervivencia en las distintas dosis de riego de chopo al finalizar el primer ciclo del cultivo (2010) y durante los tres años del segundo ciclo (2011, 2012 y 2013).	85
Tabla 3.1-III: Número de brotes por planta en cada uno de los clones de chopo al finalizar el primer ciclo de tres años.....	87
Tabla 3.1-IV: Número de brotes por planta en cada uno de los clones de chopo el primer año tras el rebrote.....	88
Tabla 3.1-V: Número de brotes por planta en las distintas dosis de riego el primer año tras el rebrote (considerados los 4 clones).....	88
Tabla 3.1-VI: Número de brotes por planta en cada uno de los clones de chopo al finalizar el segundo ciclo de tres años	89
Tabla 3.1-VII: Número de brotes por planta en las distintas dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años (considerados los 4 clones).....	89
Tabla 3.1-VIII: Análisis de varianza (ANOVA) para la altura (m) al finalizar el primer ciclo de tres años.....	90
Tabla 3.1-IX: Análisis de varianza (ANOVA) para el AB por planta (cm^2) al finalizar el primer ciclo de tres años	91
Tabla 3.1-X: Análisis de varianza (ANOVA) de la altura (m) por clon y por dosis de riego (los cuatro clones en conjunto y cada uno por separado) al finalizar el segundo ciclo de tres años.....	93
Tabla 3.1-XI: Análisis de varianza (ANOVA) del AB por planta (cm^2) por clon y por dosis de riego (los cuatro clones en conjunto y cada uno por separado) al finalizar el segundo ciclo de tres años	96
Tabla 3.1-XII: Humedad (%) de la biomasa de chopo en las diferentes dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años.	97
Tabla 3.1-XIII: Análisis de varianza (ANOVA) para la producción ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) al finalizar el primer ciclo de tres años.....	98
Tabla 3.1-XIV: Producción de hojas (kg ha^{-1}) en las parcelas del clon I-214 durante el tercer año del segundo ciclo y porcentaje que representa respecto a la biomasa total acumulada en ramas y tallos durante el ciclo	101
Tabla 3.2-I: Fecha de brotación del olmo y grados-día acumulados hasta esa fecha .	105

Tabla 3.2-II: Número de brotes por planta antes de realizar la primera corta (R4T4). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).....	107
Tabla 3.2-III: Número de brotes por planta el primer año tras la corta (R4T1). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).....	107
Tabla 3.2-IV: Análisis de varianza (ANOVA) para el área basal y la altura tras tres años (R3T3).....	109
Tabla 3.2-V: Análisis de varianza (ANOVA) para el área basal y la altura tras cuatro años (R4T4).....	112
Tabla 3.2-VI: Análisis de varianza (ANOVA) para la altura (m) el primer año tras el rebrote.....	113
Tabla 3.2-VII: Humedad media (%) de la biomasa de olmo en las diferentes condiciones de cultivo	114
Tabla 3.2-VIII: Producción de hojas (kg ha^{-1}) en las parcelas del CEDER durante el segundo, el tercero y el cuarto periodo vegetativo del primer ciclo (2011, 2012 y 2013) y porcentaje que representa esta biomasa respecto a la biomasa anual producida y respecto a la biomasa total acumulada en ramas y tallos	117
Tabla 4.1-I: Análisis de varianza (ANOVA) para el índice de área foliar (LAI) durante los años 2012 y 2013 ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214, considerando únicamente los valores registrados a partir del 15 de junio.....	136
Tabla 4.1-II: Coeficiente de correlación de Pearson entre el Ψ_f a media mañana, el Ψ_f a mediodía y el Ψ_{xm} a mediodía durante 2013 (tercer periodo vegetativo del segundo ciclo).	139
Tabla 4.2-I: Modelos de regresión para estimar el peso seco (PS) por árbol (g) en función del área basimétrica (AB) dada en mm^2 y la altura (h) en metros. R^2 : R^2 ajustada por grados de libertad.	145
Tabla 4.2-II: Producción estimada y real ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) al final del tercer periodo vegetativo en las diferentes condiciones de cultivo.....	146
Tabla 4.2-III: Producción estimada y real ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) al final del cuarto periodo vegetativo (edad de la planta R4T4) en las diferentes condiciones de cultivo.....	147
Tabla 4.2-IV: Análisis de varianza (ANOVA) para la producción al final del tercer y el cuarto periodo vegetativo	148
Tabla 4.2-V: Análisis de varianza (ANOVA) para el índice de área foliar (LAI) durante los años 2012 y 2013 (considerados solamente los registros a partir del 15 de junio). 155	

Tabla 4.2-VI: Coeficiente de correlación de Pearson entre el Ψ_f a media mañana, el Ψ_f a mediodía y el Ψ_{xm} a mediodía durante el cuarto periodo vegetativo (plantas R4T4) .. 158

ABREVIATURAS EMPLEADAS

A: Densidad alta

AB: Área basimétrica

ALM: Almazán

B: Densidad baja

CS: Cubo de la Solana (CEDER)

EJ: Exajulio

ET₀: Evapotranspiración de referencia

ET_c: Evapotranspiración de un cultivo

EUA: Eficiencia en el uso del agua

FAO: Food and Agriculture Organization (Organización para la Alimentación y la Agricultura)

GEI: Gases de Efecto Invernadero

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

ktep: Kilotonelada equivalente de petróleo

LAI: Leaf Area Index (Índice de Área Foliar)

MS: Materia seca

Mtep: Megatonelada equivalente de petróleo

MW: Megavatio

PER: Plan de Energías Renovables

pl: Planta

R: Raíz

R1: Regadío dosis más baja

R2: Regadío dosis más alta

S: Secano

SA: Secano densidad alta

SB: Secano densidad baja

SRF: Short Rotation Forestry (Cultivos leñosos en corta rotación)

T: Tallo

TDR: Time Domain Reflectometry (Reflectometría de Dominio de Tiempo)

TWh: Teravatio-hora

UE: Unión Europea

Ψ_f: Potencial hídrico foliar

Ψ_{xm}: Potencial hídrico xilemático

RESUMEN

El presente trabajo estudia el empleo del olmo de Siberia (*Ulmus Pumila* L.) y el chopo (*Populus* spp.) en corta rotación y alta densidad para la producción de biomasa con fines energéticos. En el área mediterránea las disponibilidades hídricas son limitadas, por lo que la mayoría de los cultivos energéticos utilizados hasta el momento requieren el aporte de agua de riego; por ello resulta fundamental encontrar especies con bajos requerimientos hídricos, analizar la eficiencia en el uso del agua de diferentes materiales genéticos y optimizar la dosis de riego.

Las parcelas experimentales se ubicaron en la provincia de Soria. En el ensayo llevado a cabo con olmo de Siberia se ha analizado el efecto en la producción de la disponibilidad de agua mediante el establecimiento de parcelas en secano y con dos dosis de riego ($2000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $4000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ aproximadamente); además, al ser una especie poco estudiada hasta el momento, se ha estudiado también el efecto que tiene sobre el rendimiento la densidad de plantación ($3.333 \text{ plantas ha}^{-1}$ y $6.666 \text{ plantas ha}^{-1}$), el tipo de suelo (2 calidades diferentes) y el turno de corta (3 y 4 años). En el caso del chopo, se han evaluado cuatro clones (AF-2, I-214, Monviso y Pegaso) establecidos con una densidad de 20.000 plantas por hectárea. Durante el primer ciclo de tres años se aportó el mismo volumen de riego a todas las parcelas, mientras que durante el segundo ciclo se establecieron 8 regímenes hídricos diferentes.

Por otra parte, se ha investigado sobre el uso del potencial hídrico de las plantas para evaluar el estrés hídrico de las mismas y se ha estimado la producción de biomasa foliar y el Índice de Área Foliar (LAI) de ambas especies, relacionando los valores obtenidos con la dosis de riego y la producción de biomasa.

Los resultados muestran que los suelos inundados reducen la tasa de supervivencia de los olmos durante el periodo de implantación, sin embargo la mortalidad durante los siguientes periodos vegetativos es baja y muestra buena capacidad de rebrote. La productividad ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) obtenida fue mayor con un turno de corta de cuatro años que con turno de tres años. El área basal y la altura fueron variables eficaces para predecir la producción de biomasa del olmo de Siberia, obteniendo una variabilidad explicada de más del 80%. En cuanto a los parámetros que mayor influencia tuvieron sobre el crecimiento, el tipo de suelo resultó ser el más relevante, obteniéndose en un suelo agrícola considerado de buena calidad una producción en condiciones de secano de unos $8.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En condiciones de regadío el rendimiento del olmo de Siberia fue al menos el doble que en secano, pero la diferencia entre las dos dosis de riego estudiadas fue pequeña. La producción de biomasa fue mayor en la densidad de plantación más alta ($6.666 \text{ plantas ha}^{-1}$) en las parcelas de regadío, sin embargo no se encontraron diferencias significativas entre las dos densidades en secano.

El clon de chopo que presentó un mayor rendimiento durante el primer ciclo fue AF-2, alcanzando los $14.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, sin embargo la producción de este clon bajó sustancialmente durante el segundo ciclo debido a su mala capacidad de rebrote,

pasando a ser I-214 el clon más productivo llegando también a los 14.000 kg ha⁻¹ año⁻¹. Un aporte adicional de agua proporcionó un incremento de la biomasa recogida, pero a partir de unos 6.500 m³ ha⁻¹ año⁻¹ de agua la producción se mantiene constante.

El potencial hídrico foliar ha resultado ser una herramienta útil para conocer el estrés hídrico de las plantas. Los olmos de regadío apenas sufrieron estrés hídrico, mientras que los implantados en condiciones de secano padecieron un acusado estrés durante buena parte del periodo vegetativo, que se acentuó en la parte final del mismo. Los chopos regados con las dosis más altas no sufrieron estrés hídrico o fue muy pequeño, en las dosis intermedias sufrieron un estrés moderado ocasionalmente y únicamente en las dosis más bajas sufrieron puntualmente un estrés severo.

El LAI aumenta con la edad de los brotes y oscila entre 2 y 4 m² m⁻² en los chopos y entre 2 y 7 m² m⁻² en los olmos. Se encontró una buena relación entre este índice y la producción de biomasa del olmo de Siberia.

En general, puede decirse que el olmo de Siberia podría ser una buena alternativa para producir biomasa leñosa en condiciones de secano, mientras que el chopo podría emplearse en regadío siempre que se haga una buena elección del clon y de la dosis de riego

ABSTRACT

This work explores the possibilities of biomass production, for energy purposes, of Siberian elm (*Ulmus Pumila* L.) and poplar (*Populus* spp.) in Spain. Irrigation is required for the viable cultivation of many energy crops in Mediterranean areas because of low water availability, for this reason species with low water requirements should be a good alternative for biomass production. Moreover, the optimal amount of irrigation water and the performance of the different genetic material in terms of production and water use efficiency should be studied in order to use water wisely.

The experimental plots were established in the province of Soria in Spain. Given the small amount of information available about Siberian elm, besides studying the influence of water availability (rain-fed and two different irrigation doses) on biomass production, two different plantation densities (3,333 plants ha⁻¹ and 6,666 plants ha⁻¹), two different soil type and two cutting cycles (three years and four years) were assessed. In the case of poplar, four clones belonging to different hybrids (I-214, AF2, Pegaso, and Monviso) were included in a high density plantation (20,000 plants ha⁻¹). During the first cycle, the water supplied in all plots was the same, while 8 different watering regimes were used during the second cycle.

The suitability of the use of the leaf water potential to assess the water stress situations has also been investigated. Moreover, leaf biomass production and leaf area index (LAI) were estimated in both species in order to analyze the relationship between these parameters, irrigation dose and biomass production.

The results shows that flooded soils have an adverse effect on elm survival in the implantation period, but the percentage of mortality is very low during the following vegetative periods and it shows a good ability of regrowth. The annual yield from a four-year cutting cycle was significantly greater than that from the three-year cutting cycle. Basal diameter and height are effective variables for predicting the production of total biomass; equations with R squared higher than 80% were obtained. The analysis of parameters having an influence on elm growth shows that soil type is the most important factor to obtain a good yield. In soils with enough nutrients and higher water-holding capacity, biomass productions of 8,000 kg ha⁻¹ yr⁻¹ were achieved even under rain-fed conditions. In irrigated plots, Siberian elm production was double than the production of biomass under rain-fed conditions; however, small differences were obtained between the 2 different irrigation doses under study. Biomass yield was greater for the highest planting density (6,666 plants ha⁻¹) in irrigated plots, but significant differences were not found between the 2 densities in rain-fed plots.

The clone AF-2 showed the highest production (14,000 kg ha⁻¹ yr⁻¹) during the first cycle, however during the second cycle its growth was lower because of a high

mortality rate after regrowth and I-214 achieves the greatest production ($14,000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). An additional water supply provided a greater amount of biomass, but over about $6500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ of water the production is constant.

Leaf water potential has been shown to be a useful tool for finding out plant water status. Irrigated elms hardly suffered water stress, while rain-fed elms suffered a pronounced water stress, which was more marked at the end of the vegetative period. Most of poplars did not show water stress; leaf water potentials only showed an important water stress in the plots irrigated with the lowest doses. LAI increases with shoot age and it ranges from 2 to $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ in poplars and from 2 to $7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ in elms. A good relationship has been found between this index and Siberian elm production.

In general, Siberian elm could be a good alternative to produce woody biomass in rain-fed plots, while poplar could be used in irrigated plots if a suitable clone and irrigation dose are chosen.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos e interés del tema

El desarrollo de la biomasa como recurso energético renovable es fundamental, ya que los últimos estudios sobre el consumo energético mundial informan de un fuerte aumento de la demanda en los próximos años y de la necesidad de reducir la dependencia de los recursos fósiles, que son uno de los principales causantes del calentamiento del planeta. Además, un mayor uso de la biomasa contribuirá al desarrollo rural mediante la generación de empleo en estas zonas y en países como España, donde un 80% de la energía consumida proviene del exterior, permitirá reducir la dependencia energética, lo que tendrá un importante impacto sobre la economía nacional.

La Unión Europea, consciente de la problemática a la que se enfrenta, se ha propuesto que un 20% de la energía consumida en la Unión en el año 2020 provenga de fuentes renovables (Directiva (UE) 2015/1513) y gracias a los importantes beneficios económicos, sociales y medioambientales anteriormente mencionados, la biomasa debe jugar un papel fundamental en la consecución de este objetivo. En España, el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables 2011-2020 señala medidas específicas para el fomento del uso de la energía procedente de la biomasa y tanto la Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2013-2020 como el Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, consideran como prioridad científico-técnica y empresarial la biomasa.

Dentro del ámbito de la biomasa, la producida a partir de plantaciones destinadas específicamente para la producción de energía es la que presenta un mayor potencial, por lo se hace necesario el establecimiento de parcelas experimentales que ayuden a conocer la potencialidad de las distintas especies en el corto plazo, así como a identificar los aspectos a mejorar para optimizar las producciones. En el caso de las leñosas, las especies más estudiadas hasta el momento para su uso energético en corta rotación tienen unos requerimientos hídricos altos; por lo que en países como España, donde el agua es un bien escaso, se deberán también estudiar especies capaces de obtener buenos rendimientos con bajos volúmenes de agua. Además, la mayoría de los terrenos disponibles para la implantación de cultivos energéticos se encuentran en zonas con suelos pobres, por lo que es necesario encontrar especies capaces de desarrollarse con escasez de nutrientes. Se debe tener en cuenta que las especies de hoja caduca devolverán al suelo mediante la descomposición de la hojarasca buena parte de los nutrientes extraídos.

En el presente trabajo se pretende mejorar el conocimiento sobre el uso del chopo (*Populus* spp.) y el olmo de Siberia (*Ulmus pumila* L.) en corta rotación y alta densidad para su uso energético. Para ello, se establecieron una serie de parcelas experimentales

con distintos clones de chopo y varias dosis riego, así como parcelas de olmo con distinta densidad, régimen hídrico, calidad del suelo y turno de corta.

Más concretamente para el chopo se fijaron los siguientes objetivos:

- Evaluar el crecimiento y la producción de cuatro clones de chopo (AF-2, I-214, Monviso y Pegaso) con diferentes disponibilidades hídricas.
- Evaluar la producción foliar y el índice de área foliar (LAI), relacionando estos valores entre sí y con la disponibilidad de agua.
- Analizar el estrés hídrico al que se ven sometidos estos clones al reducir la dosis de riego aplicada y su efecto sobre el rendimiento.

Al ser el olmo de Siberia una especie todavía poco estudiada en el ámbito de la agroenergética, el número de objetivos fijados, así como su contenido, fue diferente:

- Encontrar modelos para estimar la producción de biomasa seca en función de otras variables de crecimiento (alturas, diámetros), pudiendo así emplear métodos no destructivos para conocerla.
- Evaluar el crecimiento y la producción con diferentes disponibilidades hídricas (secano y dos dosis de riego diferentes), con distintas densidades de plantación (3.333 plantas por hectárea y 6.666 plantas por hectárea), con diferentes turnos de corta (3 y 4 años) y en dos suelos con diferentes características edáficas.
- Evaluar la producción foliar y el índice de área foliar (LAI), relacionando estos valores entre sí y con la producción de biomasa obtenida
- Analizar el estrés hídrico al que se ve sometida esta especie bajo los distintos regímenes hídricos.

1.2. La biomasa como recurso energético

1.2.1. Definición y tipos

La biomasa es la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos procedentes de la agricultura (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales (Directiva 2001/77/CE). Es decir, de acuerdo con esta definición, la biomasa abarca tanto los residuos agrícolas, forestales y urbanos de origen orgánico, como aquellas producciones obtenidas con los denominados cultivos energéticos, utilizando especies leñosas o herbáceas con la finalidad de producir energía. Cultivo energético es aquel cuya cosecha va destinada a producir energía, pretendiendo por ello concentrar gran cantidad de biomasa por unidad de superficie, con el fin de emplear la menor superficie agrícola posible y garantizar un suministro de forma competitiva. Para el desarrollo de los cultivos energéticos, en

principio, se deben dar como mínimo dos condiciones: la disponibilidad de superficies adecuadas para su cultivo y que su producción sea rentable para el agricultor en términos económicos, aunque cada vez toma mayor interés el balance energético y las repercusiones medioambientales.

Los compuestos más abundantes en la biomasa vegetal son los hidratos de Carbono, diferenciando en función de la forma en que se encuentren estos compuestos varios tipos de biomasa:

- La biomasa amilácea: aquella en la que los hidratos de carbono predominantes se encuentran en forma de polisacáridos de reserva, tales como almidón o inulina. Algunos cereales como el trigo la cebada o el maíz junto con las patatas son los ejemplos más representativos de este tipo de biomasa.
- Biomasa azucarada: su principal componente hidrocarbonado son azúcares, bien sean monosacáridos (glucosa o fructosa principalmente) o bien disacáridos tales como la sacarosa. La remolacha o el tallo de la caña de azúcar son ejemplos de biomasa azucarada.
- Biomasa lignocelulósica: aquella en la que predominan las celulosas (hemicelulosa y holocelulosa) y la lignina. Como ejemplo de este tipo de biomasa tenemos la madera (especies leñosas) y la paja (especies herbáceas).

También hay biomásas que tienen un alto contenido en aceites, como por ejemplo las semillas de oleaginosas (girasol, colza), las cuales suelen emplearse para la producción de biodiesel. Por su parte, las biomásas amilácea y azucarada son habitualmente empleadas para la obtención de bioetanol mediante la fermentación de los azúcares y su transformación en etanol. La biomasa lignocelulósica en su mayor parte se aprovecha como biocombustible sólido, bien directamente como leñas o bien transformándola en astillas, serrín, pellets o briquetas, lo cual facilita su transporte y manipulación. Además, este tipo de biomasa también puede emplearse para la producción de bioetanol ya que mediante la hidrólisis de la celulosa se puede obtener glucosa fermentable, pero este proceso es complejo y sigue en fase de investigación. Las lignocelulósicas, como biocombustibles sólidos, pueden emplearse con fines térmicos para calefacción, agua caliente o vapor en hogares e industrias y para obtener energía eléctrica mediante sistemas de cogeneración o co-combustión.

La biomasa lignocelulósica puede ser herbácea o leñosa; ambas se componen principalmente de celulosas, hemicelulosas y lignina, pero las leñosas suelen tener una mayor proporción de lignina, la cual posee un mayor contenido en carbono, desprendiéndose más calor al quemarla y presentando por ello estas especies un poder calorífico superior al de las herbáceas (Fernández, 2004). Además de esta ventaja, la biomasa procedente de leñosas suele ofrecer un menor contenido de cenizas, generándose por tanto menos depósitos en las calderas y menos emisiones a la

atmosfera (Obernberger et al., 2006). También cabe reseñar que las herbáceas poseen mayor contenido de cloro y azufre (Jenkins et al., 1998), los cuales además de provocar corrosiones, compactaciones, escarificaciones y deposiciones en las calderas; generan emisiones de algunos compuestos (HCl, SO_x, etc.) que pueden afectar al cambio climático.

Por todo lo dicho anteriormente, se debe considerar a la biomasa lignocelulósica como una de las que tienen un futuro más prometedor para la producción de energía, principalmente para fines térmicos y/o eléctricos; siendo las especies leñosas las que presentan mejores propiedades para su uso. Por ello, este trabajo pretende profundizar en el cultivo con fines energéticos de dos especies lignocelulósicas leñosas como son el olmo de Siberia y el chopo.

1.2.2. Ventajas del uso de la biomasa y los cultivos energéticos

Actualmente existen a nivel mundial y en particular en España una serie de factores que impulsan la investigación y desarrollo de la biomasa y los cultivos energéticos como fuentes de energía renovable.

Reducen las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI): la biomasa, al tener su origen en un proceso fotosintético, tiene un efecto de sumidero de CO₂, siendo la única forma de energía que posee esta característica. Posteriormente, en el proceso de obtención de energía a partir de la biomasa, la energía solar que se transformó y almacenó durante la fotosíntesis se libera junto con el CO₂ que se había fijado en la materia orgánica; describiendo de esta forma un ciclo que otorga a la biomasa su carácter de recurso energético neutro respecto al principal gas de efecto invernadero, el CO₂. Sin embargo, también es cierto que los trabajos realizados durante la producción, recolección, transporte, pretratamiento y transformación energética de la biomasa requieren materias primas, en su mayoría de origen fósil, que emiten gases de efecto invernadero, por lo que el balance de la cadena de conversión energética en cuanto a las emisiones de CO₂ no es completamente neutro; si bien supone una reducción muy importante de las emisiones cuando sustituye a los combustibles fósiles. Por otro lado, al tener escaso contenido en azufre, la biomasa apenas produce óxidos de este elemento, que son causantes de la lluvia ácida.

Según el protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998), la Unión Europea para el año 2020 debe llevar a cabo una reducción de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990 del 20%. En 2010, las emisiones de GEI de la EU-27 fueron un 15% menores que las registradas en 1990, siendo probable que el objetivo del 20% se supere. Sin embargo, en el caso de España las emisiones registraron un aumento del 25,8 % entre 1990 y 2010 debido, principalmente, al transporte por carretera, la producción de calor y

electricidad y a la industria manufacturera; estando lejos de alcanzar sus objetivos de reducción (Comisión Europea, 2012).

Reducen la dependencia de fuentes externas de energía: la dependencia de los recursos fósiles a nivel mundial y también por parte de la Unión Europea es muy elevada, lo que representa un problema para el viejo continente donde los recursos petrolíferos son escasos. Los combustibles fósiles continuaran teniendo un papel preponderante aunque se prevé que su participación global disminuya ligeramente del 81% de la energía primaria mundial en 2010 al 75% en 2035 (IDAE, 2011). La Unión Europea tiene una dependencia energética actualmente de más del 50% y España ocupa una de las primeras posiciones dentro de la unión, con cerca de un 75 % de la energía importada (IDAE, 2011a). Esta situación de dependencia energética ha experimentado una mejora progresiva desde mediados de la década pasada gracias a la intensificación de las políticas de eficiencia energética y de energías renovables.

Poco más del 11% del consumo de energía en España (IDAE, 2011) proviene de las energías renovables, destacando entre ellas la biomasa (3,51%); sin embargo el porcentaje que representa todavía es muy pequeño en comparación con otros países europeos, en los cuales la biomasa es una fuente fundamental para su suministro energético. Por ejemplo, en Suecia la agricultura y el medio forestal proporcionan alrededor del 30% de la energía consumida (Swedish Energy Agency, 2011). La Unión Europea se ha fijado como objetivo para el año 2020 que el 20% de la energía consumida provenga de energías renovables (Directiva (UE) 2015/1513).

Posibilitan el desarrollo rural: La obtención de biomasa conlleva inversión en el medio rural, lo que ayuda a mejorar los servicios públicos en estas zonas y a revalorizar los terrenos, evitando así la emigración rural y el desarrollo socioeconómico (Nava-García y Doldán-García 2014). La generación de empleo es el impacto positivo más importante de la biomasa en las zonas rurales. Según la FAO, la diversificación de las actividades agrícolas y forestales, posibilitará la creación de un elevado número de empleos en el medio rural, tanto en la agricultura directamente como en las agroindustrias energéticas asociadas (FAO, 2004); dicha creación de empleo podría alcanzar, según algunos autores, las 2500 personas por cada Megatonelada Equivalente de Petróleo (Mtep) de energía primaria utilizada (Carrasco, 2011). Se estima que el número de trabajadores necesarios para la producción de bioenergía es casi cinco veces mayor que para la producción de combustibles fósiles (Domac, 2002). En Brasil, donde la biomasa y especialmente el bioetanol tienen un peso muy importante en la economía, la FAO estima que los biocombustibles aportaron en las zonas rurales un millón de puestos de trabajo directos y 300.000 indirectos (FAO, 2008), mientras que otros autores van todavía más allá y estiman los empleos indirectos generados en alrededor de 6 millones (Zuurbier y Vooren, 2008). En la Unión Europea se estima que el uso de la biomasa ha generado entre 250.000 y 300.000 empleos directos en los últimos años (COM, 2005),

la mayoría de ellos en zonas rurales, aunque algunos elevan esta cifra hasta los 500.000 puestos de trabajo (López, 2006).

Se transforman en todo momento sin depender de la meteorología: La biomasa es una energía renovable que, a diferencia de lo que sucede con otras, puede almacenarse durante largos periodos de tiempo y emplearse en cualquier momento (Martínez, 2009). La energía solar o la eólica son mas difícilmente almacenables a largo plazo y su uso, por tanto, está limitado a periodos de tiempo en los que las condiciones meteorológicas sean favorables para la producción de las mismas.

1.2.3. Los cultivos energéticos y la producción de alimentos

En los últimos años la biomasa y más concretamente los cultivos energéticos han sido objeto de debate, alegando sus detractores que entran en competencia con la producción de alimentos, llegando a culparles de una posible hambruna mundial. Estas teorías catastrofistas son rebatidas en numerosos estudios recientes sobre el potencial de los cultivos energéticos.

En el trabajo de Hoogwijk et al., (2005) se manejan diversos escenarios hacia los que podría tender el planeta, como son un mayor o menor incremento o descenso de la población, una mayor o menor concienciación ambiental o un fuerte o leve desarrollo tecnológico, obteniendo en todos ellos que para finales de siglo será posible alimentar a la totalidad de la población y se incrementará, además, la superficie de tierras poco productivas, abandonadas o en barbecho, las cuales podrían potencialmente albergar cultivos energéticos.

Tras excluir las zonas arboladas, las superficies necesarias de pastos para alimentar el ganado y las tierras necesarias para los cultivos dedicados a cubrir las necesidades alimenticias de la población mundial, en nuestro planeta existirían entre 250 y 800 millones de hectáreas disponibles para la implantación de cultivos energéticos según Fischer (2008), cifra que coincide con la ofrecida por Tilman et al. (2006), que informan de que la superficie mundial de terrenos de cultivo abandonados podría estar en torno a los 500 millones de hectáreas. Sin embargo, la superficie destinada en todo el mundo a albergar cultivos energéticos era en 2004 de tan solo unos 14 millones de hectáreas (AIE, 2006), la mayoría de ellas localizadas en Brasil para la producción de caña de azúcar y en Estados Unidos para la producción de Maíz. Aunque la Agencia Internacional de la Energía dice que la superficie destinada a cultivos energéticos aumentará de manera importante en los próximos años, pudiendo multiplicarse por tres o por cuatro, todavía se estaría muy lejos de ocupar el total de la superficie disponible.

Buena parte de las superficies susceptible de ser implantadas con cultivos energéticos se encuentran en África y América latina, estimándose que solo en Brasil podrían existir

unos 350 millones de hectáreas agrícolas no cultivadas (Carrasco, 2011). Aunque en Europa la superficie disponible es menor, también hay un buen número de hectáreas sin cultivar. Según la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) esta superficie rondaba los 13 millones de hectáreas en el año 2010, previéndose que aumente hasta los 19,3 millones de hectáreas en el año 2030 (AEMA, 2010); con esta superficie se podría producir la totalidad de la energía primaria consumida en España en la actualidad. A pesar de la disponibilidad de tierras de labor, actualmente solo hay en la Unión Europea unos 4 millones de hectáreas dedicadas específicamente a la producción de biomasa con fines energéticos (AEMA, 2010).

La reorientación de la Política Agraria Común (PAC) fue la causante del abandono de numerosas tierras de cultivo en la Unión a partir de 1988, situación a la que España no fue ajena. En el año 2009, había en España 1.760.000 hectáreas de superficie agrícola abandonadas (IDAE, 2011), la mayor parte de ellas de secano (92 %); además, con la entrada en vigor en 2013 de las nuevas reformas de la PAC se prevé un nuevo aumento de la superficie de tierras abandonadas.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado, se considera que la producción de biomasa a partir de cultivos energéticos, y en especial su uso en aquellos terrenos donde se produzca la reutilización de tierras abandonadas, será una de las fuentes de producción de bioenergía más importante a nivel mundial hacia mediados de siglo, por encima de la utilización de residuos agrícolas y forestales o de los residuos orgánicos (AIE, 2006). En la Unión Europea, se prevé que en 2030 la producción de biomasa a partir de cultivos energéticos sea aproximadamente el triple que en la actualidad, alcanzando las 144 Mtep y serán los cultivos lignocelulósicos los que experimenten un mayor crecimiento, suponiendo más del 50% de la bioenergía producida en la UE. En España, se espera que la producción con cultivos energéticos se doble en los próximos 20 años hasta alcanzar las 16 Mtep, aportando en este caso la biomasa lignocelulósica casi el 90% de esta producción (AEMA, 2010).

1.2.4. Situación de la biomasa en el mundo

Para el año 2035, se espera que el 25% de la energía mundial consumida provenga de energías renovables, señalándose la biomasa como una de las principales fuentes (AIE, 2012). La Unión Europea, intentando promover el uso de energías renovables, se ha fijado como objetivo que un 20% de la energía consumida en la Unión para el año 2020 provenga de estas fuentes (Directiva (UE) 2015/1513). En la actualidad, la biomasa ya es la cuarta fuente de energía más importante en el mundo tras el petróleo, el carbón y el gas natural, obteniéndose de esta fuente más del 10% de la energía primaria consumida (**Figura 1.2.1.**). En los últimos años su consumo se ha incrementado entre un 2% y un 3% cada año, alcanzando una producción en 2012 de 55 EJ (REN 21, 2013).

Figura 1.2.1. Consumo de energía en el mundo según sus fuentes y consumo de bioenergía según su uso. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de AIE (2012) y REN 21 (2013)

Aproximadamente el 75% de la bioenergía consumida a nivel mundial proviene de leñas, restos forestales y carbón vegetal, un 12% proviene de residuos de las industrias forestales, mientras que un 3% proviene del biogás (IPCC, 2012). El 10% restante se obtiene del sector agrícola, bien de residuos animales y vegetales o bien de los cultivos energéticos, los cuales en la actualidad se estima solo suponen entre un 3-4% de la biomasa consumida (REN 21, 2013).

Según la Agencia Internacional de la Energía (2012), aproximadamente un 60% del total de la biomasa consumida se emplea en países en vías de desarrollo, principalmente en forma de leñas para cocinar o calentarse. El problema de este uso tradicional de la biomasa es su falta de desarrollo tecnológico y de eficiencia energética; además, si no se hace una planificación sostenible de su aprovechamiento puede llevar a la deforestación de los terrenos. Esta problemática se está intentando paliar en los países más avanzados mediante programas para aumentar la competitividad y desarrollo sostenible del recurso, esperándose, gracias a ello, que la cantidad de biomasa no aprovechada mediante usos tradicionales (actualmente 526 Mtep) se duplique en 2035.

Buena parte de la biomasa no empleada de forma tradicional es utilizada también con fines térmicos (294 Mtep en 2010), consumiéndose en el sector industrial las dos terceras partes de esta biomasa térmica de uso moderno, mientras que el tercio restante se emplea en el ámbito doméstico. El desarrollado en los últimos años de equipos para el uso térmico de los biocombustible sólidos en los hogares ha permitido un importante despegue de este sector en Alemania, Estados Unidos y también en España.

La biomasa también se emplea para generar electricidad, bien en plantas de cogeneración o bien en centrales de co-combustión, donde se ha utilizado junto con el carbón o el gas natural. En total en 2010 se obtuvieron de este modo algo más de 80 Mtep, lo que se traduce en unos 330 TWh. Para el año 2035, se espera que esta producción se multiplique casi por cinco hasta los casi 1.500 TWh, siendo China la principal productora, seguida de la Unión Europea y EE.UU.

La producción de biocarburantes alcanzó las 68 Mtep en el año 2010, siendo el etanol la principal fuente, al obtenerse de este compuesto casi tres cuartas partes de los mismos. En 2010 se produjeron un millón de barriles equivalentes de petróleo al día de bioetanol y se espera que esta producción se triplique en 2035. Por su parte, la producción de biodiesel fue 300.000 barriles equivalentes de petróleo al día en 2010 y se espera alcance el millón en 2035. Este incremento del uso de los biocarburantes se debe, en gran medida, a las políticas adoptadas por numerosos países para potenciar su uso; en Europa en concreto se redactó una directiva que obliga a la sustitución por otras fuentes renovables, que principalmente serán biocarburantes, de un 10% de los combustibles fósiles usados en el transporte.

1.2.5. Situación de la biomasa en España

En España, el gobierno aprobó en el año 2005 un plan de Energías Renovables 2005-2010, con el fin de potenciar la implantación de estas fuentes de energía. Se fijó como objetivo para el año 2010 que un 12 % del consumo energético se hiciese a partir de Energías Renovables. Además, la contribución de las fuentes renovables al consumo bruto de electricidad debía ser del 29,4%, mientras que el 5,83% de los combustibles en el transporte debían ser biocarburantes para este año (IDAE, 2005). Al hacer balance del plan en el año 2010, un 11,3% de la energía consumida procedía de fuentes renovables (IDAE, 2011), quedándose por tanto muy cerca de alcanzar el objetivo; concretamente, 14,8 Mtep de las 131 Mtep consumidas procedían de estas fuentes. De las renovables, la biomasa fue la fuente más utilizada en España, obteniéndose de ella aproximadamente un 3,5% de la energía total consumida, porcentaje al que además habría que sumar otro 1,09% proveniente de biocarburantes (**Figura 1.2.2.**).

El objetivo del consumo bruto de electricidad a partir de energías renovables estuvo también muy cerca de conseguirse, lográndose que un 29,2 % del consumo procediese de estas fuentes, cuando en el año 2004 este consumo era de tan solo un 18,5%. El aporte de la biomasa a la generación eléctrica es pequeño, suponiendo poco más del 1% de la electricidad producida. En el año 2004 tan solo se producían en España 344 MW a partir de esta fuente (**Tabla 1.2-I**); fijando el PER un objetivo ambicioso para el año 2010 al pronosticar una producción de algo más de 2000 MW, sin embargo, finalmente solo se alcanzaron 533 MW de electricidad producida a partir de biomasa (Agencia de

Evaluación y calidad, 2011). El objetivo en el nuevo PER para el año 2020 es menos ambicioso y pronostica una generación de 1.350 MW.

Figura 1.2.2. Distribución de consumo de energía primaria en España en el año 2010. Fuente: IDAE (2011)

Tabla 1.2-I: Producción de biomasa en España. Elaboración propia a partir de información IDAE (2005 y 2011) y Agencia Evaluación y Calidad (2011)

PRODUCCIÓN DE BIOMASA	2004 (Real)	2010		2020 (Previsto)
		Real	Previsto	
Biomasa eléctrica (MW)	244	533	2.039	1.350
Biomasa térmica (ktep)	3.484	3.777	4.070	4.653
Biocombustibles (ktep)	245	1.472	2.200	2.713

Para la biomasa con fines térmicos el PER 2005-2010 fijó un objetivo más modesto, debiendo pasar de las 3.484 ktep producidas en el año 2004 a 4.070 ktep en 2010, sin embargo, solo se consiguió la mitad del aumento pronosticado al quedarse en unas 3.777 ktep (Agencia de Evaluación y Calidad, 2011). Para el año 2020, el objetivo fijado en el PER 2011-2020 es llegar a las 4653 ktep.

Gracias a la legislación desarrollada por el gobierno, los biocarburantes en España pasaron de representar en el año 2004 el 0,39% del consumo en el sector transporte a suponer un 4,99% de este consumo en el año 2010; aun así, no se llegó a la cifra marcada en el PER 2005-2010 (5,83%). A nivel europeo se pretende que al menos el 10% de los carburantes provenga de energías renovables en 2020, mientras que en España según el PER 2011-2020 se alcanzará un 11,3% de sustitución en este año,

generando 3.216 ktep con fuentes renovales, de las cuales un 85% provendrán de biocarburantes.

En el PER 2011-2020 los cultivos energéticos son considerados fundamentales para la consecución de los objetivos fijados (**Tabla 1.2-II**), siendo una de las fuentes más importantes de biomasa, al ser necesaria la producción de algo más de 2,5 millones de toneladas verdes al año (45% de humedad). En total serían necesarias 18 millones de toneladas al año de biomasa para cumplir las previsiones del PER en 2020, una cantidad muy inferior a los casi 40 millones de toneladas verdes al año que se estima se podrían obtener de cultivos energéticos. Los cultivos suponen un 45% de los más de 88 millones de toneladas de biomasa que se estiman se podrían obtener en España anualmente. Las leñosas son las especies que se prevé aporten una mayor producción, estimándose que se obtendrán de estas especies más del 60% de la biomasa procedente de cultivos.

Tabla 1.2-II: Biomasa potencial y necesaria según PER 2011-2020. Fuente: IDAE (2011)

Procedencia		Biomasa potencial (t/año)	Biomasa necesaria objetivos PER 2011-2020 (t/año)
Masas forestales	Restos aprovechamientos	2.984.243	9.639.176
	Árboles completos	15.731.116	
Restos agrícolas	Herbáceos	14.434.566	5.908.116
	Leñosos	16.118.220	
Cultivos energéticos	Herbáceos en terreno agrícola	17.737.868	2.518.563
	Leñosos en terreno agrícola	6.598.861	
	Leñosos terreno forestal	15.072.320	
TOTAL		88.677.194	18.065.855

1.2.5.1. Problemática del sector

El aprovechamiento de la biomasa para la obtención de energía es todavía un gran desconocido para buena parte de la sociedad española, lo cual dificulta especialmente el uso térmico de la biomasa en el sector doméstico, ya que los potenciales clientes se decantan por otros combustibles tradicionales más asentados tecnológicamente y socialmente. Este problema se extiende también a gestores públicos y a las industrias, que en ocasiones optan por opciones menos rentables en vez de por la biomasa. Por otro lado, algunas tecnologías de combustión y gasificación todavía están por desarrollar y también por demostrar su viabilidad económica, lo cual plantea dudas a los usuarios. En el campo de los cultivos energéticos se han iniciado numerosos proyectos de investigación, pero en algunos de ellos todavía no se han podido obtener resultados concluyentes, ya que necesitan años para desarrollarse; además falta información referente a maquinaria y métodos de aprovechamiento, mejora genética, etc.

El mercado de la biomasa todavía no es un mercado maduro, por lo que no existen unos precios de referencia, propiciando tensiones entre compradores y vendedores y dificultando un suministro constante tanto en cantidad como en calidad y precio de la biomasa. El suministro de la biomasa también se ve afectado por la fragmentación de la propiedad agroforestal, así como por la estacionalidad en la producción; por ejemplo la paja procedente de cultivos herbáceos o las podas de los frutales se generan siempre en la misma época. También los cultivos energéticos e incluso la biomasa obtenida de las masas forestales están sujetos a la estacionalidad, ya que estos se encuentran a merced de las condiciones meteorológicas que limitan el uso de maquinaria. Por otro lado, la biomasa para fines energéticos tiene que competir con otros sectores, como por ejemplo con la industria productora de tableros, que también usa la astilla procedente de masas forestales para su producción, o con el sector ganadero, que usa la paja de cereales para camas y alimentación de los animales. Además, en caso de usar especies que a su vez sean empleadas en el sector alimenticio, como por ejemplo la caña de azúcar o el maíz, los precios dependerán del sector alimenticio (IDAE, 2011).

1.3. Características de las plantaciones de cultivos energéticos lignocelulósicos leñosos

Los cultivos lignocelulósicos para uso energético deben cumplir una serie requisitos, entre los que cabría destacar la rentabilidad económica para el agricultor, por lo que deberán tener un fácil manejo, es decir, no requerirán muchas atenciones culturales que encarezcan su producción, y se deberá contar con la maquinaria necesaria para su producción (IDAE, 2007). Además, deberán presentar un balance energético positivo, extrayéndose de ellos más energía de la que se invierte en el cultivo y su posterior tratamiento y no deberán contribuir a degradar el medio ambiente, por ejemplo empobreciendo el suelo.

Las especies seleccionadas deberán presentar una elevada productividad, así como una buena adaptación a las condiciones edafoclimáticas de los lugares donde se pretende su implantación, siendo fundamental conocer cuáles son las especies más adecuadas para cada ubicación. En el caso de los cultivos leñosos, además, se deberá tener en cuenta que el diseño y manejo de la plantación es diferente al llevado a cabo cuando las especies se establecen para la obtención de madera, ya que se emplean densidades de plantación más altas y turnos de corta menores. Según AFOCEL (1982) se podría definir como una buena especie leñosas para uso energético aquella que cumple los siguientes requisitos:

- Crecimiento juvenil rápido
- Elevada y constante producción de brotes
- Capacidad para utilizar todo el periodo vegetativo

- Abundante follaje
- Capacidad de crecer en plantaciones densas
- Buena cicatrización de los cortes y poco deterioro del tocón tras la corta
- Buena resistencia a enfermedades y plagas.

1.3.1. Densidad de plantación

La alta densidad de plantación es una de las características fundamentales de las plantaciones en selvicultura de corta rotación, pero aunque son numerosos los estudios realizados con distintas especies sobre este punto, es difícil determinar cuál es el espaciamiento óptimo. Cuando se inicia el cultivo la producción que se obtiene es proporcional al número de plantas por hectárea que se cultivan, pero el rendimiento de cada planta se reducirá según avance el desarrollo de la plantación debido a la competencia entre individuos, apareciendo antes esta competencia a mayores densidades de plantación. Algunos autores hablan de la denominada *ley del rendimiento final constante* (Koyama y Kira, 1956; Tome y Verwijst, 1996) que dice que para un amplio rango de densidades la producción es independiente del número de plantas por superficie, únicamente variará el tamaño de la planta, obteniendo menores grosores en las densidades más altas (Proe et al., 1999). En el trabajo realizado por Willebrand and Verwijst (1993) con sauces se concluyó que, con un turno de corta de tres años o más, a partir de una densidad de 10.000 pl ha⁻¹ la producción no variaba, llegando también a similares conclusiones con esta especie Bergkvist y Ledin (1998) que indicaron que a partir de 20.000 pl ha⁻¹ con un turno de 5 años la producción se mantenía constante. En la misma dirección apuntó el trabajo realizado con chopos en España por Cañellas et al. (2012), donde la producción tras el primer año de crecimiento de la plantación se vio afectada por el espaciamiento, pero esta correlación desapareció cuando se evaluó el rendimiento al tercer año. Con el género *Populus*, también Liesebach et al. (1999) mostraron como el efecto positivo de la densidad en la producción desaparecía con turnos de corta mayores, mientras que DeBell et al. (1996) informaron de que los mayores rendimientos asociados al menor espaciamiento desaparecen después de los 7 años. Por su parte, Ciria et al. (2002) señalan que con chopos cortados con un turno de tres años, las densidades mayores a 20.000 pl⁻¹ año no aumentan significativamente la producción

Algunos autores, por otra parte, concluyen en sus estudios que la biomasa obtenida se reduce al disminuir la densidad de plantación, como en el estudio de Bullard et al. (2002a) con sauces o los de Larocque (1999) y Proe et al. (2002) con distintas especies de *Populus*; en estos trabajos el rendimiento del chopo a los cuatro años se redujo al aumentar el espaciamiento entre plantas de 1 a 1,5 metros un 15% y un 35% respectivamente. En España, también San Miguel y Montoya (1984) informaron de un aumento de la producción a mayores densidades, mostrando como el rendimiento del

chopo cortado a los cuatro años iba aumentando ligeramente desde las 14,7 t ha⁻¹ año⁻¹ a 2.500 pl ha⁻¹ hasta las 16,9 t ha⁻¹ año⁻¹ con 10.000 pl ha⁻¹. Sin embargo, conviene reseñar que posiblemente las producciones obtenidas por estos autores tenderían a igualarse si utilizasen turnos de corta lo suficientemente largos como para permitir que las plantaciones lleguen a tener gran espesura y alcancen altas fracciones de cavidad cubierta y el cierre de copas.

Tan importante como la cantidad de biomasa es la calidad de la misma, apuntando algunos autores que a mayores densidades el número de ramas es menor, aumentando con ello el porcentaje de biomasa de mayor grosor, la cual presenta mejores propiedades para su aprovechamiento energético (Ciria et al., 2002). Por otro lado, hay trabajos que señalan que una mayor densidad proporciona fustes de diámetros menores, lo que supone una mayor proporción de corteza en el producto final, que llevará consigo un aumento de las cenizas durante el aprovechamiento la biomasa (Kauter *et al.*, 2003).

Para determinar la densidad de plantación más apropiada, aparte de estudiar la producción obtenida, también se deben analizar los costes. En primer lugar los costes de plantación, que serán mayores cuanto mayor número de plantas por hectárea utilicemos; en segundo lugar los costes de manejo de la parcela (facilidad para el uso de maquinaria, grado de afectación por malas hierbas, etc.) y por último los gastos de cosecha. Por un lado, los gastos necesarios para extraer la biomasa se verán reducidos en densidades bajas, ya que estas permiten el uso de turnos de corta mayores y se realizarán menor número de cosechas a lo largo de la vida de la plantación (Strong y Hansen, 1993); pero por otro lado, las menores densidades con turnos largos también pueden dificultar el aprovechamiento de la biomasa y encarecerlo, al no disponer de maquinaria para realizar la cosecha de árboles que superen determinados grosores. En el caso de los chopos, el trabajo de Cañellas et al. (2012) propone que, teniendo en cuenta los costes de plantación y los de manejo de la misma, la densidad de las parcelas no debería ser superior a las 15.000 pl ha⁻¹, y con sauces Bullard et al. (2002a) también fijaron la densidad optima en torno a este valor, ya que a pesar de que las mayores producciones se obtenían con densidades superiores, así lo recomendaban los criterios económicos. Sin embargo, en los últimos años las densidades empleadas habitualmente en SRF han sido todavía menores, debido a las dificultades encontradas durante la cosecha al emplear densidades altas, por lo que se recomiendan densidades por debajo de 10.000 pl ha⁻¹.

1.3.2. Diseño de la plantación

La plantación de los cultivos energéticos leñosos en corta rotación (SRF) puede realizarse en filas simples o pareadas. El primer diseño facilita el manejo de la plantación al poder acceder mejor con maquinaria y, además, según Minotta et al. (2007) mejora la producción, por lo que actualmente los diseños parecen decantarse por no usar la doble fila.

Los marcos de las parcelas pueden ser rectangulares o cuadrados, siendo más habituales en SRF los primeros, sin embargo algunos autores indican que los marcos rectangulares son más productivos que los marcos reales, achacando este mayor rendimiento a que los marcos de plantación rectangulares aceleran la mortalidad de plantas a causa de la competencia, lo que permite optimizar el crecimiento de los árboles supervivientes (Debell y Harrington, 2002).

La longitud de las filas en plantaciones comerciales se recomienda que no sea menos de 100-150 m, ya que esto optimiza el uso de la maquinaria al reducir el número de maniobras a realizar.

1.3.3. Turno de corta

El modelo de crecimiento que siguen las plantas suele presentar tres fases; en la primera de ellas el crecimiento es potencial, posteriormente pasan a tener un crecimiento lineal y por último una fase en la que el crecimiento es asintótico. La silvicultura de corta rotación lo que pretende es aprovechar esa primera fase de crecimiento potencial que tiene lugar en individuos jóvenes, por lo que se necesita realizar cortas cada pocos años para obtener brotes nuevos que continúen esta dinámica de crecimiento.

Atendiendo solamente a criterios productivos, el turno de corta óptimo se obtiene cuando el crecimiento anual medio es máximo y este se iguala al crecimiento anual corriente (Sixto et al., 2007). Este turno está íntimamente ligado a la densidad de plantación, obteniendo turnos menores con las densidades más altas, ya que un mayor número de plantas por superficie aprovechará los recursos disponibles en un periodo de tiempo más corto. Armstrong et al. (1999) observaron en chopos con densidades de plantación de 2.500 y 10.000 pl ha⁻¹ que la productividad era mayor cuando el turno era de cuatro años que a turnos de 2 años; en la misma dirección también apunta el trabajo de Nassi et al. (2010) en Italia, ofreciendo con un turno anual producciones de 9,9 t ha⁻¹ con densidad de 10.000 pl ha⁻¹, mientras que el rendimiento ascendió a 13,8 t ha⁻¹ año⁻¹ con turno de dos años y a 16,4 t ha⁻¹ año⁻¹ si se cortaba cada tres años. En España el trabajo de Ciria (1998) señala que la producción por unidad de superficie del chopo aumentaba al aumentar el turno de corta desde los 3 hasta los 6 años, si bien también indica que en la biomasa producida por cada planta se observa la tendencia contraria, lo

cual se debe sin duda a la competencia entre plantas. En cambio, el trabajo de Bullard et al. (2002a) con sauces mostró que con densidades superiores (entre los 10.000 y 111.000 pl ha⁻¹) el turno de dos años fue mejor que la opción trianual.

Además de variar con la densidad, el turno también dependerá de la velocidad de crecimiento de cada especie, así como de las características edafoclimáticas y aportes de agua y fertilizantes que se lleven a cabo. Por otro lado, el turno con el que se maximiza la producción generalmente difiere del óptimo desde el punto de vista económico, ya que turnos más largos suponen tener que esperar más tiempo hasta la recolección de la biomasa, retrasándose la recuperación de la inversión; además en caso de que los diámetros superen los 8-10 cm se podrían incrementar los gastos de la corta (Kauter *et al.*, 2003; Schweier y Becker, 2012), ya que si no se puede emplear maquinaria automatizada y la corta se lleva a cabo mediante métodos selvícolas tradicionales el coste será más alto. El trabajo de Grünewald et al. (2007) con Robinia presentó una producción bastante superior cuando el turno era nueve años que con tres cortas trianuales, pasando de 5 a casi 7 t ha⁻¹ año⁻¹, sin embargo desde el punto de vista económico al alargar el turno deja de ser un cultivo económicamente viable, al pasar los costes de la cosecha de 245 €/ha a 2704 €/ha, al no poder utilizar con plantas de 9 años el prototipo de cosechadora utilizado con turnos menores.

En conclusión, los ciclos de corta de entre 2-5 años son los más adecuados y utilizados en la actualidad, si bien estos turnos pueden alargarse en aquellas plantaciones en las que, a causa de las malas condiciones edafoclimáticas, su escaso desarrollo no supondría dificultades para el aprovechamiento de la biomasa. También se debe tener en cuenta que en la actualidad se está trabajando en el desarrollo de maquinaria que permita el aprovechamiento de plantas de mayores diámetros a un precio más reducido, con lo que posiblemente en unos años se pueda alargar el turno sin aumentar a su vez los gastos de la corta. Por otro lado, al disponer todavía de poca información sobre los turnos y densidades más adecuados para una especie en diferentes localizaciones y en diferentes condiciones de cultivo, es fundamental que se lleven a cabo proyectos de investigación sobre este tema en los próximos años.

1.3.4. Duración de la plantación

El tiempo que puede durar una cepa no ha sido todavía suficientemente estudiado, ya que la mayoría de las plantaciones existentes son jóvenes y no se ha llevado a cabo un elevado número de recepes. Además, precisar la vida productiva de una plantación es difícil, ya que dependerá del genotipo y de los tratamientos culturales que se realicen. En lo que sí parecen coincidir todos los estudios es en que la producción disminuye con los sucesivos recepes, por ejemplo Nassi et al. (2010) al emplear turnos de 1, 2 y 3 años en plantaciones de chopo, mostraron que la producción disminuía en los sucesivos

ciclos y que eran necesarios menos recepes para iniciase este descenso productivo en los turnos más largos. Por su parte, Armstrong et al. (1999) también concluyeron que el rendimiento de los chopos durante el segundo ciclo de dos años era sustancialmente menor al obtenido en el primero, mientras que Bacher (1998) se atreve a estimar que la vida de las plantaciones de chopo podría estar en torno a los 25 años, permitiendo realizar unas 8 cortas con turno de tres años

La disminución de la producción con el paso de los años está asociada a un aumento de la mortalidad. Aunque es difícil que la densidad de plantación afecte a la mortalidad durante el primer ciclo de cultivo, si que suele afectar en las siguientes rotaciones, bajando la supervivencia a causa de la competencia que se establece por la luz. Además, la mortalidad de los arboles también se incrementa tras las cortas debido a la menor resistencia presentada por las cepas tras el recepe a plagas y enfermedades (Trinkaus, 1998). La mortalidad tras 6-7 cortas rondó el 80% en el trabajo de Nassi et al. (2010) llevado a cabo con chopos, mientras que estuvo entre el 50% y el 75% tras 10 cortas anuales en el trabajo de Kopp et al. (2001) realizado con chopos y sauces. En este último trabajo además se vio que la mortalidad de las cepas puede verse afectada por la fertilización de las parcelas, ya que esta aumenta la frondosidad de las plantaciones.

El rendimiento de las parcelas también se verá afectado por la pérdida de velocidad de crecimiento, debido a que con el paso de los años desaparece el crecimiento explosivo tras el recepe típico de individuos más jóvenes. El trabajo de Al Afas et al. (2008) muestra las producciones de chopo durante tres rotaciones y un total de 11 años, observándose que el incremento de la producción tras el recepe se hace menos pronunciado con los sucesivos ciclos.

1.3.5. Número de rebrotes

El número de rebrotes que se producen tras la corta procede de yemas laterales en el tallo, las cuales pueden ser preexistentes o provocadas por el corte (adventicias); además en algunas ocasiones también se producen rebrotes de raíz (renuevos), los cuales son habituales por ejemplo en la Robinia. El número de rebrotes dependerá de la especie, pero también de otros factores culturales, como el tamaño de la cepa, la altura de corte o la relación raíz/tallo anterior a la corta. Laureysens et al. (2003) mostraron en chopos una correlación positiva del número de rebrotes y el tamaño de la planta antes de la corta, mientras que el trabajo de Ashby et al. (1993) con arces reflejó un aumento del número de rebrotes al aumentar las dimensiones del sistema radical. Sin embargo, también hay investigaciones que afirman que el rebrote de las plantas de mayor tamaño se puede ver reducido a causa del mayor grosor de la corteza (Khan y Tripathi, 1986). En cuanto a la altura de corta, se observó que si se hacía a una altura de 5 centímetros el número de rebrotes era menor que a 10 cm, mientras que si se cortaba a una altura de 25

cm, el número de brotes se mantenía pero estos en su mayoría procedían de la parte media y baja del tocón en vez de brotar en la parte superior (Ashby et al., 1993)

La producción de un número elevado de rebrotes, es una de las características fundamentales que se le pide a un cultivo energético leñoso, si bien hay que tener en cuenta que si hay un número muy elevado de pequeños tallos se obtendrá un mayor porcentaje de corteza en la biomasa final. Por este motivo, algunos trabajos señalan que es conveniente seleccionar genotipos que no generen un número excesivo de brotes (Iriarte, 2008), mientras que otros no consideran esta problemática importante ya que el número de brotes tras las sucesivas cortas va descendiendo, principalmente a causa de la competencia por la luz (Weiner and Thomas, 1996), quedando solamente los denominados tallos dominantes (Laureysens et al., 2003; Al Afas et al., 2008).

Con el fin de favorecer el desarrollo de las yemas latentes situadas en la base del tallo en ocasiones se ha optado por realizar un primer recepe al final del primer periodo vegetativo. Esta técnica a primera vista parecería ventajosa, sin embargo algunos de los ensayos realizados han mostrado que la producción global de la plantación no aumenta (Proe et al., 1999; Fernández et al., 2010). También ha habido investigadores que han analizado el comportamiento de las plantas leñosas cuando se eliminan los brotes secundarios, manteniendo únicamente el brote dominante, sin que se encontrasen tampoco en este caso diferencias significativas en la producción de biomasa (Timothy et al., 1995).

1.4. Principales especies leñosas empleadas en bioenergía

Aunque el número de especies que podrían emplearse como cultivos energéticos es muy amplio, en muchos casos todavía no ha sido estudiada su respuesta en silvicultura de corta rotación. El chopo y el sauce son quizá las especies con las que más se ha trabajado en los últimos años. Estas especies pueden crecer en un amplio rango de temperaturas pero necesitan gran cantidad de agua para su desarrollo, lo que limita su implantación en muchas zonas, donde las disponibilidades hídricas durante el periodo estival son escasas. Por ello, en los últimos años se han comenzado a estudiar otras especies de rápido crecimiento pero con menores requerimientos hídricos, como pueden ser la Robinia (*Robinia pseudoacacia* L.) o el olmo de Siberia (*Ulmus pumila* L.), que además son capaces de adaptarse a un amplio abanico de condiciones edafoclimáticas, por lo que se les considera especies prometedoras en el campo de los cultivos energéticos.

1.4.1. El chopo (*Populus* spp.)

Gracias a su rápido crecimiento y facilidad de multiplicación por estaquilla, los chopos han sido utilizados por el hombre desde la antigüedad para leña, forraje, camas para los animales o en la construcción. El chopo pertenece a la familia de las Salicáceas, la cual tiene preferencia por las zonas húmedas, ocupando principalmente zonas de rivera o llanuras inundables. Junto con los chopos (genero *Populus*) en la familia de las Salicáceas se encuentran los sauces (genero *Salix*), estando ambos géneros ampliamente distribuidos por todo el hemisferio Norte. El género *Pópulus* cuenta con 29 especies, de las que solamente 5 ó 6 son utilizadas en populicultura.

En los últimos años el cultivo del chopo ha crecido fuertemente en Europa, ya que las autoridades de la Unión han fomentado la reconversión de terrenos tradicionalmente agrícolas en terrenos con cultivos más extensivos. Estas nuevas plantaciones se han dedicado principalmente a la obtención de madera para la industria del desarrollo, pero también son cada vez más frecuentes las plantaciones con fines energéticos. Según el MAGRAMA en el año 2008 había en España algo más de 135.000 hectáreas plantadas de chopo, de las cuales más del 50% se encontraban en el valle del Duero y casi otro 25% en el valle del Ebro. En España se encuentran tres especies autóctonas: *P. alba*, *P. trémula* y *P. nigra*, pero debido a la gran predisposición que presenta la especie para hibridarse, podemos encontrar una gran variedad de formas intermedias. Además, para la mejora genética también se han generado otros cruces artificiales, obteniéndose buenos resultados en España con el *P. x euroamericana*, resultante del cruce de *P. deltoides* x *P. nigra* y con el *P. x interamericana* obtenido cruzando *P. trichocarpa* x *P. deltoides* (Ciria, 2009).

Los aspectos morfológicos y fisiológicos del género *Populus* más destacables son:

- Puede alcanzar los 30 m de altura, presenta un tronco recto con corteza que en principio es lisa y de color gris verdoso y que con el paso de los años se oscurece y agrieta.
- Su sistema radicular es generalmente superficial.
- Sus hojas tienen el limbo ensanchado lobulado o finamente aserrado y el peciolo largo, lo que les proporciona una gran movilidad; además el género se caracteriza por presentar un gran heteromorfismo foliar, incluso entre las hojas de un mismo ejemplar (**Figura 1.4.1.**).
- Tiene flores masculinas y femeninas, las cuales se encuentran en arboles diferenciado y se disponen en grupos colgantes o amentos.
- El fruto aparece en forma de capsulas verdes y al madurar libera diminutas semillas recubiertas de una pilosidad algodonosa que favorece su diseminación.
- Poseen gran velocidad de crecimiento, lo que hace que no sean especies especialmente longevas, las cuales de forma natural no suelen sobrepasar los 80-100 años.

- Su madera es blanda, ligera y fácil de trabajar.

Figura 1.4.1. Morfología de las hojas de diferentes clones de chopo.

Los chopos son colonizadores y tienen una gran capacidad de reproducción tanto sexual (semillas) como asexual (estaquillas del tallo, brotes de cepa, etc.), si bien generalmente su multiplicación se realiza de manera asexual mediante el uso de estaquillas, lo que generará plantas genéticamente idénticas o clones, que darán homogeneidad a las plantaciones.

El chopo se adapta a un amplio abanico de climas siempre y cuando la disponibilidad de agua sea alta, pudiéndose encontrar en España en un clima atlántico subhúmedo, pero también en un clima continental semiárido (Allué, 1966). Según Bacher (1998) el consumo de agua de los chopos podría estar en torno a los $48 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ al día, lo que supondría a lo largo del periodo vegetativo unos 7000 m^3 , por tanto en aquellas zonas de la geografía española donde las precipitaciones sean insuficientes y la planta no pueda extraer este volumen de agua de la capa freática, será necesario aportar agua de riego. Parfitt y Royle (1996) indican que será necesario aplicar agua de riego en aquellas zonas en las que la precipitación anual no supere los 600 mm. En cuanto a las temperaturas, su temperatura óptima de crecimiento está entre los 15°C y los 25°C , limitándose su desarrollo cuando las temperaturas bajan de los 10°C o superan los 30°C (Bacher, 1998). En España, se puede encontrar tanto a nivel del mar como en altitudes de en torno a los 1000 m, donde las heladas invernales son frecuentes. Por otra parte, los *Populus* son especies heliófilas, es decir con gran exigencia de luz, con lo cual toleran mal la proximidad de otras especies que puedan sombrearles, especialmente durante las primeras fases de su desarrollo.

En cuanto a los suelos, el chopo prefiere que posean texturas poco arcillosas, desarrollándose mejor en suelos con texturas francas o franco-arenosas, las cuales evitan los encharcamientos frecuentes que provocarían asfixia radicular pero permiten cierta capacidad de retención de agua (Sixto et al., 2010). No se trata de especies demasiado exigentes en nutrientes, por lo que pueden encontrarse en suelos pobres, si bien no cabe duda de que un suelo fértil favorecerá su desarrollo, indicando algunos autores que es conveniente que el porcentaje de materia orgánica supere el 2% (Sixto et al., 2010). El pH debe encontrarse próximo a la neutralidad, entre 6 y 8; mientras que la salinidad es un factor limitante. Cabe reseñar que debido a la amplia variedad de clones de chopo existentes, se pueden encontrar genotipos con una mejor o peor adaptabilidad a los parámetros edáficos y ecológicos descritos anteriormente.

1.4.2. El olmo de Siberia (*Ulmus pumila* L.)

El olmo de Siberia (*Ulmus pumila* L.) es una especie originaria de Asia, encontrándose ampliamente distribuida por China, Corea, Mongolia y Este de Rusia. Debido a su gran capacidad de adaptación ha sido introducida en muchas otras regiones del mundo, como por ejemplo Estados Unidos, donde fue introducido hacia 1860 (Moore, 2003) y España donde llegó ya en el siglo XVI como planta ornamental, extendiéndose de forma natural por buena parte de la geografía de la Península Ibérica (Cogolludo-Agustín et al., 2000), especialmente en zonas escarpadas con suelos pobres. Actualmente ocupa algunos de los lugares en los que anteriormente habitaba el *Ulmus minor*, especie de olmo que se ha visto fuertemente mermada por la grafiosis en los últimos años.

El olmo de Siberia puede alcanzar los 25 metros de alto en sus países de origen, si bien no suele superar los 10-12 metros en España. El tallo está ramificado a media altura, presentando una copa ancha y globosa, pero observándose también pequeñas ramas bajas laterales. Sus hojas son caducas, simples, alternas, de forma ovada elipsoidal y borde dentado, de color verde más claro por el envés y no superan habitualmente los 6-8 cm de longitud (**Figura 1.4.2.**). Por medio de la hoja se diferencia de otros olmos como el *Ulmus minor* o el *Ulmus gabra*, ya que el olmo de Siberia a diferencia de los otros suele tener la base de la hoja más o menos simétrica. La floración es temprana, pudiéndose realizar en algunos puntos de la geografía española a comienzos de febrero, coincidiendo o siendo incluso previa a la aparición de las hojas. Sus flores hermafroditas tienen el color del cáliz verde, diferenciándose diminutos sépalos de color rojizo. Inmediatamente después de la floración comienza la maduración del fruto, que es una sámara (parte endurecida que contiene la semilla), el cual está envuelto por un ala que facilitará su dispersión a través del viento. La Samara es de color blancuzco y no supera los 10-14 mm de longitud (Barbour y Brinkman, 2002).

Figura 1.4.2. Hojas (izquierda) y sámaras (derecha) del olmo de Siberia.

El olmo de Siberia es considerado el más resistente de los olmos, pudiéndose desarrollar en zonas con inviernos fríos y veranos secos y calurosos. Según un estudio realizado en China, esta especie es capaz de desarrollarse en zonas con precipitaciones medias anuales menores de 400 mm en las que el contenido de agua del suelo es inferior al 15% y con temperaturas extremas, con una media de las mínimas de enero de -11,1 °C y una media de las máximas en julio de 25,1 °C (Li et al., 2007). Por lo tanto, es una especie que podría adaptarse perfectamente a áreas del interior de España con climas mediterráneos continentalizados. Respecto al suelo, los prefiere de buena calidad pero también crece en suelos pobres (Moore, 2003), se desarrolla perfectamente en suelos arenosos y, a diferencia de otras especies empleadas para bioenergía como el chopo, no soporta el encharcamiento durante largos periodos de tiempo, (Louck y Keen, 1973). El olmo de Siberia es bastante tolerante al viento, siendo empleado en Estados Unidos como cortavientos para reducir la erosión, aumentar la producción agrícola y proteger el ganado (Moore, 2003).

Tanto el *Ulmus pumila* como los híbridos obtenidos con otros olmos presentan una mayor resistencia a la grafiosis, enfermedad que ha causado la muerte de la mayor parte de los olmos autóctonos de la Península Ibérica (*Ulmus minor* y *Ulmus gabra*) en los últimos años, lo que ha propiciado que el olmo de Siberia se haya empleado en programas de reproducción y mejora del olmo en España (Cogolludo-Agustín et al., 2000).

El olmo de Siberia en la naturaleza se reproduce habitualmente de forma sexual, a diferencia de otras especies de olmo que emplean más la propagación vegetativa (Fernández et al. 2000), si bien es capaz de hacerlo tanto mediante sámaras como por estaquillas. La facilidad de propagación, adaptabilidad y rápido crecimiento, hacen que el olmo Siberiano presente buenas características para su uso como cultivo energético, pero a su vez ha propiciado que sea considerada una especie nociva en el estado de Nuevo México en Estados Unidos (Moore, 2003) y como planta invasora en otros 14

estados Norteamericanos. El olmo compite con la vegetación autóctona, especialmente en zonas donde esta es escasa o ha sido alterada. El departamento de agricultura estadounidense recomienda realizar controles de la población mediante métodos físicos o químicos y prohíbe su cultivo en diferentes estados del sudoeste. Es estas áreas, la importante masa existente de olmo de Siberia podría ser extraída para obtener gran cantidad de biomasa, controlando a su vez la propagación de la especie. Otras plantas consideradas invasivas como el kudzu (*Pueraria montana* var. *lobata*) están siendo objeto de estudio para conseguir extraer su biomasa a la vez que se controla su población (Sage et al., 2009).

En España, las primeras investigaciones llevadas a cabo con el olmo de Siberia como cultivo energético fueron las realizadas por el grupo de agroenergética de la Universidad Politécnica de Madrid, destacando entre los trabajos realizados al respecto la tesis doctoral de Iriarte (2008).

1.5. Tratamientos culturales en las parcelas de cultivos energéticos leñosos en corta rotación.

1.5.1. Preparación del terreno

Los trabajos de preparación del terreno se realizan para posibilitar la correcta implantación del cultivo, ya que estas operaciones incrementarán la disponibilidad de agua y nutrientes para la planta (Mitchell, 1992). Las actividades más importantes que se podrían desarrollar son las siguientes:

1.5.1.1. Abonado de fondo

Para determinar si es necesario realizar un aporte de nutrientes se deberá realizar un análisis del suelo, evitando tratamientos innecesarios que tienen un alto coste económico y medioambiental. Algunos autores han reseñado, incluso, que este abonado de fondo podría no ser necesario, ya que durante el primer año los requerimientos nutritivos de las plantas van a ser menores y el sistema radicular está poco desarrollado, perdiéndose por tanto el abono aportado, especialmente si se trata de abono nitrogenado (Ciria, 1998). Sin embargo, no se podrá prescindir de este aporte de nutrientes en suelos poco fértiles, en donde se podría ver comprometida la supervivencia de los árboles durante el primer año. En caso de realizar el abonado, este se deberá suministrar antes de realizar el laboreo, para que quede debidamente enterrado.

1.5.1.2. Subsulado

Consiste en fragmentar los horizontes profundos endurecidos y se realiza mediante el empleo de una reja o un arado subsolador, pudiendo alcanzar hasta 1 m de profundidad.

Se debe realizar cuando el suelo esté lo suficientemente seco para que se produzca la fragmentación. Facilita el descenso del agua a profundidades mayores desarrollándose de esta forma más fácilmente el sistema radicular.

1.5.1.3. Labores de alzado

Se produce un volteo de la superficie del terreno, mediante el empleo de un arado. Esta tarea aumenta la porosidad del terreno y con ello la retención de agua, y permite enterrar el abonado de fondo en caso de que se haya realizado.

1.5.1.4. Gradeo

Esta labor se suelen realizar justo antes de la plantación mediante el uso de gradas o cultivadores. Con ella se pretende romper la costra superficial que se haya podido formar y obtener un suelo mas mullido y uniforme, a la vez que se eliminan las malas hierbas que hayan surgido desde que se realizaron las labores en profundidad.

1.5.1.5. Control de malas hierbas

El control de la vegetación se hace necesario en la mayoría de los cultivos energéticos leñosos, ya que no toleran bien la competencia de malas hierbas pudiéndose producir una fuerte reducción de la producción (Tubby y Armstrong, 2002). Las malas hierbas disminuyen la cantidad de agua y nutrientes disponibles para las leñosas y además establecen una fuerte competencia por la luz y el espacio. Según el trabajo de Sixto et al. (2001) con chopos, si no se efectúa un adecuado control de malas hierbas se podría perder casi completamente la plantación. Los trabajos de control de malas hierbas se deberían iniciar durante la preparación del terreno, especialmente si se detecta la presencia de especies perennes difícilmente eliminables posteriormente, para ello se pueden usar técnicas de laboreo o bien herbicidas como el glifosato, ampliamente empleado para este fin (Tubby y Armstrong, 2002).

1.5.2. Plantación

1.5.2.1. Material vegetal

La plantación de los cultivos energéticos leñosos puede realizarse o bien a partir de semillas o bien con estaquillas, dependiendo de la mayor o menor capacidad de las diferentes especies para reproducirse por cada uno de estos métodos. En el caso de utilizar semillas se originará generalmente un solo tallo, mientras que pueden generarse varios brotes en caso de emplear estaquillas.

El establecimiento de la plantación mediante semilla puede realizarse mediante la siembra directa o mediante plantones generados anteriormente en vivero. El primer método es más barato, pero se conseguirá una menor tasa de éxito, especialmente en

áreas con bajos recursos hídricos. En el caso de la reproducción por estacilla, estas pueden proceder del tallo o de la raíz, siendo más habitual emplear tallos al resultar más sencilla su obtención. Las estaquillas pueden proceder de plantas sin recepar o que ya hayan sido recepadas, estarán desprovistas de ramas y brotes y tendrán una longitud de entre 20-30 cm y un grosor de 1-3 cm (Sixto et al, 2010).

Una elección adecuada del material vegetal a emplear es fundamental a la hora de obtener buenas producciones, debiendo utilizarse diferentes especies o híbridos en función de las características del lugar de cultivo. En el caso del género *Populus* la elección es complicada, ya que se cuenta con numeroso material vegetal debido a su gran capacidad de hibridación, si bien muchos de estos clones ya han sido evaluados en España (Sixto et al., 2009a; Sixto et al., 2009b). A pesar de los esfuerzos realizados en la mejora genética del chopo, todavía hay puntos por mejorar, como el contenido en lignina, la resistencia a algunas plagas o la tolerancia a herbicidas; por ello en la actualidad, bien mediante mejora clásica o bien mediante biotecnología, se sigue trabajando en la obtención de mejores materiales.

1.5.2.2. Método de plantación

La fecha en que se establecerá el cultivo variará en función de las características climáticas de la zona, siendo fundamental hacer una correcta elección de esta fecha para conseguir un buen éxito en la implantación. En el caso de las estaquillas es importante el almacenamiento de las mismas a temperaturas bajas (entre -2 y 5 °C) e intentando evitar la desecación (Senerby-Forsse et al., 1993); además antes de la plantación se deberá favorecer el enraizamiento sumergiéndolas en agua durante al menos 1-2 días. Igualmente, es aconsejable la inmersión de las estaquillas en una solución de insecticida y fungicida para prevenir daños bióticos.

Las plantaciones en alta densidad pueden realizarse de manera manual, pero el proceso resulta económicamente muy costoso, por lo que la mecanización en plantaciones comerciales se muestra necesaria si queremos obtener un balance económico positivo. En el caso de emplear plantones se pueden emplear máquinas ahoyadoras, aunque estas endurecerán las paredes del hoyo, lo que puede dificultar el enraizamiento. También se utilizan en algunas ocasiones máquinas abresurcos y subsoladores o incluso maquinaria diseñada específicamente para instalar plantas a raíz desnuda o con cepellón (Iriarte, 2008).

Si se emplean estaquillas habrá que tener en cuenta que no se deberá realizar agujero previo a la plantación para evitar así bolsas de aire, las yemas deberán orientarse hacia arriba y generalmente la estacilla debe sobresalir tan solo de 2 a 4 cm del suelo, pudiendo quedar incluso enterrada en zonas con alto riesgo de heladas (Sixto et al, 2010). En la actualidad se cuenta principalmente con dos tipos de máquinas para plantar estaquillas: por un lado están aquellas máquinas utilizadas tradicionalmente con otros

finés a las que se les realizan pequeñas modificaciones, como por ejemplo las empleadas en horticultura o fruticultura, y por otro lado están las maquinarias específicas para plantación de leñosas en alta densidad, las cuales suelen presentar mayores rendimientos (**Figura 1.5.1.**). Estas máquinas pueden ser alimentadas manual o mecánicamente y presentan inyectoros hidráulicos dispuestos radialmente para introducir la estacilla en el suelo. En algunos casos pueden plantar 2 o 3 filas simultáneamente y sus rendimientos pueden oscilar entre las 0,2 ha/hora y las 1,2 ha/hora (Sixto et al, 2010).

Figura 1.5.1. Maquinaria para plantación de estaquillas de leñosas en alta densidad en el CEDER-CIEMAT

1.5.3. Trabajos de mantenimiento

1.5.3.1. Reposición de marras

La muerte de las plantas durante el año de implantación se produce principalmente por tres causas: por el mal estado de los plantones o estaquillas, por una mala elección de la fecha de plantación o a causa de una fuerte competencia de malas hierbas. En algunos casos, si la tasa de mortalidad es alta (mayor del 10%), se procede a la reposición de los individuos muertos, si bien la mayoría de autores no recomiendan esta práctica, debido a que tiene un coste económico muy elevado al tener que realizarse en la mayoría de los casos manualmente; además, al tratarse de plantaciones de alta densidad, los nuevos ejemplares tendrían mayor probabilidad de fracasar al encontrarse en desventaja respecto al resto de plantas más desarrolladas.

1.5.3.2. Control de malas hierbas

Durante el primer periodo vegetativo será muy importante realizar controles de malas hierbas, mientras que en años posteriores, dependerá de la densidad de plantación y características edafoclimáticas en las que se desarrolle la plantación (Buhler et al.,

1998). Si la plantación está próxima al cierre de copas, los trabajos para eliminar malas hierbas no serán necesarios en años posteriores, ya que la plantación por si misma será capaz de controlarlas Sixto et al. (2001). El primer año tras la corta, puede ser también necesario realizar control de malas hierbas para favorecer la instalación de los nuevos rebrotes.

El control de malas hierbas puede realizarse mediante métodos manuales, mecánicos y químicos, aunque las escardas manuales son claramente antieconómicas y se deberá intentar prescindir de ellas en plantaciones comerciales. Los métodos mecánicos presentan también algunos inconvenientes, como la imposibilidad de eliminar las malas hierbas más próximas a la planta o la pérdida de agua al remover el suelo (García-Baudín y Montero, 1996). El método más moderno y eficaz es el uso de herbicidas, si bien presentan el inconveniente de que en su mayoría son herbicidas totales que pueden afectar también a las especies de cultivo, por ello, habrá que estudiar la época del año en la que se aplican y se tratará de evitar el contacto del cultivo energético leñoso con el herbicida. En la actualidad, mediante modificaciones genéticas se está consiguiendo tolerancia de algunas especies a los herbicidas, siendo diversos los trabajos ya realizados con chopo. (Confalonieri et al., 2000; Gullner et al., 2001).

Los compuestos empleados como herbicidas son numerosos y difieren de unos países a otros (Sixto et al., 2007). En España las materias autorizadas para su uso en cultivos energéticos leñosos son principalmente tres: oxifluorfen, glifosato y glufosinato de amonio (MAGRAMA, 2014). El oxifluorfen es un herbicida de preemergencia que elimina un amplio abanico de monocotiledóneas y dicotiledóneas, mientras que los otros dos son herbicidas totales de postemergencia, siendo el glufosinato de amonio un herbicida de contacto y el glifosato sistémico.

1.5.3.3. Abonado

El abonado es uno de los tratamientos más controvertidos, ya que en los numerosos estudios llevados a cabo sobre la fertilización en SRF se han encontrado resultados muy diversos. Por ejemplo, Geyer y Melichar (1986) no encontraron diferencias significativas al aplicar durante un año una dosis de 200 kg de Nitrógeno, recomendando no realizar este abonado por una posible contaminación de las aguas subterráneas. En la misma dirección apunta el trabajo de Scholz y Ellebrock (2002), que al estudiar diez cultivos energéticos diferentes en Alemania solo observaron una ligera disminución de la producción, tras seis años de crecimiento, al no aplicar fertilización adicional, siendo esta reducción casi inexistente en el caso del chopo. Mientras que Kopp *et al.* (2001), achacan el reducido efecto de la fertilización sobre sauces a una mayor mortalidad en las plantaciones fertilizadas, ya que estas alcanzan una alta frondosidad más rápidamente.

Sin embargo, entre los también numerosos estudios que reflejan un efecto positivo de la fertilización sobre la producción, se encuentra el de Coleman et al. (2006), que indica un aumento del rendimiento del chopo tras tres años de cultivo de entre un 43% y un 82% al aplicar Urea o un fertilizante complejo. Christersson (2006) muestra que la producción de chopo en Suecia se dobló con el abonado, mientras que Bowersox et al. (1991) también apuntan en la misma dirección, pese a mostrar en este caso una mayor mortalidad en las parcelas fertilizadas que en las parcelas control. Guidi et al. (2008) en Italia fueron todavía más allá, al indicar que los chopos y sauces tras dos años de cultivo y sin restricciones en cuanto a las necesidades hídricas, pueden multiplicar por más de cuatro su producción en parcelas adecuadamente fertilizadas.

La necesidad de un aporte adicional de nutrientes al suelo y, en caso de realizarlo, la dosis a emplear, en principio, va a depender del tipo de suelo y del contenido de nutrientes que tenga; por ello se recomienda realizar siempre un análisis de suelo antes de la plantación. Según Domínguez (1997), los contenidos de Nitrógeno, Fosforo y Potasio asimilables que se necesitarían en el suelo para un correcto desarrollo de la plantación estarían en torno a 50, 30 y 100 ppm respectivamente. A grandes rasgos la dosis de fertilizante que se deberá aportar al cultivo vendrá determinada por las extracciones que se produzcan tras la cosecha de la biomasa y por las inmovilizaciones de nutrientes en las raíces. Por otro lado, habrá que tener en cuenta otros factores como el banco de semillas existente, ya que el abonado puede ser contraproducente al generar un fuerte desarrollo de malas hierbas. Una vez realizado un adecuado abonado de fondo antes de la implantación, en años posteriores las plantas necesitaran especialmente que se les aporte Nitrógeno, ya que es un elemento que se pierde fácilmente por lixiviación. Tras la corta suele ser habitual aportar de nuevo fosforo y potasio junto con el nitrógeno.

En cuanto a la maquinaria a emplear, las abonadoras utilizadas tradicionalmente para cultivos herbáceos, que son las que se pueden adquirir más fácilmente en el mercado, solo pueden emplearse el año posterior a la cosecha. Si es necesario abonar mientras esté la plantación en pie, habrá que emplear maquinaria diseñada específicamente para estos cultivos leñosos, necesitándose calles sin plantar cada 35-40 metros para que estas abonadoras puedan transitar por la parcela. En caso de plantaciones con riego por goteo se podría recurrir a la fertirrigación para poder distribuir el abono por la parcela de manera más sencilla (Ciria, 2009).

1.5.3.4. Riego

La mayor parte de los cultivos energéticos leñosos establecidos en clima Mediterráneo necesitaran de un aporte adicional de agua para que su desarrollo no se vea limitado, ya que además de contar con precipitaciones escasas, estas se distribuyen de manera poco uniforme, presentado generalmente un periodo seco prolongado durante el verano. El

aporte del agua puede realizarse principalmente mediante tres sistemas de riego: por gravedad, por aspersión y por goteo.

El riego por gravedad es el que requiere un desembolso inicial menor, pero posteriormente será el que permita una menor eficiencia en el uso del agua; además se produce un mayor lavado de nutrientes que con otros sistemas. El riego por aspersión resulta inadecuado para estas plantaciones, debido a la altura que alcanzan en poco tiempo los SRF (Sixto, 2010). Por lo tanto, pese a su mayor coste inicial, el sistema que se está utilizando cada vez más en las plantaciones de leñosas en corta rotación es el riego por goteo, el cual permite realizar riegos frecuentes aplicando poco volumen en cada uno de ellos, reduciéndose de esta forma las pérdidas por drenaje y evaporación. Además, este sistema permite la fertirrigación, con las ventajas que esto supone. Como inconveniente cabría citar la incomodidad que representan los tubos de goteo, si no están enterrados, a la hora de realizar la corta.

1.6. Las necesidades hídricas de los cultivos energéticos leñosos

Que las plantas tengan cubiertas sus necesidades hídricas es fundamental para evitar el ataque de plagas y enfermedades y obtener una buena producción (Sixto et al., 2007), sin embargo, aplicar agua en exceso, aparte de generar unos elevados costes económicos y ambientales, no supondrá un aumento en la producción (Sixto et al., 2001). Además, si la cantidad de agua con la que cuentan las plantas es muy alta, incluso se podrían generar encharcamientos, los cuales no son bien tolerados por algunas especies, como por ejemplo el olmo de Siberia o algunos clones de chopo (Louck y Keen, 1973; Neuman *et al.*, 1996). En caso de encharcamientos prolongados se reducirá la respiración de las raíces aumentando la resistencia a la absorción y al transporte de agua (Smit y Stachowiak, 1988) aun en las especies que presentan cierta tolerancia, provocando el amarillamiento y caída de las hojas (Lui y Dickmann, 1992) y en algunos casos incluso la muerte de la planta (Padró y Orensanz, 1987). Por lo tanto, resulta fundamental realizar un cálculo preciso de la cantidad de agua que necesitan las plantaciones.

La información sobre las necesidades de riego en SRF es escasa, ya que en buena parte de los países en los que se llevan a cabo, las plantaciones no requieren aportes adicionales de agua, al ser las precipitaciones a lo largo del periodo vegetativo suficientes para garantizar la supervivencia de la plantación y unos rendimientos adecuados. En otras zonas, como por ejemplo el norte de Italia, donde son frecuentes los SRF, solo se aplican riegos puntuales (por gravedad) durante el periodo estival siempre y cuando este sea bastante seco, recomendando no aplicarlos, debido a su alto coste, en caso de que las precipitaciones durante el periodo vegetativo superen los 300-

350 mm (Bergante 2010). A parte de por la falta de información, la cantidad de agua de riego que es necesario aplicar resulta difícilmente estimable al depender del sistema de riego empleado, de las características edafoclimáticas y de las condiciones de cultivos (densidad, fertilización, etc.).

1.6.1. Estudios llevados a cabo anteriormente

En España, la información sobre el agua requerida por las especies leñosas susceptibles de ser empleadas como SRF es escasa, siendo el chopo la especie que ha sido más estudiada. Según estos trabajos las necesidades hídricas del chopo estarían entre los 2.000-4.000 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en Castilla y León (González-Antoñanzas, 1983) y podrían alcanzar los 4.000-6.000 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en Aragón y la Rioja (Padró y Orensanz, 1987; Garavilla, 2004).

En otros países tampoco son muchos los estudios llevados a cabo sobre este tema, debiendo destacar el trabajo de Walsh et al. (1996) en EE.UU que trata de encontrar los clones de chopo que mejor se adaptan a diferentes disponibilidades hídricas, estableciendo para ello 12 clones de chopo bajo tres regímenes hídricos diferentes: sin riego (aunque con unas precipitaciones más altas que en el clima Mediterráneo), con una humedad del suelo cercana a la capacidad de campo y con un aporte hídrico intermedio. Como resultado obtuvo que tras tres años de crecimiento la producción con aportes hídricos suplementarios podía duplicarse en algunos clones, mientras que en otros esta variaba muy poco, incluso obteniéndose resultados ligeramente mejores en las parcelas menos regadas. Por su parte, Hansen (1988) estableció un clon de chopo en seco y con tres diferentes aportes hídricos hasta alcanzar la Capacidad de Campo, obteniendo tras cinco años de cultivo un rendimiento un 30% superior en las parcelas mas regadas. Sin embargo, hay que destacar que esta diferencia de producción era mayor a los tres años, reduciéndose posteriormente debido a la mayor mortalidad de individuos en las parcelas que percibieron mayor cantidad de agua. Posteriormente, Strong y Hansen (1993) establecieron dos clones de chopos en seco y con un aporte de agua que mantenía el suelo cerca de la Capacidad de Campo, obteniendo con densidades menores a 10.000 pl ha⁻¹ mejores rendimientos en las parcelas irrigadas, pero no sucedió lo mismo en las parcelas de mayor densidad. Según los autores, esto podría deberse a que en densidades mayores el cierre de copas se produce antes, lo que impide la competencia de malas hierbas, cosa que no ocurre cuando mayor sea el espaciamiento, siendo necesario para conseguir unos buenos resultados o bien realizar un control de la flora arvense o bien aplicar riegos.

Más recientemente, Coyle et al. (2005) implantaron dos clones de chopo y plátano americano en una zona estadounidense con una precipitación de 800 mm anuales, estableciendo parcelas en seco y parcelas a las que añadieron 5 mm de agua diariamente. El resultado mostró producciones sustancialmente mayores en las parcelas regadas, las cuales se hacían todavía mayores en caso de aplicar una adecuada

fertilización, incluso triplicándose el rendimiento. Este trabajo, además, estimó la biomasa aérea y la radicular, concluyendo que las parcelas con mayores aportes hídricos presentaban un menor porcentaje de raíces. Otros estudios sobre el comportamiento de las plantas ante el estrés hídrico han señalado que la producción de biomasa (altura y diámetro de tronco, biomasa total, número de hojas, área foliar total) desciende ante la escasez de agua, mientras que se produce un incremento significativo en las relaciones raíces finas/raíces totales, peso radical/área foliar, peso radical/peso parte aérea (Marron et al., 2002; Yin et al., 2005; Zhang et al., 2004). Se citan igualmente entre los mecanismos de adaptación, el cierre de estomas y el aumento de la eficiencia en el uso del agua (EUA).

1.6.2. La evapotranspiración potencial

Para estimar el agua que se necesita aplicar a una parcela, uno de los métodos tradicionalmente más empleados es el cálculo de la evapotranspiración de una especie en condiciones estándar de cultivo (ET_c), es decir en parcelas de gran tamaño libres de enfermedades y con sus necesidades hídricas completamente cubiertas (Allen et al., 1998). Para estimar esta evapotranspiración se deben conocer las precipitaciones registradas en la parcela y, en caso de que haya sido necesario aplicar agua de riego, también el volumen de agua suministrado; además, se deberá estimar la cantidad de agua drenada, la cual puede obtenerse mediante la colocación de lisímetros. La suma de precipitaciones y agua de riego menos el volumen de agua drenada proporciona la Evapotranspiración de un cultivo.

Una vez conocida la ET_c será muy útil calcular el factor K_c , para lo que se debe conocer a su vez la evapotranspiración de referencia (ET_0) en una determinada zona, la cual se puede calcular mediante el método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). El coeficiente de cultivo K_c será el cociente entre ET_c/ET_0 . Este coeficiente se ha utilizado tradicionalmente como referencia para caracterizar las necesidades hídricas de un determinado cultivo, por ejemplo son numerosos los trabajos realizados para la vid, ya que en esta especie ajustar la cantidad de agua aportada es fundamental para la obtención de un vino de calidad (Pérez, 2002; Junquera, 2011). En el campo de los cultivos energéticos leñosos destaca el trabajo realizado por Guidi et al. (2008), en el que se estimó mediante lisímetros la evapotranspiración para sauces y chopo, establecidos con una densidad de 10.000 pl ha⁻¹, en la provincia de Pisa en Italia. Las mediciones las realizó durante dos años consecutivos, obteniendo durante el primer año una evapotranspiración para el chopo de 590 mm en parcelas no fertilizadas (NF) y de 725 mm en fertilizadas (F), y para el sauce de 620 mm (NF) y 1190 mm (F). Mientras que el segundo año la evapotranspiración del chopo fue de 710 mm (NF) y 1100 mm (F) y la del sauce 890 mm (NF) y 1790 mm (F). Como puede observarse, la evapotranspiración es siempre mayor en los sauces que en los chopos, la fertilización

hace que aumente el agua consumida y durante el segundo periodo vegetativo se registran mayores valores al contar con ejemplares de mayor tamaño. En este trabajo se calcularon también los valores K_c cada 10 días del chopo y el sauce, obteniéndose que los mayores requerimientos de agua aparecían a finales de agosto y primeros de septiembre. En España, a partir de los valores K_c de este trabajo y una vez calculada también la evapotranspiración de referencia, el trabajo de Sevigne et al. (2010) estimó que las necesidades hídricas de chopo en Girona eran de unos $4400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

1.6.3. La eficiencia en el uso del agua (EUA)

La EUA es un parámetro muy empleado para comparar especies y fenotipos, ya que presenta generalmente una alta correlación con la producción, pero en algunos casos esta correlación es positiva y en otros es negativa. En el caso del eucalipto se mostró que cuando la disponibilidad de agua era reducida, cuanto mayor era la EUA mayores producciones se obtenían (Li, 1999), lo que significaría que la EUA depende de la mayor o menor capacidad fotosintética de las plantas. Sin embargo, en un estudio llevado a cabo con chopos se concluye que la mayor EUA al reducirse el agua se produce por el cierre de estomas, lo que propicia que la producción sea menor que en las plantas con los estomas completamente abiertos (Zhang et al., 2005). Por tanto, una EUA alta puede significar en ocasiones una mejor adaptación de la especie a la escasez de recursos hídricos y con ello la obtención de una mejor producción, pero estos valores altos también podrían deberse al cierre de estomas, lo que significaría una reducción de la producción. Las especies más apreciadas son aquellas que combinan alta productividad con alta EUA, por ello este factor se están empleando, por ejemplo en chopos, para la obtención de clones más productivos (Corcuera et al., 2005).

El trabajo de Zhang *et al.* (2004) estableció clones de *Populus davidiana* de tres procedencias diferentes, un clon procedente de una zona con clima húmedo, otro de una zona seca y el último de una zona intermedia. A estos clones los regó con 5 dosis de agua diferentes desde el 100% de la capacidad de campo hasta el 20%. En todas las dosis de riego se obtuvo las mayores EUA con el clon que procedía del clima más seco. Además, se observó que al reducir el riego aumentaban las EUA, aunque a su vez disminuían también las producciones; es decir, estos altos valores de eficiencia se debían en buena parte al cierre de estomas. Mientras la producción disminuyó hasta quedarse en una cuarta parte de la obtenida con la dosis de riego más alta, la EUA solo ascendió de 2 a 3 g l^{-1} al reducir la dosis hasta el 20% de la capacidad de campo.

Los genotipos más productivos de chopo han llegado a registrar una EUA de 5 g l^{-1} (Nixon et al., 2001), mientras que otros clones, en lugares donde los recursos hídricos no suponían un factor limitante, solamente ofrecieron una EUA de poco mas de $1,5 \text{ g l}^{-1}$ (Bungart Y Hüttl, 2002). En el caso de los sauces, Martin y Stephens (2006) señalaron

que la EUA era de $1,36 \text{ g l}^{-1}$ en plantas sin estrés hídrico y sin fertilización, mientras que se alcanzaron los 5 g l^{-1} cuando las plantas eran abonadas y sometidas a estrés hídrico; además este estudio indica que la fertilización del suelo es más influyente que el estrés hídrico en el aumento de la EUA.

Se debe tener en cuenta que la EUA de los cultivos solamente puede estimarse de manera aproximada ya que es difícil conocer con exactitud el agua que han empleado las plantas, así como la biomasa total acumulada. Para el cálculo del agua empleada, en muchas ocasiones, simplemente se tienen en cuenta las precipitaciones registradas y el volumen de agua de riego aplicado, pero no se suele conocer la cantidad de agua que se ha perdido por escorrentía y percolación, así como el agua perdida por evaporación directa en el suelo. Para mejorar la precisión de la medida pueden usarse lisímetros, los cuales permiten conocer el volumen de agua perdido por escorrentía y percolación, pero no el volumen que se pierde por evaporación en el suelo; además, este sistema tiene un coste bastante elevado, por lo que no son demasiado habituales. En cuanto a la estimación de la biomasa producida, en la mayoría de los casos se considera solamente como producción la biomasa cosechada, mientras que no se emplea para el cálculo de la EUA la biomasa radicular o se realiza en todo caso una estimación, ya que al ser una biomasa que se encuentra bajo tierra es extremadamente complicado conocer cuánto se ha producido con exactitud. Con el fin de obtener un dato más preciso de la EUA, se han llevado a cabo en los últimos años mediciones a nivel foliar, pero, en este caso, la problemática radica en que al ser medidas puntuales es difícil extrapolar a un periodo de tiempo más grande (Medrano et al, 2007).

1.6.4. Potencial hídrico foliar (Ψ_f) y xilemático (Ψ_{xm})

Las necesidades de riego de un determinado cultivo se han estimado tradicionalmente mediante el cálculo del agua consumida atendiendo a factores meteorológicos o mediante el uso de instrumental que permite conocer la humedad edáfica (Cohen, 1994). Más recientemente, se han empleado otras técnicas que permiten estimar las necesidades hídricas una vez conocido el estado hídrico de las plantas; entre ellas la medición del potencial hídrico foliar (Ψ_f) y del potencial hídrico xilemático (Ψ_{xm}), parámetros que han sido empleados de manera habitual, por ejemplo, en el cultivo de la vid donde el control del agua aportada es especialmente relevante (Sellés et al., 2002; Williams y Trout, 2005). Estas técnicas tienen en cuenta tanto la demanda evaporativa de la atmósfera como la disponibilidad de agua en el conjunto del suelo explorado por las raíces, obteniéndose con ellas una mejor estimación del estrés hídrico sufrido por las plantas. Otras técnicas empleadas anteriormente (tensiómetros, TDR) muestrean un volumen de suelo pequeño, no siendo siempre la zona donde se realiza la medición la que alberga mas raíces y donde, por tanto, se produce la mayor extracción de agua.

Tanto el Ψ_f como el Ψ_{xm} se determinan mediante el uso de una cámara de presión, conocida también como cámara de Scholander, ya que fue él quien ideó esta técnica (Scholander et al, 1965). El potencial hídrico o tensión a la que se encuentra el agua en el xilema de la planta presentará valores negativos ya que la presión del xilema es menor que la atmosférica, es decir el agua en la planta esté bajo succión. Cuando varíe la transpiración de la planta también se producirán variaciones en la presión del xilema, así mismo, si disminuye la humedad del suelo, la fuerza de succión será mayor. El Ψ_f se mide en hojas que transpiran, mientras que para la medición del Ψ_{xm} se bloquea la transpiración cubriendo la hoja en una bolsa de plástico, la cual se envuelve además con papel de aluminio para evitar el calentamiento y la condensación de agua que provocaría una hidratación artificial de la hoja. Algunos autores señalan que el tiempo que debe estar la hoja envuelta antes de cortarla debe ser de en torno a 2 horas (Sellés et al., 2002), sin embargo en otros casos se indica que con 10 min sería suficiente para que se produjese el equilibrio hídrico entre la hoja y la rama (Busso, 2008).

El Ψ_f será más alto en valor absoluto que el Ψ_{xm} , ya que la mayor demanda evaporativa hace que la planta retenga el agua con mayor fuerza; si bien ambos valores estarán relacionados (Sellés et al., 2002). El estudio realizado en viñas por Williams y Araujo (2002) mostró una correlación del 0,92 entre los valores de Ψ_f y Ψ_{xm} a mediodía. A pesar de ello, actualmente se está empleando más el Ψ_{xm} que el Ψ_f , al ser sus valores menos dependientes de las condiciones meteorológicas (McCutchan y Schakel, 1992; Sellés et al., 2002).

1.6.4.1. La selección de las muestras

La localización que tenga la hoja dentro del árbol hará que el potencial observado sea mayor o menor, registrándose valores más negativos en las hojas soleadas, ya que presentan una transpiración mayor. El efecto de la insolación será muy relevante en las mediciones del Ψ_f , debiendo seleccionarse siempre hojas que presenten una insolación similar. Este problema, sin embargo, desaparece en las mediciones del Ψ_{xm} , si bien se recomienda seleccionar siempre hojas que se encuentre a la sombra y que no presente rocío. La altura a la que se encuentra la hoja también afectará los resultados, serán ligeramente mayores los potenciales de las hojas más altas, por ello se recomienda coger las hojas siempre a la misma altura, siendo habitual por comodidad seleccionar hojas de la parte baja del árbol. En cuanto a la forma y tamaño de la hoja, se ha observado que estos factores no afectan los resultados (Sellés et al., 2002). Tampoco el estado fisiológico en el que se encuentren las hojas producirá variaciones en el potencial, sin embargo las enfermedades u otros daños físicos que sufra el sistema radical dificultarán la absorción de agua, haciendo aumentar los potenciales en valor absoluto (Sellés et al., 2002).

Los potenciales hídricos a lo largo del día variarán en función de la demanda evaporativa de la atmósfera, obteniendo menores valores (es decir más altos en valor

absoluto) al mediodía, cuando esta demanda es más alta, que al amanecer (Sellés et al., 2002). Por lo tanto, habrá que realizar las mediciones siempre a horas en las que las condiciones sean similares. Uno de los momentos más utilizados es el amanecer, siendo también habituales las mediciones al mediodía. Williams y Araujo (2002) encontraron en viñas una correlación entre el potencial hídrico al amanecer y el Ψ_f a mediodía de 0,88. También hay trabajos que sugieren que el potencial hídrico foliar durante el día no refleja bien el estado hídrico en el que se encuentra la planta, al no encontrar relaciones entre este parámetro y el crecimiento (Chone et al., 2001; Garnier y Berger, 1985; Naor, 1998). Estos autores recomiendan, por ello, o bien cubrir las hojas durante el día y obtener el Ψ_{xm} o bien realizar las mediciones al amanecer, cuando el Ψ_f y el Ψ_{xm} son iguales.

En especies cuyas hojas sean muy pequeñas o que cuenten con un rabillo de las mismas muy corto, pueden emplearse pequeñas ramillas para medir el potencial.

1.6.4.2. Errores en la medición

Se debe tener especial cuidado con el tiempo transcurrido entre la corta de la hoja y la medición, pues si pasa demasiado tiempo se producirá la deshidratación de la hoja. Ferreyra et al. (2007) informaron de que no debe transcurrir más de un minuto entre la corta y la medición del potencial hídrico xilemático, mientras que otros autores incluso recomiendan cubrir la hoja tras la corta con algún material que evite su deshidratación (Busso, 2008). En caso de que se demore la medición, los errores serán mayores en frondosas que en coníferas, debido a que estas últimas ofrecen más resistencia a la pérdida de agua (Waring y Cleary, 1967; Ritchie y Hinckley, 1971). En cualquier caso, es siempre recomendable mantener las muestras cortadas a la sombra y a temperaturas bajas (Hellkvist et al., 1974).

Un problema muy habitual es la rotura de la hoja en el interior de la cámara, lo que provoca que se introduzca aire por la superficie dañada que empuja agua (o también látex o resinas) produciéndose un burbujeo en el extremo del peciolo (Spomer, 1985; Barrett y Nell, 1986). Si se detecta este problema se recomienda repetir la medición en otra hoja. Por otra parte, tanto los espacios vacíos como las burbujas en los vasos de la planta pueden provocar errores en la medición (Kaufmann, 1968; Wei et al., 2000), mientras que en suelos muy salinos se deberá tener en cuenta la presión osmótica (Ritchie y Hinckley, 1975).

La presurización de la cámara debe hacerse lentamente, para evitar que se produzcan aumentos de la temperatura que incrementarían la presión osmótica generando errores, además la creación de gradientes de potencial hídrico podría también distorsionar las medidas (Spomer, 1985). Tras observar el punto en el que el agua comienza a surgir por el peciolo de la hoja, se deberá dejar escapar un poco de presión a la cámara y volver a presurizar de nuevo para efectuar una nueva lectura en la cual se debería obtener un

valor muy similar al anterior. Un fuerte aumento o reducción respecto al primer valor medido podría deberse a alguno de los errores anteriormente citados, con lo que se deberá desechar el dato y proceder a la medición en una nueva hoja.

Si se realizan mediciones del potencial hídrico en 2 o más hojas del mismo árbol, el valor obtenido en todas ellas tiene que ser muy similar, por lo que solo será necesario seleccionar una hoja en cada árbol, si bien en ocasiones puede ser recomendable realizar la lectura en varias hojas del mismo individuo para verificar que las mediciones se están realizando correctamente.

1.6.4.3. Otros estudios sobre el estrés hídrico

El potencial hídrico de dos especies diferentes no será el mismo, aun cuando estén recibiendo la misma cantidad de agua; esto se debe a que la estructura foliar de las distintas especies es diferente, presentando algunas de ellas un mayor control sobre la pérdida de agua que otras. Un mayor control estomático sobre la pérdida de agua generará potenciales más altos para una misma cantidad de agua recibida. El trabajo de Sellés et al. (2002) muestra que ejemplares bien regados de ciruelos, almendros o vides presentaban un Ψ_{xm} de entre -0,6 y -1 MPa, sin embargo el Nogal retenía con menor fuerza el agua que circulaba por sus vasos ya que como máximo se alcanzaron potenciales de -0,8 MPa, mientras que el olivo registró, incluso en parcelas bien regadas, unos valores mucho más negativos, alcanzando Ψ_{xm} de entre -1,1 y -1,6 MPa. El crecimiento de las plantas está estrechamente relacionado con los potenciales hídricos, presentando cada especie valores a partir de los cuales su crecimiento se detiene, por ejemplo en el caso de los cerezos Shackel et al. (1997) fijaron este punto en un Ψ_{xm} entre -1,5 y -1,7 MPa, mientras que en el caso de las vides Baeza et al. (2007) informan de que no hubo crecimiento con Ψ_f a media mañana y a mediodía menores de -1,12 y -1,18 MPa respectivamente. Son numerosos los trabajos que se han realizado sobre el estrés hídrico en vides, según Girona et al. (2006) las vides estarían bien regadas si presentan Ψ_f a mediodía por encima de los -0,8 MPa, entre este valor y -1,2 MPa presentarían un déficit hídrico moderado y por debajo de -1,5 MPa el déficit sería severo. En ocasiones es recomendable establecer un riego deficitario en la vid, dado que no se busca la mayor producción de biomasa, si no mejorar las propiedades químicas de uva.

El olivo en clima mediterráneo y condiciones de secano registró valores Ψ_f por debajo de los -2 MPa (Kitsaki y Drossopoulos, 2005); en este mismo trabajo se obtuvieron también funciones que relacionan el potencial hídrico con diferentes variables, obteniendo que el potencial era menor cuanto mayores eran las temperaturas del suelo y del aire y cuanto mayor era la radiación solar, mientras que los potenciales eran más altos al aumentar la humedad ambiental y no se encontró correlación entre esta variable y la velocidad del viento.

También ha sido objeto de estudio el Ψ_f de especies herbáceas, por ejemplo con sorgo se realizaron mediciones a distintas horas del día, obteniendo siempre valores más bajos en las plantaciones establecidas en secano (entre -1,51 y -1,65 MPa) que en las de regadío (-1,07 a -1,51 MPa) (García et al., 2010). En este trabajo también se muestra una alta correlación entre la humedad presente en el suelo y el potencial hídrico foliar, encontrándose mayores correlaciones con el potencial medido entre las 9 y las 10 de la mañana que con el potencial medido a mediodía.

La caña de azúcar establecida bajo cuatro condiciones de riego diferentes, que iban desde un 80% hasta un 40% de la capacidad de campo, mostró también un descenso de los Ψ_f a medida que la disponibilidad de agua era menor (Chen et al., 2012). Por ejemplo, a las 8.00 de la mañana las parcelas mas regadas tenían un potencial de entorno a -0,6 MPa, mientras que las menos regadas alcanzaban casi -1,1 MPa. A las 14:00 los potenciales eran más negativos en todos los tratamientos, pero la diferencia entre ambos se mantuvo; en las parcelas más regadas el potencial hídrico foliar era de casi -1,3 MPa, mientras que en las parcelas menos regadas se acercaba a los -2 MPa. En este trabajo se hacen mediciones a lo largo de todo el día observándose claramente como los valores son más altos a primera hora de la mañana, haciéndose más negativos a medida que avanza el día hasta alcanzar un pico entre las 14:00 y 16:00, para volver a crecer desde este punto hasta el anochecer.

Por su parte, en el maíz se observaron Ψ_f muy diferentes en función de la fase de crecimiento en el que se encontraba, siendo estos mucho mayores durante la floración y el llenado del grano y descendiendo drásticamente en la parte final de su periodo de vida, fase en la que la planta se seca (Xu et al., 2010). En la vid, Barajas et al. (2008) también estudiaron la evolución de los potenciales a lo largo del periodo vegetativo, encontrando que a medida que avanzaba el verano se producía un descenso del potencial, siendo estas diferencias mayores en secano que en regadío; con nogales, Ferreyra et al. (2001) llegaron a similares conclusiones.

En cuanto al efecto de la densidad de plantación, Hunter (1998) concluyó en vides que las plantas más espaciadas se veían sometidas a un menor estrés hídrico que las cepas establecidas con mayores densidades. Las plantaciones más densas tienen una mayor superficie foliar, generándose potenciales hídrico más negativos.

1.7. La Producción de Biomasa Foliar

La distribución de la biomasa en las plantas afecta a su crecimiento y también a sus características físicas, químicas y energéticas. Las plantas leñosas cuando son jóvenes presentan una gran proporción de biomasa foliar (alrededor del 40%); mientras que los árboles adultos presentan la mayor parte de su biomasa en los tallos (70-80%) y el peso

de las hojas va perdiendo importancia, representado solo entre el 1-4% de la biomasa total (Poorter y Nagel, 2000). Al aumentar la proporción de tallos en las plantas más longevas, también se producirá una disminución del porcentaje de ramas y de corteza, lo cual es positivo para el aprovechamiento energético, ya que mejorarán sus propiedades químicas al disminuir el contenido de cenizas (Kauter *et al.*, 2003). Para diferentes clones de chopo de dos años de edad implantados con una densidad de 10.000 pl ha⁻¹, los tallos representaban el 71-75% de la biomasa aérea, las ramas el 12-14% y las hojas entre el 13% y el 16% (Laureysens *et al.*, 2005). El porcentaje de biomasa presente en las raíces también disminuye con la edad, reduciéndose de un 30% en las plantas jóvenes a un 15-20% en las de mayor edad.

Además de la edad, la distribución de la biomasa también dependerá de la especie y de la densidad de plantación. Cuanto menor sea la densidad, mayor será la proporción de hojas y raíces (Proe *et al.*, 2002). La mayor proporción de hojas, se debe a que un mayor espaciamiento permitirá a los árboles un mayor desarrollo de la copa, señalando la tesis doctoral de Ciria (1998) que la biomasa presente en las ramas en chopos de 6 años de edad también aumenta al disminuir la densidad; concretamente las ramas pasaron de representar un 25% de la biomasa con una densidad de 10.000 pl ha⁻¹, a suponer más del 38% con densidad de 1666 pl ha⁻¹. En el caso de los chopos la producción de hojas puede diferir también dependiendo del tipo de clon empleado, según el estudio de Bunn *et al.* (2004) esta producción puede variar entre clones hasta un 50%; si bien otros trabajos apuntan a que la producción foliar tenderá siempre a representar porcentajes similares sobre el total de biomasa producida (Barigah *et al.*, 1994).

La cantidad de hojas generada no es interesante desde un punto de vista productivo, ya que los cultivos lignocelulósicos leñosos se cosechan durante la parada vegetativa, cuando las plantas están desprovistas de hojas. Sin embargo, la producción de hojas y más concretamente el Índice de Área Foliar (LAI) está estrechamente relacionado con el rendimiento de las plantaciones, lo que posibilita la realización de estudios y estimaciones de la producción mediante métodos no destructivos, siendo numerosos los trabajos realizados en este campo (Ridge *et al.*, 1986; Weih y Nordh, 2005; Pellis *et al.*, 2004).

1.7.1. El índice de área foliar (LAI)

El LAI se define como el área foliar (considerando únicamente una de las caras de la hoja) por unidad de suelo existente bajo la planta (Watson, 1947). El LAI representa la superficie de intercambio entra la planta y la atmósfera, siendo por tanto determinante en la cantidad de luz interceptada y en el intercambio de gases, por lo que una estimación del LAI nos permitirá cuantificar la productividad de las plantaciones. Por otro lado, determinar cuál es el turno más apropiado para una determinada densidad

inicial es uno de los problemas más habituales en el cultivo de SRF; para determinar este turno hasta el momento se debía conocer el crecimiento corriente anual y el crecimiento medio de las plantaciones, sin embargo el LAI permite estimar el turno mediante una metodología menos costosa (Hernández et al., 2009).

El LAI es un índice dinámico que variará dependiendo de la especie y de las características edafoclimáticas del terreno, pero también en función de la época del año en que realice la medida y en función de los tratamientos culturales que se apliquen (Welles, 1990). Los valores más altos de este índice en masas forestales naturales se han observado en bosques caducifolios templados, donde el índice puede llegar a $10 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Perri, 1994). En silvicultura de corta rotación, el trabajo de Debell et al. (1997) midió el LAI durante 5 años de 4 clones de chopo establecidos con una densidad de plantación de $10.000 \text{ pl ha}^{-1}$, obteniendo como resultado que el LAI el primer año tras la implantación oscilaba entre 1 y $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, pasando el segundo año a estar entre 2 y $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, mientras que a partir del cuarto año se mantenía estable y variaba en función de los clones entre 4 y 8. También ha sido estudiado el LAI en plantaciones rebrotadas, Ceulemans et al. (1993) obtuvieron durante el primer año de rebrote de distintos clones de chopo a una densidad de $16.625 \text{ pl ha}^{-1}$ valores de LAI entre 3,7 y $6,75 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. En el caso de los sauces, Bullard et al. (2002b) informaron de que los valores máximos de LAI obtenidos estaban entre 5 y $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, encontrándose estos valores pico en las plantaciones de mayor edad y establecidas a mayores densidades.

El cálculo del LAI puede realizarse mediante métodos directos e indirectos, siendo numerosos los trabajos que muestran estrechas correlaciones entre los valores obtenidos mediante el uso de ambos métodos (Ceulemans et al., 1993; Dufrêne y Bréda, 1995). Los métodos directos se llevan a cabo mediante la corta de la planta o, en el caso de las plantas de hoja caduca, mediante la recogida de la hoja en trampas colocadas durante el otoño (Chason et al., 1991; Jonckheere et al., 2004). Estos métodos requieren la medición del área de cada una de las hojas del árbol, siendo considerados muy precisos, por lo que se emplean para calibrar las medidas realizadas mediante métodos indirectos (Cutini et al., 1998). También existe lo que algunos autores denominan el método semidirecto, que consiste en pesar la producción de hoja obtenida y calcular el LAI una vez conocida la relación entre la superficie y el peso seco (Jonckheere et al., 2004; Hernández et al., 2009).

Con el fin de disminuir el tiempo y trabajo necesarios para medir el LAI se han desarrollado los métodos indirectos, los cuales permiten el estudio de la evolución espacial y temporal del LAI en masas forestales o agrícolas extensas. Algunos de estos métodos se basan en el análisis de imágenes de la cubierta (Hernández et al., 2009; Stenberg et al., 2004), habiéndose encontrado buenas relaciones entre el LAI y algunos índices de vegetación como el NDVI, SR o RSR; sin embargo en los últimos años la metodología más empleada es la basada en la ley de Beer-Lambert. A partir de esta ley

se deduce que la cantidad de radiación interceptada por una cubierta vegetal depende de la radiación incidente y de la estructura y propiedades ópticas del follaje (Kasanga y Monsi, 1954; Saeki, 1960). La técnica consiste más concretamente en medir la cantidad de luz que es capaz de atravesar la cubierta vegetal y, aunque en un principio presentaba algunas limitaciones, dado que se debía obtener el coeficiente de extinción de luz y se requería que el cielo estuviese nublado, en la actualidad se emplea habitualmente al haberse desarrollado instrumental mejorado que puede ser utilizado en diferentes condiciones ambientales y que ofrece una medición del LAI inmediata. Uno de los más utilizados es el LAI 2000 Plant Canopy Analyzer (Li-Cor LAI 2000) estadounidense (Cutini et al., 1998; Eriksson et al., 2005; Polanco et al., 2005), aunque también se han realizado numerosos trabajos con otros equipos (Accupar, Demon) y en la actualidad se sigue desarrollando nuevo instrumental. A pesar de que este método se considera bastante preciso, algunos estudios indican que el LAI puede quedar subestimado (Chason et al., 1991; Dufrêne y Bréda, 1995), por lo que existen trabajos que han tratado de buscar factores correctores para mejorar la precisión (Chason et al., 1991).

La producción de biomasa se verá afectada por el mayor o menor desarrollo que consigan las plantas de su sistema foliar, pero también por la capacidad de estas para mantener el follaje, el cual les permitirá tener una adecuada actividad fotosintética durante más tiempo. Por esta razón, será importante conocer el LAI y el tiempo que este área foliar se mantiene en la planta, es decir la integral del LAI a lo largo del periodo vegetativo. La cantidad de hojas presente en el árbol puede verse sustancialmente reducida a causa de plagas y enfermedades, por ejemplo en el caso del chopo son habituales las defoliaciones causadas por la roya (*Melampsora* sp.) al final del periodo vegetativo (Sixto et al., 2007). También pueden causar defoliación prematura las deficiencias en los recursos hídricos (Kira, 1975), así como la escasez de nitrógeno (Madgwick, 1976).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Cultivo de chopo

2.1.1. Localización

El estudio llevado a cabo con chopo se ha realizado en una parcela ubicada en el Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER-CIEMAT) en el término municipal de Cubo de la Solana en la provincia de Soria, la cual se encuentra a unos 1100 m de altitud sobre el nivel del mar (**Figura 2.1.1.**). La parcela se localiza más concretamente a 41°36′ latitud Norte y 2°30′ longitud Oeste y sus coordenadas en el sistema WGS-1984 30 Norte son X: 541090, Y: 4605450.

Figura 2.1.1. Localización de las parcelas de ensayo de chopo

2.1.2. Características climáticas

La zona donde está ubicada la parcela tiene un clima Mediterráneo continentalizado, este clima es similar al mediterráneo típico en el ámbito de las precipitaciones, pero presenta temperaturas más extremas, lo cual es propio del clima continental, debido a la lejanía del mar. Además, al encontrarse las parcelas a gran altitud, las temperaturas registradas son inferiores a las que presentan otras zonas con clima Mediterráneo continental. Los veranos son bastante cálidos, con temperaturas máximas que en ocasiones superan los 30°, mientras que los inviernos son bastante fríos, siendo frecuente que las temperaturas bajen de los 0 °C sobre todo en noches despejadas. Las precipitaciones varían entre los 300 y 600 mm y siguen un patrón parecido al del clima mediterráneo típico con máximos durante el otoño y la primavera.

2.1.2.1. Registros meteorológicos en el CEDER

El ensayo con chopo tuvo una duración de 6 años, desde 2008 a 2013, periodo durante el cual se obtuvieron las siguientes variables de la estación meteorológica situada junto a la parcela:

- Temperatura (°C): media de las máximas, media de las mínimas y media mensual.
- Precipitación (mm)
- Radiación solar (W.h/m²)

En 2008, se registraron unas temperaturas por debajo de la media de los últimos años (**Tabla 2.1-I**), mientras que las precipitaciones fueron superiores a las que se suelen recoger en la zona (**Tablas 2.1-II**), especialmente durante la primavera pero también durante el verano, lo que propició que el periodo seco fuese muy corto (**Figura 2.1.2.**). Las medias de las temperaturas máximas mensuales fueron menores de lo habitual durante la primavera (**Tabla 2.1-III**), destacando sobre todo la media de las temperaturas mínimas del mes de Julio, al ser esta entre 3 y 4 °C menor que la del resto de años (**Tabla 2.1-IV**).

Tabla 2.1-I: Temperatura media anual (°C) en el CEDER durante el periodo 2008-2013.

AÑO	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Temperatura media (°C)	9,9	10,8	9,6	11,1	10,6	9,5

Tabla 2.1-II: Precipitación mensual (mm) registrada en el CEDER durante el periodo 2008-2013.

MES	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Ene	33,6	32,1	49,4	20,4	15,2	60,6
Feb	22,4	18,1	72,7	31,8	14	27
Mar	19,3	23,4	48,5	75,3	13	127,7
Abr	90,8	44,8	34,2	44,8	73,1	61,7
May	146,1	21,3	96,2	83,8	43	44,8
Jun	85,2	36	64,3	8,5	10,1	25,3
Jul	39,4	0,4	8,9	6,6	23	51,6
Ago	29,7	41	64,2	15,2	8,2	1,7
Sep	34,4	14,3	23,8	2,7	31,6	9
Oct	73,3	51	50,1	14,8	58,5	71
Nov	24	25,8	38,5	55,4	32,1	42,1
Dic	50,4	81,6	47,7	20,3	22,6	72
TOTAL	648,6	389,8	598,5	379,6	344,4	594,5

Figura 2.1.2. Diagramas Ombrotérmicos en el CEDER durante los 6 años de estudio (2008-2013).

El año 2009, presentó una meteorología muy diferente a la del año anterior, registrando temperaturas algo más altas de lo normal al final de la primavera y durante el verano, periodo en el cual las precipitaciones fueron escasas, no registrándose ninguna precipitación durante el mes de Julio. Durante todo el año las precipitaciones no llegaron a los 400 mm y el periodo seco fue bastante largo.

El año 2010 volvió a ser bastante lluvioso, en especial el invierno que normalmente no suele ser una época con muchas precipitaciones en esta zona. También fue lluviosa la parte final de la primavera, registrándose además temperaturas algo más bajas de lo habitual, por lo que el periodo seco no empezó hasta Julio. El verano fue cálido y lluvioso, sobre todo el mes de Agosto, si bien hay que reseñar que en el periodo estival las precipitaciones suelen producirse en forma de tormentas cortas e intensas, lo que impide un adecuado aprovechamiento del agua por parte de las plantas.

Tabla 2.1-III: Temperatura media de las máximas (°C) en el CEDER durante el periodo 2008-2013.

MES	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Ene	12,3	4,6	4,6	6,8	8,4	8,3
Feb	10,8	9,7	6,3	10,1	7,1	8,2
Mar	11,4	14,2	9,7	10,4	15,1	11,0
Abr	15,3	13,8	15,5	18,7	14,3	13,8
May	16,8	21,6	16,4	20,9	21,4	15,5
Jun	22,3	25,9	21,8	24,0	27,2	21,9
Jul	29,8	29,7	29,3	26,8	29,1	28,8
Ago	27,6	29,5	28,0	29,2	30,3	28,6
Sep	21,8	22,5	23,0	26,2	23,9	24,4
Oct	16,1	19,6	16,5	20,5	17,1	18,9
Nov	8,2	11,8	9,2	12,4	10,3	10,3
Dic	6,8	9,4	7,3	8,5	7,8	8,8
MEDIA	16,6	17,7	15,6	17,9	17,7	16,5

Tabla 2.1-IV: Temperatura media de las mínimas (°C) en el CEDER durante el periodo 2008-2013.

MES	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Ene	-0,7	-2,5	-1,2	-1,6	-2,1	-0,8
Feb	0,8	-2,0	-1,5	-1,0	-3,9	-2,3
Mar	0,1	0,3	-0,3	0,3	-0,2	0,6
Abr	3,1	0,9	3,6	5,2	1,6	1,4
May	6,4	6,9	4,4	7,2	6,4	0,3
Jun	9,5	11,0	8,8	8,7	11,1	6,0
Jul	7,3	12,3	12,8	9,5	10,2	12,3
Ago	11,5	13,5	11,6	12,4	13,1	10,5
Sep	7,8	9,5	8,5	9,4	9,5	8,0
Oct	4,7	6,8	3,7	5,2	6,0	5,2
Nov	-0,1	3,5	1,3	4,0	2,1	0,4
Dic	-0,9	-6,7	-1,1	-0,7	-0,1	-3,3
MEDIA	4,1	4,4	4,2	4,9	4,5	3,2

La precipitación recogida durante todo el año 2011 no llegó a los 380 mm, siendo un año bastante seco. La cantidad de agua registrada durante la primavera se considera normal, pero el registro de precipitación fue prácticamente nulo desde comienzos de Junio hasta finales de octubre. Respecto a las temperaturas, aunque en general fue un año cálido, el mes de Julio registró las temperaturas más frías de los 6 años estudiados.

Durante 2012 las precipitaciones fueron todavía más escasas que el año anterior, registrándose menos de 350 mm en todo el año. Las temperaturas fueron en general algo más altas de lo habitual, siendo especialmente caluroso el mes de agosto, que registró la media de las máximas más elevada de todos los meses de Agosto considerados en este estudio.

El año 2013 se caracterizó por presentar unas altas precipitaciones al final del invierno y comienzo de la primavera, así como durante el otoño, sin embargo durante el periodo vegetativo del chopo estas no fueron especialmente altas. La temperatura anual media registrada fue bastante baja, debido a las bajas temperaturas registradas durante la primavera. Destacan las temperaturas medias de las mínimas durante los meses de Mayo y Junio, que fueron entre 3 y 4 °C menores de lo habitual.

Durante los 6 años de estudio, se registró una radiación solar anual media de 5.653 MJ m⁻²; siendo el año con una radiación solar más alta el 2012 con 5.974 MJ m⁻² (**Tabla 2.1-V**), coincidiendo con un año bastante seco y caluroso.

Tabla 2.1-V: Radiación total global (MJ m⁻²) en el CEDER durante el periodo 2008-2013,

MESES	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Enero	205	164	183	213	245	215
Febrero	264	301	219	294	346	249
Marzo	433	509	383	325	553	342
Abril	553	527	532	587	414	528
Mayo	532	740	641	670	728	613
Junio	699	736	658	758	806	751
Julio	703	852	813	840	873	772
Agosto	725	681	716	712	758	761
Septiembre	516	502	501	570	524	547
Octubre	321	381	376	446	355	349
Noviembre	214	201	214	258	198	222
Diciembre	163	152	191	193	174	221
TOTAL	5.329	5.746	5.429	5.865	5.974	5.572

La menor radiación se registró en 2008 (5.329 MJ m^{-2}), que fue un año bastante lluvioso y algo más frío de lo habitual. El mes que suele presentar una radiación solar más alta es el mes de Julio, seguido de los meses de Agosto y Junio.

2.1.3. Características edáficas

Antes de iniciar los ensayos se tomaron muestras medias de suelo en tres puntos diferentes de la parcela, recogiendo en cada uno de ellos muestras a dos profundidades: 0-30 cm y 30-60 cm. Según los análisis a ambas profundidades (**Tabla 2.1-VI**), el suelo tiene una textura muy arenosa, registrándose un porcentaje de arenas superior al 80%. Este tipo de texturas propician que el suelo tenga escasa capacidad para retener nutrientes y una mala capacidad de retención de agua. Además, el alto porcentaje de gravas encontrado podría provocar que el agua se pierda todavía con mayor facilidad.

Tabla 2.1-VI: Características del suelo de la parcela experimental antes de la plantación a dos profundidades.

Determinaciones	0-30 cm	30-60 cm
Elementos >2mm (%)	39,9	39,0
Arena (%)	84,0	81,6
Limo (%)	8,0	5,4
Arcilla (%)	8,0	13,0
Textura	Arenosa franca	Arenosa franca
pH	5,90	6,4
C. eléctrica (mS/cm)	0,17	0,05
Materia orgánica (%)	0,92	0,42
N (%)	0,03	0,02
P Olsen (ppm)	6,6	7,4
K Ac. Amónico (ppm)	61,3	65,0

La conductividad eléctrica es baja, siendo este un dato positivo, ya que una alta concentración de sales solubles (mayor de 2 mS/cm) podría limitar la absorción de agua por parte de las plantas. El pH es ácido, encontrándose los valores obtenidos en los análisis dentro del rango de valores entre los cuales el chopo no tendría dificultades para desarrollarse.

La cantidad de materia orgánica se considera baja, ya que era menor del 1%, mientras que el Nitrógeno tiene también una presencia escasa, al no superar el 0,05%. Las cantidades de fósforo y potasio pueden ser consideradas como normales.

A la vista de los análisis realizados se concluye que las propiedades del suelo de las parcelas experimentales quedan lejos de ser las óptimas para el desarrollo de un cultivo, presentando numerosas deficiencias.

2.1.4. Diseño de la experiencia

La parcela donde se llevó a cabo la experiencia con chopos tiene una superficie total de 1922 m² y quedó dividida en 8 subparcelas separadas entre sí 2 m. Todas estas subparcelas recibieron una cantidad de agua similar durante el primer ciclo de tres años, mientras que en el segundo ciclo se regó cada una de ellas con una dosis de riego diferente; desde un riego claramente deficitario hasta una cantidad de agua que se suponía superaba las necesidades hídricas de los chopos. Cada subparcela se dividió en tres bloques y en cada uno de ellos se implantaron cuatro clones de chopo diferentes, alguno de estos clones había sido seleccionado específicamente para producir biomasa, mientras que otros no (**Tabla 2.1-VII**).

Tabla 2.1-VII: Clones de chopo empleados en el ensayo.

Nombre del clon	Híbrido	Origen	Finalidad
AF-2	<i>P.deltoides x P. nigra</i>	Italia	Biomasa
I-214	<i>P.deltoides x P. nigra</i>	Italia	No específicamente para biomasa
Monviso	<i>(P. deltoides x P. trichocarpa)</i> <i>x P. nigra</i>	Italia	Biomasa
Pegaso	<i>(P. deltoides x P. trichocarpa)</i> <i>x P. nigra</i>	Italia	Biomasa

Las subparcelas quedaron rodeadas de una fila de plantas del clon 2000 Verde para evitar el efecto borde e interferencias entre dosis. El marco de plantación fue de 1 x 0,5 m, es decir una densidad de 20.000 plantas ha⁻¹. En total, en cada uno de los bloques había 20 plantas de cada clon, es decir 60 plantas de cada clon por subparcela.

2.1.5. Implantación y manejo de las parcelas

2.1.5.1. Preparación del suelo y plantación

Como tarea de preparación de la parcela se realizó un subsolado a unos 60 cm de profundidad y también se aplicó un abonado de fondo. El subsolado se realizó a comienzos del mes de febrero, mientras que el abonado de fondo se realizó el 25 de

marzo aplicando un dosis de 300 kg/ha de abono complejo (NPK) con relación nutricional 8-15-15. Posteriormente se aportó una segunda dosis de este fertilizante el 5 de junio, aplicando idéntica cantidad.

La plantación se realizó manualmente con estaquillas de tallo lignificadas de brotes de 1 año que procedían del campo clonal de cepas del INIA (Madrid). Estas fueron conservadas en nevera a 3 °C hasta el 29 de marzo, cuando se sumergieron en agua hasta el día de su plantación, que se llevó a cabo los días 1 y 2 de abril de 2008. Inmediatamente antes de estaquillar, se realizó un tratamiento con fungicida Captan y con insecticida Fenthion (0,5 ml/l). Las estaquillas que tenían una longitud de 20-30 cm y un grosor de unos 20 mm quedaron completamente enterradas para protegerlas del frío. El éxito en la implantación fue alto, por lo que no se consideró necesario realizar reposición de marras.

2.1.5.2. Abonado

A parte del abonado de fondo, el primer año se hizo un aporte de nitrógeno suplementario a mediados de Julio (**Tabla 2.1-VIII**). Durante el segundo periodo vegetativo solamente se aplicó nitrato amónico, mientras el tercer año no se realizó ningún aporte de nutrientes.

Tabla 2.1-VIII: Fertilización en la parcela experimental durante 2 ciclos de cultivo. R: edad de la raíz, T: edad del tallo.

	Año	Edad de la plantación	Fecha del aporte	Abono	Dosis
Primer ciclo	2008	R1T1	25-mar	N:P ₂ O ₅ :K ₂ O → 8-15-15	300 kg/ha
			05-jun	N:P ₂ O ₅ :K ₂ O → 8-15-15	300 kg/ha
			09-jul	Nitrato amónico (27%)	250 kg/ha
	2009	R2T2	23-jun	Nitrato amónico (27%)	125 kg/ha
			21-jul	Nitrato amónico (27%)	125 kg/ha
	2010	R3T3	NO SE REALIZÓ ABONADO		
Segundo ciclo	2011	R4T1	08-mar	N:P ₂ O ₅ :K ₂ O → 4-6-12	1675 kg/ha
			10-jun	Nitrato amónico (27%)	235 kg/ha
	2012	R5T2	NO SE REALIZÓ ABONADO		
	2013	R6T3	04-jun	N:P ₂ O ₅ :K ₂ O → 22-8-10	400 kg/ha

Tras la corta de la plantación con tres años de edad, se realizó de nuevo un aporte de fosforo y potasio al final del invierno, además este año también se añadió nitrógeno mediante nitrato amónico a mediados de junio. El segundo año tras el rebrote no se

aplicó fertilizante, mientras que el último año de estudio se añadió un abono complejo rico en nitrógeno con el fin de aportar sobre todo este nutriente a las parcelas. En algunas ocasiones el abonado se realizó en dos fases para así facilitar el aprovechamiento de este por parte de las plantas.

2.1.5.3. Control de malas hierbas

Se realizó un control preventivo con el herbicida de preemergencia Oxifluorfen, aplicando una dosis de $2,5 \text{ l ha}^{-1}$ inmediatamente después del estaquillado. Durante el segundo año de cultivo se procedió a la eliminación de malas hierbas mediante métodos mecánicos, pero por la escasa distancia entre filas solo se realizó entre subparcelas. A partir del tercer año solo se consideró necesario cortar la vegetación que aparecía entre las subparcelas mediante el uso de desbrozadora. En el interior de las subparcelas la proliferación de malas hierbas fue importante, sobre todo tras la corta realizada a los tres años.

2.1.5.4. Plagas y enfermedades

La aparición del insecto defoliador *Melasoma populi* L. (**Figura 2.1.3.**) ha sido continua a lo largo de los 6 años de estudio. En algunas ocasiones fue necesario aplicar insecticidas, mientras que otros años se consideró que no era necesario realizar estos controles al no contar con poblaciones lo suficientemente altas como para generar pérdidas de producción importantes. El año de la implantación se aplicó insecticida a mediados de agosto, empleándose como materia activa la deltametrina (2,5% p/v) en una proporción de 1 ml por litro de agua.

Figura 2.1.3. Adulto de *Melasoma populi* alimentándose sobre una hoja de chopo

Al tener este defoliador predilección por los tallos más jóvenes, de nuevo hubo que aplicar insecticida el primer año tras la corta; además, al tener los individuos un menor tamaño, es cuando mayores daños puede generar el defoliador en las parcelas. Este año se volvió a utilizar el mismo insecticida, en la proporción anteriormente mencionada, en tres ocasiones, dado que la parcela estaba fuertemente afectada: a comienzos de mayo, a mediados de julio y a mediados de Agosto. Durante 2013, aunque el grado de afectación no era preocupante, se realizó un control de la población en todo el ensayo. Estaban especialmente afectadas por el *Melasoma* las parcelas menos regadas, las cuales presentaban un menor desarrollo.

Durante el mes de septiembre, cuando las temperaturas bajan y la humedad ambiental aumenta, ha sido habitual observar la presencia de roya (*Melampsora alli-populina*) en algunos ejemplares, pero al no representar una limitación importante para el crecimiento de los chopos no se realizó ningún tratamiento. Sin embargo, si fue necesario tratar la plantación a comienzos del mes de agosto de 2011 (primer año tras el rebrote), ya que gracias a las temperaturas anormalmente bajas registradas este año durante el mes de julio, la roya apareció excepcionalmente pronto y con mucha fuerza (**Figura 2.1.4.**). El tratamiento se realizó el 9 de agosto empleando un fungicida sistémico, cuyo complejo activo es el Antracol, en un proporción de 3 g l⁻¹ de agua.

Se observaron también en alguna ocasiones insectos perforadores que con sus galerías llegaron a acabar puntualmente con alguna de las plantas de chopo. Además, se observó una insecto que típicamente aparece en los sauces (*Phratora vitellinae*), el cual provocó escasos daños, por lo que no fue necesario aplicar ningún tratamiento.

Figura 2.1.4. Parcela de chopo afectada por la roya (*Melampsora alli-populina*) a comienzos de agosto de 2011

2.1.5.5. Aporte hídrico

El ensayo de chopos contaba con 8 subparcelas, las cuales durante el primer ciclo de tres años recibieron la misma cantidad de agua; mientras que en el segundo ciclo se aplicó a cada una de ellas una dosis de riego diferente mediante riego por goteo. Se pretendía analizar el comportamiento de los chopos desde un riego claramente deficitario, hasta un aporte hídrico que superase las necesidades de las plantas. Para ello fue necesario estimar el volumen de agua que emplean los chopos cuando no son sometidos a ninguna restricción hídrica.

Se realizó una aproximación al volumen de agua que necesitan los chopos, mediante el cálculo de la evapotranspiración potencial utilizando el método de Thornthwaite. El valor obtenido se multiplicó por el factor K_c propio de cada especie, el cual se obtuvo de otras investigaciones realizadas con chopo bajo condiciones climáticas similares. La evapotranspiración anual en el CEDER resultó ser de unos 645 mm, pero solo se tuvieron en cuenta para la estimación del consumo de agua las evapotranspiraciones durante el periodo vegetativo (de abril a septiembre) que sumaban unos 527 mm. En cuanto a los valores K_c se consideraron los obtenidos por Guidi et al. (2008) en Italia para chopos fertilizados de 2 años de edad e implantados con una densidad de 10.000 árboles por hectárea. Aunque estos valores K_c variaran con la calidad del suelo, la densidad de plantación o la edad de los árboles, se consideran bastante aproximados a los que podrían obtenerse en las parcelas del CEDER al tratarse de un clima mediterráneo similar al registrado aquí.

A los valores de evapotranspiración de referencia mensuales obtenidos para el chopo se deben restar las precipitaciones registradas en cada uno de estos meses para conocer el aporte hídrico suplementario que sería necesario realizar. Las precipitaciones que se tomaron como referencia fueron las registradas como media durante los últimos cinco años en la estación meteorológica del CEDER. Los resultados mostraron que durante los meses de abril y mayo no es necesario aportar agua de riego y que el volumen requerido en junio es bajo (**Tabla 2.1-IX**). El mes en que las plantaciones necesitaran un mayor volumen para tener todas sus necesidades hídricas cubiertas será el de Agosto con unos 334,5 mm ($3.345 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). En total, a lo largo de todo el periodo vegetativo sería necesario aportar unos $8.600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, si bien esto dependerá de las precipitaciones registradas cada año.

Durante el primer periodo vegetativo, la cantidad de agua de riego aportada fue menor que en años posteriores debido al menor tamaño de los individuos y a las altas precipitaciones registradas (**Tabla 2.1-X**). El año 2010 también fue un año más lluvioso de lo habitual, por lo que el agua de riego fue menor que en 2009, año que registró el mayor volumen del primer ciclo de la plantación.

Tabla 2.1-IX: Evapotranspiración Potencial (ETP), valores Kc para chopo, Evapotranspiración de Referencia (ETc), precipitación registrada en el periodo 2006-2010 y estimación del volumen de riego necesario en la parcelas de chopo del CEDER.

	ETP (mm)	Kc	ETc (mm)	Precipitación (mm)	Riego (mm)
Abril	43,1	0,36	15,5	52,2	0,0
Mayo	70,8	0,63	44,6	79,8	0,0
Junio	99,7	1,00	99,7	58,7	41,0
Julio	127,0	2,04	258,7	16,0	242,7
Agosto	111,2	3,27	363,5	29,0	334,5
Septiembre	75,2	3,66	274,9	28,8	246,1
TOTAL	527,0		1056,9	264,5	864,3

Tabla 2.1-X: Volumen de agua aportado cada año a las parcelas (m³ ha⁻¹).

AÑO	Fecha de Inicio - Fin	Dosis							
		1	2	3	4	5	6	7	8
2008	23 jun - 10 sep				3238				
2009	4 jun -27 sep				8420				
2010	3 jul - 15 sep				6665				
2011	24 jun - 27 sep	9422	8629	7236	5962	4661	2944	1966	1069
2012	7 jun - 17 sep	9102	8173	7028	5577	4205	2757	1926	1038
2013	25 jun - 9 sep	6955	6172	5242	4258	3096	1814	1266	548

Durante el segundo ciclo, cuando se establecieron las 8 dosis de riego diferentes, se fijó una primera dosis en la que la cantidad de agua aportada superaba las necesidades hídricas de las plantaciones (atendiendo a los valores de evapotranspiración de referencia). La cantidad de agua en la segunda dosis era la suficiente para satisfacer los requisitos de las plantaciones, mientras que en la tercera se redujo aproximadamente un 15% la cantidad de agua aportada respecto a la dosis 2, siendo en la cuarta esa reducción de un 30% y así sucesivamente hasta llegar a un volumen de agua en la octava dosis que representaba alrededor del 10% del agua aportada en la dosis 2. Por lo tanto, a partir de la dosis dos las parcelas se desarrollaron con riego deficitario.

El agua se suministró a las parcelas mediante pequeñas dosis de riego distribuidas a lo largo del verano, las cuales, en función de la climatología, podían llevarse a cabo cada dos días o diariamente. El ajuste de las dosis de riego se realizó apoyándose en las mediciones de humedad edáfica efectuadas en las parcelas con los TDR.

La fecha de inicio y finalización de los riegos dependió de las precipitaciones y temperaturas registradas, variando hasta casi un mes de unos años a otros. Como indicaba el estudio de evapotranspiración, el riego no fue necesario hasta el mes de junio, siendo durante la primera quincena de este mes el aporte hídrico necesario muy bajo (**Figura 2.1.5.**), sin embargo, durante la segunda quincena de junio se aportó un volumen de agua mayor al esperado inicialmente. Todo lo contrario ocurrió durante el mes de septiembre cuando, debido a las condiciones climatológicas observadas, se aportó una cantidad de agua de riego menor. Este bajo volumen podría deberse a que en el CEDER el periodo vegetativo finaliza antes, al encontrarse a mayor altitud que la zona italiana en la que estimaron los valores K_c utilizados. Los meses en los que se suministró mayor cantidad de agua fueron julio y agosto, siendo la primera quincena de agosto la que más volumen requirió.

Durante el año 2013 se aportó una menor cantidad de agua de riego, ya que fue un año bastante más lluvioso que los anteriores, destacando los casi 30 litros de lluvia recogidos en Julio.

Figura 2.1.5. Volumen de riego aportado en las parcelas de chopo en cada quincena (%) respecto al total. Considerados los dos ciclos de cultivo.

2.1.5.5.1 Mediciones con TDR

Desde que Topp et al. (1980) realizaran las primeras mediciones mediante TDR, esta técnica se ha convertido en una de las más utilizadas para medir el volumen de agua en el suelo. El método se basa en la influencia del agua en sus propiedades eléctricas, concretamente utiliza la constante dieléctrica del suelo, la cual varía en función de la cantidad de agua presente en el mismo, al ser la constante dieléctrica del agua bastante más alta (80) que la del aire (1) y que la de las fracciones mineral y orgánica del suelo

(entre 3 y 7). El empleo de los TDR proporciona mediciones bastante precisas de la humedad con un impacto sobre el terreno muy pequeño; además las mediciones se realizan muy rápidamente y por ello se puede obtener la humedad en un punto de forma continua, así como la humedad edáfica a diferentes profundidades.

El equipo TDR consta de un ecómetro que genera un impulso cuya reflexión queda registrada mediante el uso de un osciloscopio, además posee una sonda que se introduce en el suelo para guiar la onda en este medio y de un cable que conecta la sonda con el ecómetro. En el presente trabajo se ha empleado una sonda de tubo, diseñada especialmente para conocer el contenido de agua en todo el perfil del suelo. Las mediciones se realizan a través de unos tubos de plástico que se han introducido previamente en el suelo, en estos tubos se introduce la sonda que está compuesta de un cuerpo cilíndrico de PVC con 4 placas de aluminio (**Figura 2.1.6.**).

Figura 2.1.6. Medidor TDR empleado en las parcelas experimentales para medir la humedad del suelo a diferentes profundidades. Sistema de sonda de tubo de acceso TRIME-T3 con el medidor portátil TRIME-FM3

Se colocaron tubos para realizar mediciones con el TDR en cinco de las ocho dosis estudiadas (dosis 1, 2, 5, 6 y 8), instalando en cada una de ellas 2 tubos, los cuales se ubicaron en bloques diferentes. Las mediciones se realizaron semanalmente, obteniendo la humedad edáfica a tres profundidades:

- Entre 0 - 20 cm de la superficie
- Entre 30 - 50 cm de la superficie
- Entre 60 – 80 cm de la superficie

En un principio los tubos se colocaron entre las líneas de gotero, pero el bulbo húmedo formado junto a la línea de gotero era demasiado pequeño como para llegar a percibirse de manera adecuada en los TDR, especialmente en las dosis más bajas. Tras realizar las primeras mediciones se decidió cambiar su ubicación, posicionando ahora los tubos justo al lado de las líneas de gotero, donde las plantaciones con sistemas de riego localizado desarrollan una mayor cantidad de raíces.

Para el manejo de los datos ofrecidos por los TDR se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos con el programa diseñado por la USDA (Saxton y Rawls, 2006) para el cálculo de la disponibilidad de agua en diferentes tipos de suelo. Según este programa un suelo con las características del que nos ocupa se encuentra a capacidad de campo cuando tiene una humedad del 10%, mientras que el punto de marchitez permanente lo presenta con una humedad en torno al 5%.

2.1.6. Observaciones, mediciones y determinaciones experimentales

2.1.6.1. Brotación

A partir de 2009 (tercer año del primer ciclo de cultivo), se registró la fecha de brotación de los diferentes clones de chopo estudiados; considerándose que había tenido lugar cuando más del 50% de los individuos habían iniciado su periodo vegetativo. A partir de los datos meteorológicos registrados en la estación del CEDER se obtuvo la temperatura media diaria de todos los días del año, a la que se restó 6 °C, que es la temperatura considerada como base para que se inicie el desarrollo de las plantaciones. Finalmente, considerando solo los valores positivos de las temperaturas obtenidas, se hizo el sumatorio de las temperaturas medias diarias a partir del 1 de enero, obteniendo los grados-día acumulados para las distintas fechas de brotación.

$$\sum_0^n t_m - 6 \quad \text{para } t_m \geq 6, \text{ donde } t_m \text{ es la temperatura media diaria.}$$

Esta determinación permite establecer más fácilmente comparaciones entre los distintos clones, pudiéndose conocer cuáles de ellos necesitan una mayor o menor cantidad de grados-día para iniciar su brotación.

2.1.6.2. Mortalidad

Se contó el número de individuos muertos en las distintas subparcelas al finalizar el primer ciclo de tres años. Durante el segundo ciclo se realizó un conteo anualmente para evaluar la evolución de la mortalidad a lo largo del ciclo.

2.1.6.3. Número de brotes

Durante el primer ciclo se realizó un único conteo antes de la corta, mientras que durante el segundo ciclo se realizaron dos conteos, uno el primer año tras el rebrote y otro al finalizar el ciclo. El conteo se realizó en 30 plantas de cada uno de los clones en cada dosis de riego.

2.1.6.4. Crecimiento y producción de biomasa seca

Al finalizar el primer y segundo ciclo se midió la altura total de la planta, así como los diámetros a 10 cm de altura de cada uno de los brotes en los 10 árboles centrales de cada clon en cada una de los tres bloques de las 8 subparcelas estudiadas. Al final del primer ciclo se obtuvo el peso húmedo de cada una de estas plantas en una báscula con precisión de 0,5 g. Para el cálculo del rendimiento se tuvo en cuenta la mortalidad registrada al finalizar el ciclo. La producción al final del segundo ciclo se obtuvo pesando la biomasa extraída en cada uno de los bloques en que se dividía el ensayo.

La humedad de las plantas fue calculada mediante pesada de las muestras en húmedo y posteriormente en seco tras el secado de las muestras en estufa a 60 °C hasta peso constante, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 14774-2. Se determinó la humedad en un individuo de cada uno de los bloques

2.1.6.5. Eficiencia en el uso de agua (EUA)

Para el cálculo de la EUA se estimó la cantidad de agua que recibieron los chopos anualmente. El agua de lluvia caída cada año se obtuvo de los datos registrados en la estación meteorológica instalada en las parcelas del CEDER, mientras que para conocer el agua de riego que se suministraba, se contó con contadores en las distintas parcelas de estudio. Se debe tener en cuenta que parte del agua que recibieron las plantas, no pudo ser empleada por estas al perderse por escorrentía, percolación y evaporación directa en el suelo, lo cual conlleva imprecisiones en el cálculo de la EUA; si bien el método empleado se considera una buena aproximación a la eficiencia que poseen las plantas. Se consideró solamente la producción de biomasa aérea presente en ramas y tallos.

Se obtuvo la EUA de cada uno de los 4 clones estudiados en cada uno de los dos ciclos que ha abarcado el ensayo. Durante el segundo ciclo se ha calculado la eficiencia en cada una de las 8 dosis de riego.

2.1.6.6. Producción de biomasa foliar

El estudio de la producción foliar se llevó a cabo durante el año 2013, cuando las plantaciones se encontraban en el tercer periodo vegetativo del segundo ciclo. Para estimar esta producción se colocaron una serie de cajas de 0,25 m² en las parcelas del clon I-214; concretamente se instalaron tres cajas en la dosis 2 y otras tres en la dosis 8, una caja en cada uno de los tres bloques.

2.1.6.6.1 Índice de área foliar (LAI)

Las mediciones de LAI se realizaron con la sonda SunScan (SS1) de la empresa Delta-T Devices (**Figura 2.1.7.**), que permite conocer el LAI mediante métodos no destructivos. El funcionamiento de este equipo se basa en un complejo modelo de transmisión de la luz a través de una cubierta uniforme, que tiene en cuenta:

- La componente directa y difusa de la luz por encima de la cubierta vegetal, la cual se mide mediante un Sensor de Insolación tipo BF3.
- El ángulo cenital solar, calculado a partir de la latitud, longitud y momento en que se realice la medición
- El ángulo de las hojas de la cubierta, el cual debe ser estimado por el usuario.

SunScan tiene un total de 64 sensores PAR incrustado en una sonda de 1 m de longitud, la cual se introduce bajo la cubierta vegetal para estimar la cantidad de luz que atraviesa el follaje. Este dato, junto con la medición en ese mismo momento de la luz directa y difusa por encima de la cubierta vegetal, permite estimar el LAI en la plantación. Las mediciones pueden realizarse en una amplia gama de condiciones de luz diurna, si bien se recomienda no trabajar con este aparato si el sol es demasiado fuerte o está cerca del horizonte, dado que podrían producirse errores en la medición; indicaciones que han sido respetadas en el presente trabajo.

Figura 2.1.7. Componentes del medidor SunScan (SS1). Sonda con 64 sensores PAR de 1 m de larga, Sensor de Insolación tipo BF3 y PDA para almacenar los datos.

Antes de iniciar las mediciones fue necesario estimar dos parámetros: ELADP (Ellipsoidal Leaf Angle Distribution Parameter), que informa de una mayor horizontalidad o verticalidad de las hojas de la cubierta, y el coeficiente de absorción, que mide la proporción de radiación que absorben las hojas de una determinada especie. El chopo presenta hojas con ángulos de inclinación muy diversos, estimándose que no hay una preponderancia de ningún de ellos, por lo se seleccionó el valor 1 para el parámetro ELADP. Como coeficiente de absorción, se introdujo el valor 0,85, considerado adecuado para la mayor parte de especies arbóreas.

Se realizaron mediciones durante los años 2012 y 2013, cuando las parcelas se encontraban en el segundo y tercer periodo vegetativo tras el rebrote. Durante el primero de los 2 años se realizaron solamente tres mediciones durante el verano: mediados de junio (18 de junio), mediados de julio (19 de julio) y una última medición a mediados de agosto (21 de agosto). El año siguiente se aumentó el número de mediciones, siendo estas realizadas cada 20-30 días y abarcando prácticamente todo el periodo vegetativo. Las mediciones se realizaron a mediodía en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214; se seleccionaron 6 putos por dosis, en los cuales se repitió la medición en las distintas fechas.

Se buscaron diferencias significativas entre las distintas dosis de riego, seleccionado para ello únicamente los datos de LAI recogidos a partir de mediados de Junio, ya que a partir de esta fecha el índice tendía a estabilizarse.

2.1.6.7. Estrés hídrico

Para medir el estrés hídrico foliar y xilemático se contó con la cámara de Scholander (**Figura 2.1.8.**). La hoja en la que se quiere efectuar la medición es presurizada en una cámara de acero que tiene una tapa con un pequeño orificio en el que se introduce el peciolo de la hoja; concretamente la hoja pasa a través de un tapón de goma que sella el agujero de la tapa, contándose con tapones con aberturas de diferentes tamaños para los diferentes tipos y tamaños de hojas. Es importante que la hoja ajuste bien al tapón de goma para evitar que se escape el gas al presurizar. Una vez introducida la hoja y cerrada la cámara, el peciolo deberá asomar por fuera de esta tan solo 1-2 mm. El corte del peciolo de la hoja debe ser recto para facilitar la lectura posterior.

La presión en el interior de la cámara se suministra desde una bombona cargada con gas a presión; el gas utilizado fue el Nitrógeno. Al abrir la llave de paso que permite la circulación de gas hacia la cámara, un manómetro mide la presión en el interior de la misma. Se debe subir la presión lentamente hasta que se vea aparecer una película de agua por el peciolo. En caso de que se produzca burbujeo en la base del peciolo la muestra es descartada, procediendo a realizar la medición en otra hoja. Una vez realizada la lectura se abre la llave que permite despresurizar de nuevo la cámara.

Figura 2.1.8. Cámara de Scholander empleada en el estudio

Las mediciones del estrés hídrico se realizaron durante los veranos de 2012 y 2013, encontrándose las plantaciones en el segundo y tercer periodo vegetativo del segundo ciclo. Las lecturas se llevaron a cabo en el clon I-214, seleccionado tres ejemplares (uno por cada bloque) en cada una de las siguientes dosis: 2, 4, 6 y 8. Según otros estudios realizados anteriormente, en plantaciones pequeñas y homogéneas, como las del presente trabajo, con tres ejemplares por parcela es suficiente para tener una muestra representativa de la parcela. (Selles et al, 2002). Inicialmente se realizaron 2 mediciones por árbol, comprobando en todos los casos que el potencial obtenido en ambas era prácticamente idéntico, por lo que posteriormente se realizó una medición en cada individuo.

Se realizaron mediciones cada 15 días. Durante 2012 únicamente se llevaron a cabo lecturas del Ψ_f a media mañana, mientras que durante 2013, además, se obtuvieron el Ψ_f y el Ψ_{xm} a mediodía. La medición del Ψ_f a media mañana se realizó, en los tres árboles seleccionados, entre las 10:00 y las 11:00 de la mañana, mientras que Ψ_f y el Ψ_{xm} a mediodía se midieron en los mismos tres árboles entre las 13:00 y las 14:00 horas. Las hojas seleccionadas para medir el Ψ_{xm} quedaron introducidas en una bolsa de plástico, la cual se recubrió además con papel de aluminio, dos horas antes de la medición. En el caso del Ψ_f se seleccionaron hojas que estaban expuestas al sol, con el fin de seleccionar siempre muestras que recibían la misma insolación, mientras que para el Ψ_{xm} se seleccionaron hojas a la sombra. La altura a la que se encontraban las hojas seleccionadas era de entre 1 y 2 metros. Una vez cortadas las hojas se procedió

inmediatamente a su medición, transcurriendo entre la corta y la medición menos de 1 minuto.

Las dosis 2, 4, 6 y 8 contaban, además, con medidores TDR, efectuándose un control de la humedad edáfica semanalmente. El promedio de los dos valores semanales obtenidos entre cada una de las mediciones quincenales del estrés hídrico, fue empleado para realizar una regresión entre la humedad edáfica y los potenciales hídricos. En 2012 la regresión se realizó con el Ψ_f a media mañana, mientras que en 2013 se empleó el Ψ_{xm} a mediodía. Los registros de la humedad edáfica comenzaron a mediados de junio en 2013, mientras que en 2012 no se pudo iniciar la medición hasta mediados de julio por problemas técnicos con el equipo.

2.2. Cultivo de olmo de Siberia

2.2.1. Localización

El estudio se ha realizado en dos parcelas ubicadas en la provincia de Soria; la primera de ellas se encuentra junto a la parcela de chopos (**ver epígrafe 2.1.1**) en el Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER-CIEMAT) en el término municipal de Cubo de la Solana; mientras que la segunda se encuentra en la localidad de Almazán dentro de la finca de la Escuela de Capacitación y Experiencias Agrarias perteneciente a la Junta de Castilla y León (**Figura 2.2.1.**). Esta última parcela se encuentra a $41^{\circ}29'$ latitud Norte y $2^{\circ}31'$ longitud Oeste y sus coordenadas en el sistema WGS-1984 30 Norte son X: 537978, Y: 4591311. Aunque la distancia entre ambas parcelas es de poco más de 15 km, la diferencia de altitud es significativa; la parcela de Cubo de la Solana se encuentra a unos 1100 m, mientras que la de Almazán se sitúa a 960 m sobre el nivel del mar.

Figura 2.2.1. Localización de las dos parcelas de ensayo de olmo de Siberia. A la izquierda CEDER (T.M. de Cubo de la Solana) y a la derecha Almazán.

2.2.2. Características climáticas

Las dos parcelas presentan un clima Mediterráneo continentalizado, pudiéndose observar algunas diferencias en los registros meteorológicos a causa de la diferencia de altitud.

2.2.2.1. Registros meteorológicos en el CEDER

En el apígrafe 2.1.2.1 pueden observarse los registros meteorológicos en el CEDER durante el periodo de estudio. El ensayo llevado a cabo con olmo de Siberia tuvo una duración de 4 años (2010-2013).

2.2.2.2. Registros meteorológicos en Almazán

Durante el periodo 2010-2013 se recabaron los siguientes datos meteorológicos de la estación que posee el Instituto Tecnológico Agrario de la Junta de Castilla y León (ITACYL) en esta localidad:

- Temperatura media mensual (°C)
- Precipitación (mm)
- Radiación solar (W.h/m²)

El clima en la localidad de Almazán es bastante similar al del CEDER, pero presenta algunas diferencias al encontrarse a una altitud menor. La temperatura media mensual registrada suele ser ligeramente superior a la del CEDER (**Tablas 2.1-IV y 2.2-I**), mientras que las precipitaciones son menores, sobre todo en verano debido a los volúmenes registrados en forma de tormenta en el CEDER.

Tabla 2.2-I: Temperatura media anual (°C) en Almazán durante el periodo 2010-2013.

AÑO	2010	2011	2012	2013
Temperatura media (°C)	9,9	11,2	10,7	10,0

El efecto de las tormentas de verano se observó especialmente durante 2010, ya que en el CEDER se registraron más de 30 litros de lluvia durante el mes de Agosto, mientras que en Almazán la precipitación fue prácticamente nula en este mes (**Tabla 2.2-II**). Durante el resto del año también fueron más bajas las precipitaciones mensuales registradas en Almazán, por ejemplo durante el mes de Febrero la precipitación en esta localidad fue casi la mitad que en el CEDER.

En 2011, el verano fue bastante seco en ambas localizaciones, pero Almazán presentó además una primavera muy poco lluviosa, quedando la precipitación anual en tan solo 222 mm. Este año, al igual que sucedió en el CEDER, el periodo seco fue especialmente largo (**Figura 2.2.2.**)

El diagrama ombrotérmico de 2012 en los dos emplazamientos objeto de estudio fue muy similar, si bien al finalizar el año la precipitación acumulada fue ligeramente mayor en el CEDER (unos 60 mm). En 2013, Almazán volvió a recoger menos cantidad de lluvia que el CEDER, observándose de nuevo durante el verano más claramente esa diferencia. Este último año, en ambas localizaciones se observaron unas temperaturas excepcionalmente bajas durante las últimas semanas de la primavera.

Tabla 2.2-II: Precipitación mensual (mm) registrada en Almazán durante el periodo 2010-2013.

MES	2010	2011	2012	2013
Ene	33,8	26,7	10,5	26,4
Feb	37,2	15,8	0,9	24,0
Mar	43,9	50,1	7,7	96,4
Abr	35,8	28,6	58,5	55,3
May	82,7	31,8	37	53,9
Jun	104,9	10,6	7,2	21,2
Jul	10,8	3,4	16,1	18,3
Ago	2,1	5,3	4,5	1,5
Sep	11,3	4,3	18,6	18,2
Oct	32,2	16,2	82,6	60,6
Nov	21,5	24,2	23	22,4
Dic	24,7	5,4	19,3	37,2
TOTAL	440,9	222,4	285,9	435,2

Figura 2.2.2. Diagramas Ombrotérmicos de los años 2010, 2011, 2012 y 2013 en Almazán.

Para poder comparar mejor los registros meteorológicos en las dos localidades, se ha realizado un diagrama ombrotérmico con las temperaturas medias mensuales y las precipitaciones medias mensuales del periodo 2010-2013 en los dos emplazamientos (**Figura 2.2.3.**) La precipitación media mensual la mayoría de los meses es entre 10 y 20 mm menor en Almazán, registrándose únicamente un volumen de lluvia similar en ambas localizaciones en Septiembre y Octubre, mientras que el mes de Junio resultó ser más lluvioso en Almazán. El periodo estival en el CEDER no es demasiado lluvioso, pero la diferencia con Almazán es bastante significativa, ya que en este segundo emplazamientos la precipitación es prácticamente nula durante estos meses. La diferencia de temperatura entre las dos localizaciones es muy pequeña, siendo únicamente apreciable durante la primavera y el comienzo del verano, cuando en Almazán la temperatura media es en torno a 1°C superior que en el CEDER.

Figura 2.2.3. Temperatura media mensual (°C) y precipitación media mensual (mm) registrada durante los años 2010, 2011, 2012 y 2013 en el CEDER y Almazán. CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán.

Durante los 4 años en los que se recabaron datos, la radiación solar en Almazán fue ligeramente más alta que en el CEDER (**Tablas 2.1-V y 2.2-III**). Los datos de radiación presentados en ambos casos están bastante próximos a los datos de radiación que se obtienen como media en el centro de la Península Ibérica, donde según Fernández (2004) se registran en torno a 6.150 MJ m^{-2} . La distribución de la radiación a lo largo del año fue similar en ambas localizaciones, registrándose también en Almazán los valores más altos en Agosto. El año 2012 fue el que registró una radiación solar mayor.

Tabla 2.2-III: Radiación total global (MJ m⁻²) en Almazán en el periodo 2010-2013.

MESES	2010	2011	2012	2013
Enero	184	179	224	204
Febrero	254	293	366	254
Marzo	411	374	568	357
Abril	597	600	463	542
Mayo	691	685	767	636
Junio	706	774	814	789
Julio	817	828	895	804
Agosto	725	748	763	772
Septiembre	497	595	555	559
Octubre	379	457	343	361
Noviembre	187	204	191	218
Diciembre	189	194	172	209
TOTAL	5.636	5.930	6.121	5.704

2.2.3. Características edáficas

Se tomaron muestras medias de suelo en tres puntos diferentes de las parcelas del CEDER y Almazán, recogiendo en cada uno de ellos muestras a dos profundidades: 0-30 cm y 30-60 cm. Los resultados muestran que la parcela de Almazán presenta una cantidad de gravas mucho menor que en el CEDER (**Tabla 2.2-IV**), lo que unido a una textura menos arenosa propiciará que este suelo tenga una mayor capacidad de retención de agua. Además, este tipo de texturas posibilitan una mayor acumulación de nutrientes en el suelo.

La conductividad eléctrica es baja en ambas parcelas. El pH en Almazán es considerablemente más alto, presentando el suelo del CEDER un pH ácido y el de Almazán básico. La cantidad de materia orgánica también es mayor en Almazán, mostrando los análisis en este caso unos porcentajes que deben ser considerados como normales. En cuanto a la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio, el suelo de Almazán presenta en los tres casos unos valores más altos, siendo especialmente importante la diferencia en el caso del Nitrógeno, componente que tiene una presencia muy baja en el suelo del CEDER. Teniendo en cuenta estos análisis, se puede decir que las propiedades del suelo de Almazán son más adecuadas para el cultivo que las del suelo del CEDER.

Tabla 2.2-IV: Características del suelo en las parcelas de Almazán y del CEDER.

Determinaciones	Almazán		CEDER	
	0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm
Elementos >2mm (%)	3,1	3	39,9	39,0
Arena (%)	40,0	9,2	84,0	82
Limo (%)	28,0	55,6	8,0	5,4
Arcilla (%)	32,0	35,1	8,0	13
Textura	Franco arcillosa	Franco Arcillo Limosa	Arenosa franca	Arenosa franca
pH	8,04	8,6	5,90	6,4
C. eléctrica (mS/cm)	0,11	0,86	0,17	0,05
Materia orgánica (%)	2,43	2,61	0,92	0,42
N (%)	0,23	0,16	0,03	0,02
P Olsen (ppm)	24,6	6,1	6,6	7,4
K Ac. Amónico (ppm)	298,0	179,1	61,3	65

2.2.4. Diseño de la experiencia

En el CEDER, el ensayo se llevó a cabo en dos subparcelas que se encontraban separadas unos metros, una de ellas albergó olmos en secano y en la otra los olmos recibieron un aporte hídrico adicional mediante riego por goteo. Durante el año de establecimiento todas las parcelas de regadío recibieron la misma cantidad de agua con el fin de asegurar un correcto establecimiento de la plantación, mientras que en años posteriores se establecieron dos dosis de riego diferentes, una dosis con la que se estimaba que las plantas tendrían totalmente cubiertas sus necesidades hídricas y otra en la que se aportaba una cantidad de agua menor (**ver epígrafe 2.2.5.5.**). Además, tanto en la dosis de riego más alta como en el secano se contó con subparcelas con diferentes densidades: 3.333 plantas ha⁻¹ y 6.666 plantas ha⁻¹ (**Figura 2.2.4.**). En el caso de la dosis de riego más baja solo se establecieron subparcelas con una densidad de 6.666 plantas hectárea (**Tabla 2.2-V**).

Se realizaron tres repeticiones de 60 m² de cada una de las combinaciones de riego y densidad que se querían estudiar. Se estableció, así mismo, una fila más alrededor de cada una de las parcelas con el fin de evitar el efecto borde.

En Almazán solamente se implantaron olmos en secano y a una densidad de 3.333 plantas por hectárea (espaciamiento de 3 x 1 m), contando, al igual que en el CEDER, con tres repeticiones. Cada una de las subparcelas tenía 60 m² y contaba con una fila alrededor para evitar el efecto borde.

Figura 2.2.4. Espaciamiento de las plantaciones en las dos densidades estudiadas en las parcelas de olmo de Siberia del CEDER.

Tabla 2.2-V: Condiciones de cultivos de las parcelas del CEDER y Almazán. Diseño realizado por duplicado para cada uno de los turnos de corta estudiados (3 y 4 años).

Localidad	Aportes hídricos	Densidad (plantas ha ⁻¹)	Nº de repeticiones	Área de cada repetición (m ²)
CEDER	Secano	3333	3	60
		6666	3	60
	Dosis más baja (R1)	6666	3	60
	Dosis más alta (R2)	3333	3	60
		6666	3	60
Almazán	Secano	3333	3	60

El diseño experimental se realizó por duplicado a fin de estudiar 2 turnos de corta. Unas subparcelas se cortaron con turno de 3 años y otras fueron cortadas a los 4 años de edad.

2.2.5. Implantación y manejo de las parcelas

2.2.5.1. Preparación del suelo y plantación

La preparación de la parcela del CEDER consistió únicamente en la realización de un subsolado cruzado. La plantación se realizó de forma manual a mediados de noviembre de 2009, por lo que no se consideró oportuno abonar la parcela hasta la primavera, ya que los nutrientes, en especial el nitrógeno, podrían haberse perdido para el inicio del periodo vegetativo. Los plantones de olmo empleados procedían de un vivero de la

provincia de Guadalajara y habían sido sembrados en la primavera del año 2009; se encontraban en alvéolos y tenían una altura aproximadamente de 20-30 cm (**Figura 2.2.5.**). Tras la plantación se aplicó un riego para facilitar el establecimiento de los olmos, siendo la dosis aplicada de $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

En Almazán la plantación se llevó a cabo a finales del mes de abril de 2010, anteriormente se había realizado una labor con un arado de vertedera en el mes de enero y unos días antes de la plantación se había pasado el cultivador. Las plantas con cepellón y en alveolos se obtuvieron de un vivero situado a escasos kilómetros del lugar de la plantación. Se realizó un riego de apoyo tras el establecimiento de los plantones para mejorar enraizamiento de los olmos, aplicando la misma dosis que en el CEDER. No se realizó abonado de fondo, ya que una vez estudiados los análisis de suelo se consideró la parcela lo suficientemente fértil.

Figura 2.2.5. Ejemplar de olmo el día de su plantación en el CEDER y estado de la parcela en Almazán durante las primeras semanas de ensayo

El invierno de la implantación de los olmos, además de bastante frío, fue especialmente lluvioso en el CEDER alcanzándose unas precipitaciones de unos 200 mm de diciembre a febrero; lo que propició que las parcelas estuviesen inundadas durante bastante tiempo (**Figura 2.2.6.**). Al ser el olmo de Siberia bastante intolerante a los suelos encharcados (Loucks et al. 1973) algunos individuos murieron y se procedió a su reposición en la primavera, ya que al tratarse de parcelas experimentales no se quería prescindir desde un principio de estos ejemplares. Una vez realizada la reposición de marras, todos los olmos sobrevivieron durante el primer periodo vegetativo.

Figura 2.2.6. Estado de las parcelas del CEDER a finales de febrero de 2010

En Almazán, al realizarse la implantación durante la primavera los olmos no tuvieron problemas de encharcamientos, pero también se observaron algunas marras que tuvieron que ser repuestas. Una vez realizada la reposición de marras, tampoco se contabilizaron nuevas pérdidas durante el primer periodo vegetativo.

2.2.5.2. Abonado

En Almazán no se abonó la parcela ninguno de los 4 años de estudio debido a la fertilidad del suelo, mientras que en el CEDER al contar con un suelo de baja calidad agrícola fue necesaria la fertilización. Se aportó un abono complejo en la primavera de 2010, 2011 y 2013 con el objetivo de aportar a la parcela los tres elementos fundamentales: Nitrógeno, fosforo y potasio (**Tabla 2.2-VI**). Las aplicaciones se realizaron en las parcelas de secano y regadío.

Tabla 2.2-VI: Fertilización en la parcela de olmos ubicada en el CEDER. R: edad de la raíz, T: edad del tallo.

Año	Edad de la plantación	Fecha del aporte	Abono	Dosis
2010	R1T1	25-abr	N:P ₂ O ₅ :K ₂ O → 8-15-15	400 kg/ha
2011	R2T2	10-jun	N:P ₂ O ₅ :K ₂ O → 22-8-10	350 kg/ha
2012	R3T3	NO SE REALIZÓ ABONADO		
2013	R4T1 (50%) y R4T4 (50%)	05-jun	N:P ₂ O ₅ :K ₂ O → 22-8-10	400 kg/ha

2.2.5.3. Control de malas hierbas

Antes de la plantación las labores preparatorias del suelo fueron suficientes para el control de malas hierbas en las dos localizaciones. no se realizó control de malas hierbas en la parcela del CEDER, mientras que en la parcela de Almazán se ayudó a su control mediante el uso del cultivador. Posteriormente, se realizó control de flora arvense, en especial durante el primer año de cultivo, cuando las malas hierbas pueden hacer más daño a la plantación. Durante el año 2010 se realizaron 4 controles mecánicos a lo largo de todo el periodo vegetativo en el CEDER, en 2011 los controles se redujeron a dos y en 2012 fue realizado solamente uno. Tras el primer periodo vegetativo, la eliminación de malas hierbas se llevó a cabo solamente durante la primavera, ya que a medida que los arboles tenían un mayor follaje no era tan necesario eliminar malas hierbas y, además, el uso del motocultor entre las líneas era cada vez más complicado. En 2013 se llevó a cabo un control mecánico mediante el uso de motocultor en todas las parcelas. En las parcelas con turno de tres años se realizó otro control adicional mediante el uso de desbrozadora para eliminar las malas hierbas más próximas a los olmos que estaban dificultando el rebrote.

En el ensayo de Almazán se pasó el motocultor un mes después de la plantación, además debido a la proliferación de cardos (*Cirsium arvense*) se realizó un tratamiento mediante el uso de glifosato. En 2011, se pasó el motocultor entre las líneas de olmo al comienzo del periodo vegetativo, mientras que en 2012 y 2013 no se realizó ningún control de malas hierbas debido al tamaño que habían alcanzado las plantas. Tampoco se llevó a cabo ningún trabajo en las parcelas rebrotadas.

2.2.5.4. Plagas y enfermedades

En cuanto a plagas y enfermedades, no se observó ninguna de importancia durante el periodo de estudio, por lo que no fue necesario llevar a cabo ningún tratamiento.

2.2.5.5. Aporte hídrico

El agua en las parcelas de regadío fue aportada mediante riego por goteo con programadores diferenciales en cada una de las subparcelas. Durante el primer año todas las parcelas recibieron la misma cantidad de agua, mientras que en años posteriores se establecieron dos dosis de riego diferentes, una dosis con la que se estimaba que las plantas tendrían totalmente cubiertas sus necesidades hídricas (R2) y otra en la que se aportaba una cantidad de agua menor (R1). Para determinar los volúmenes de agua necesarios se calculó la evapotranspiración potencial según el método de Thornthwaite y se tuvieron en cuenta los factores del cultivo K_c calculados para otros especies leñosas en corta rotación (Guidi et al, 2008); si bien hay que tener en cuenta que es muy complicado precisar la cantidad de agua de riego que se necesita aplicar, ya que dependerá también de las características del suelo y de las condiciones de cultivo (densidad, fertilización, etc.).

El volumen de agua en la dosis más alta estuvo entre los 4.000 y los 5.000 m³ ha⁻¹ año⁻¹, mientras que no llegó a los 2.000 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en las parcelas menos regadas (**Tabla 2.2-VII**). Estos valores, así como las fechas de primer y último riego, variaron ligeramente de un año a otro en función de la climatología. En el año 2011, se prolongó el periodo de riego hasta finales de septiembre, dado que el final de verano fue muy seco y caluroso; mientras que en el año 2012, debido a las bajas precipitaciones registradas en primavera, se debió comenzar con el riego antes de lo habitual, acumulando un volumen de agua de riego al final del periodo vegetativo mayor. Por su parte, el volumen suministrado durante el año 2013 fue menor, al registrarse unas precipitaciones más altas de lo habitual en verano.

Tabla 2.2-VII: Volumen de agua (m³ ha⁻¹) y fecha de inicio y finalización del riego en las parcelas de olmo del CEDER

Año	Fecha de Inicio - fin	Dosis más baja (R1)	Dosis más alta (R2)
2010	3 jul - 17 sept	3.000	3.000
2011	24 jun - 27 sept	1.800	4.300
2012	7 jun - 18 sept	1.950	5.200
2013	25 jun - 7 sept	1.375	4.200

El volumen total aplicado se suministró a las parcelas mediante pequeñas dosis de riego, las cuales se espaciaban más o menos en el tiempo dependiendo de la demanda de cada periodo; estas podían llevarse a cabo cada dos días o incluso diariamente. En la **Figura 2.2.7**, se muestra la distribución del volumen de agua de riego por quincenas durante los 4 años de estudio.

Figura 2.2.7. Volumen de riego aportado en las parcelas de olmo en cada quincena (%) respecto al total. Considerados los cuatro años de estudio (2010-2013).

2.2.6. Observaciones, mediciones y determinaciones experimentales

2.2.6.1. Brotación

Durante los cuatro años que duró el ensayo con olmo se registró en las parcelas del CEDER la fecha de brotación; considerándose que la brotación había tenido lugar cuando más del 50% de los individuos habían iniciado su periodo vegetativo. También se determinó cada año el número de grados-día que eran necesarios para que se iniciase la brotación, siguiendo la metodología descrita en el ensayo con chopo (**ver epígrafe 2.1.6.1.**).

2.2.6.2. Mortalidad

En ambas localizaciones, se realizaron conteos tras la implantación y al finalizar cada uno de los cuatro periodos vegetativos en la totalidad de cada una de las subparcelas.

2.2.6.3. Número de brotes

Para conocer el número de brotes durante el primer ciclo del cultivo se llevó a cabo un conteo antes de realizar la corta de los árboles con cuatro años de edad en cada una de las plantaciones del ensayo. Se realizó también un conteo del número de brotes que poseía cada cepa después de ser cortada (rebrotas). Se tuvieron en cuenta todos aquellos brotes que contenía la planta independientemente de su tamaño y se tuvo especial cuidado en la diferenciación de tallos y ramas, ya que, debido a la morfología que presentaban los olmos, con facilidad podían confundirse. Si el origen del brote tenía lugar a una distancia superior a los 5 cm de la base del tallo, este era considerado una rama.

2.2.6.4. Crecimiento y producción de biomasa seca

Al final de cada uno de los periodos vegetativos se cortaron al azar 15 plantas de olmo en cada uno de los tratamientos, un total de 90 plantas cada año, para así poder estimar con métodos no destructivos, a partir de la altura y el diámetro de las plantas, mediante ecuaciones de regresión la evolución de la cantidad de biomasa presente en las parcelas. En cada una de las plantas cortadas se midió la altura máxima mediante una regla telescópica y el diámetro basal, a una altura de 10 cm, de cada uno de los brotes mediante un calibre digital, lo que permitió a su vez calcular el área basal de la planta. En cada ejemplar fue necesaria la medición de 2 diámetros, ya que la forma del tallo de los olmos se asemeja más a una elipse que a un círculo (diámetros cruzados). Posteriormente, se obtuvo el peso húmedo de las plantas pesándolas en una báscula (precisión: 0,5 g) y se estimó el peso seco una vez conocida la humedad. Se realizaron modelos de regresión anuales y también un modelo conjunto de los cuatro años del primer ciclo de cultivo, simplificando la estimación de la producción en una sola ecuación.

Al final de cada uno de los periodos vegetativos se midió también la altura y el diámetro basal de cada brote en un total de 60 individuos de cada una de las diferentes condiciones de cultivo. Las alturas y áreas basales se introdujeron en las ecuaciones de regresión obtenidas y se obtuvo una estimación anual de la biomasa producida en cada uno de los tratamientos. Los modelos del primer y el segundo año del primer ciclo no pudieron ser validados, pero sí se pudo realizar una comparación entre la biomasa estimada con las ecuaciones y la real el tercer y el cuarto año, cuando se llevaron a cabo las cortas.

Tras el rebrote, debido a la muerte de algunos individuos, no se pudo llegar a los 60 ejemplares por tratamiento en las parcelas de densidad 3.333 pl ha^{-1} , si bien el número de individuos perdido fue muy bajo. En estos individuos solo se midió la altura y no se realizó modelo de regresión. Se estimó el peso de la plantación pesando 10 individuos de cada condición de cultivo seleccionados al azar.

Al final de cada periodo vegetativo se determinó el contenido de humedad en 3 muestras de cada una de las condiciones de cultivo. En las plantaciones rebrotadas del CEDER se realizó únicamente una determinación en seco y otra en regadío. La humedad de las plantas fue calculada mediante pesada de las muestras en húmedo y posteriormente en seco tras el secado de estas en estufa a 60°C hasta peso constante, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 14774-2.

2.2.6.5. Eficiencia en el uso del agua (EUA)

Para el cálculo de la EUA se estimó la cantidad de agua que recibieron los olmos anualmente. El agua de lluvia caída cada año en el CEDER se obtuvo de los datos registrados en la estación meteorológica instalada para estos ensayos en la parcela, mientras que en el caso de Almazán se emplearon los datos de la estación que posee el Instituto Tecnológico Agrario de la Junta de Castilla y León (ITACYL) en esta localidad. Para conocer el agua de riego que se suministraba se contó con contadores en las distintas parcelas de estudio.

La producción de biomasa seca (ramas y tallos) se obtuvo a partir de los modelos de regresión realizados. Se introdujeron las alturas y áreas basales de 60 individuos de cada una de las diferentes condiciones de cultivo en las ecuaciones de regresión obtenidas. En el caso de los rebrotes la estimación de la producción se llevó a cabo pesando 10 individuos de cada condición de cultivo seleccionados al azar.

El cálculo de la EUA se realizó para cada uno de los 4 años del primer ciclo y para todo el ciclo en conjunto. Además, en las parcelas con turno de tres años se estimó la eficiencia durante el primer año tras el rebrote.

2.2.6.6. Producción de biomasa foliar

La evaluación de la producción foliar se llevó a cabo únicamente en las parcelas del CEDER, donde se comenzó el estudio en 2011 (segundo periodo vegetativo). Al finalizar el verano se recubrieron 2 olmos en cada una de las condiciones de cultivo con una malla, la cual recogió la biomasa foliar presente en cada uno de estos individuos. En 2012 y 2013, se cambió el método de estimación, ya que los olmos presentaban un tamaño demasiado grande que dificultaba el uso de las mallas, por lo que se establecieron cajas en el suelo que recogían las hojas desprendidas de los olmos. Concretamente, se utilizaron cajas de 0,25 m², ubicando en 2012 tres en cada condición de cultivo, dos de ellas situadas a cada uno de los lados de una fila de olmos y la otra en el pasillo existente entre dos filas. En 2013, las trampas se distribuyeron solamente por las parcelas de secano (en ambas densidades) y en las parcelas de regadío que recibían una dosis de riego más alta y densidad de 6666 plantas por hectárea. Se pusieron seis cajas en cada una de estas tres condiciones de cultivo, las cuales se distribuyeron en dos filas de la misma manera que se había hecho en 2012. Durante este último año, también se establecieron 6 cajas en una de las parcelas de olmos rebrotados, concretamente se ubicaron en una parcela de olmos con dosis de riego y densidad altas.

2.2.6.6.1 Índice de área foliar (LAI)

Las mediciones de LAI se realizaron con la sonda SunScan (SS1) utilizada también en el ensayo con chopos (**ver epígrafe 2.1.6.6.1**). Se estimaron como valores de partida, un coeficiente de absorción de 0,85 y un parámetro ELADP igual a 1.

Se realizaron mediciones durante el tercer y el cuarto periodo vegetativo (años 2012 y 2013). El primero de los dos años solamente se realizaron mediciones en tres fechas, una a mediados de junio (18 de junio), otra a mediados de julio (19 de julio) y la última a mediados de agosto (21 de agosto). Las mediciones se realizaron a mediodía y únicamente en las parcelas del CEDER, seleccionando seis puntos al azar en cada una de las cinco condiciones de cultivo. Los puntos fueron marcados y se realizó la medición en los mismos lugares en las tres fechas.

Durante el año 2013, se realizó también un seguimiento del LAI, comenzando en esta ocasión con las mediciones a mediados de mayo y realizándose estas hasta mediados de septiembre cada 20-30 días. Se incluyeron tanto las parcelas del CEDER como las parcelas de Almazán y la toma de datos se llevó a cabo siempre en los mismos seis puntos de cada condición de cultivo. No se midió el LAI en las parcelas rebrotadas.

Para establecer diferencias significativas entre las distintas condiciones de cultivo, se tomaron únicamente los datos de LAI recogidos a partir de mediados de Junio, ya que a partir de estas fechas el índice tendía a estabilizarse. Los valores medios del LAI recogidos en las distintas condiciones de cultivo a partir del 15 de junio se relacionaron con la producción de biomasa seca mediante una regresión lineal.

2.2.6.7. Estrés hídrico

Al igual que en el estudio llevado a cabo con el chopo, para medir el estrés hídrico foliar y xilemático se utilizó la cámara de Scholander (**ver epígrafe 2.1.6.7**). Durante el tercer periodo vegetativo (año 2012) se midió solamente el Ψ_f a media mañana, mientras que en 2013 junto con este potencial se midieron también los Ψ_f y Ψ_{xm} a mediodía. Cada uno de estos dos años, se realizaron lecturas del potencial a lo largo del verano con una periodicidad de aproximadamente 15 días. El estudio se realizó en parcelas no rebrotadas con densidad de plantación 6666 pl ha⁻¹, seleccionando el primero de los dos años plantas en secano y en cada una de las dos dosis de riego y el segundo año solo en secano y en la dosis de riego más alta. Se seleccionaron tres árboles en cada tratamiento, los cuales quedaron marcados, en los que se realizaron quincenalmente las mediciones. Según Selles et al, 2002 en plantaciones pequeñas y homogéneas con tres ejemplares por parcela es suficiente para tener una muestra representativa de la parcela. Inicialmente se realizaron 2 mediciones por árbol, comprobando en todos los casos que el potencial obtenido en ambas era prácticamente idéntico, por lo que posteriormente se realizó una medición en cada individuo.

La medición del Ψ_f a media mañana se realizó en los tres árboles seleccionados entre las 10:00 y las 11:00 de la mañana, mientras que los Ψ_f y Ψ_{xm} a mediodía se midieron en los mismos tres árboles entre las 13:00 y las 14:00 horas. Al ser la hoja del olmo muy pequeña, fue necesario seleccionar pequeñas ramillas en las que realizar la lectura. Las ramillas en las cuales se quería medir el Ψ_{xm} quedaron introducidas en una bolsa de plástico, la cual se recubrió además con papel de aluminio, dos horas antes de la medición. En el caso del Ψ_f se seleccionaron ramillas que estaban expuestas al sol, con el fin de seleccionar siempre muestras que recibían la misma insolación, mientras que para el Ψ_{xm} se seleccionaron ramillas a la sombra. La altura a la que se encontraban las ramillas seleccionadas era de entre 1 y 2 metros. Una vez cortadas las hojas se procedió inmediatamente a su medición, transcurriendo entre la corta y la medición menos de 1 minuto.

Para relacionar el estrés hídrico que presentaban los olmos con su crecimiento, se midió mensualmente el diámetro basal (diámetros cruzados) de 15 plantas seleccionadas al azar en cada una de las condiciones de riego, empezando a mediados de junio y finalizando a mediados de septiembre. Posteriormente, se calculó el incremento mensual del área basimétrica en cada una de las disponibilidades hídricas, valores mensuales a los que se les asoció un Ψ_f a media mañana, el cual se obtuvo realizando el promedio de las dos mediciones quincenales del potencial llevadas a cabo en cada periodo.

3. RESULTADOS

3.1. Cultivo de chopo

3.1.1. Brotación

Los diferentes clones de chopo presentaron distintas fechas de brotación, siendo el periodo vegetativo más largo en unos que otros. El clon que iniciaba su crecimiento antes fue I-214, que en ocasiones llegó a hacerlo hasta casi un mes antes que el resto (**Tabla 3.1-I**). El clon AF-2 ocupa la segunda posición, si bien, a pesar de proceder del mismo cruzamiento que I-214 (*P. deltoides* y *P. nigra*), la diferencia en las fechas con el clon anterior fue apreciable. Finalmente brotaban los clones Monviso y Pegaso, ambos (*P. deltoides* x *P. trichocarpa*) x *P. nigra*, que solían iniciar su periodo vegetativo a la vez. Las fechas de brotación oscilaron entre comienzos de abril y comienzos de mayo, en función de la climatología, pero año tras año se repetía el mismo orden.

Tabla 3.1-I: Fecha de brotación de los distintos clones y grados-día acumulados hasta esta fecha.

CLON	2009		2010		2011		2012		2013	
	Fecha	°C-día	Fecha	°C-día	Fecha	°C-día	Fecha	°C-día	Fecha	°C-día
AF-2	05/05	132,6	28/04	130,9	13/04	133,7	08/05	129,1	06/05	111,8
I-214	03/04	61,3	24/04	94,9	07/04	90,1	09/04	92,8	17/04	72,2
Monviso	04/05	126,5	04/05	157	16/04	146	10/05	152,1	07/05	119
Pegaso	04/05	126,5	04/05	157	16/04	146	10/05	152,1	07/05	119

Los grados-día necesarios para iniciar la brotación fueron entre 60 y 90 para el clon I-214, en el caso del clon AF-2 se requirieron entre 110 y 130, mientras que los clones Monviso y Pegaso fueron los que más temperatura acumulada necesitaron, iniciándose la brotación cuando se habían acumulado entre 125 y 160 grados-día.

3.1.2. Mortalidad

Durante el primer ciclo de tres años, la mortalidad de las plantaciones de chopo fue baja, llegando a sobrevivir el 100% de los individuos en el caso del clon I-214. También mostraron una más que aceptable supervivencia los clones AF-2 y Monviso, con menos del 3% de los individuos perdidos. El clon que presentó una mayor mortalidad fue Pegaso (**Figura 3.1.1.**).

El rebrote no fue bueno en el clon AF-2, ya que presentó más de un 30% de árboles muertos tras realizar la primera corta. Los clones I-214 y Monviso rebrotaron bien y presentaron tasas de supervivencia muy próximas al 100%, mientras que en el clon Pegaso, que era el que más mortalidad había tenido durante el primer ciclo, añadió

algunos individuos más alcanzando una mortalidad de en torno al 10% al finalizar el primer año del segundo ciclo. En años posteriores, la mortalidad siguió aumentando ligeramente en todos los clones menos en Monviso, que presentó al final del segundo ciclo una tasa de supervivencia de más del 96%. El segundo clon que mejor se comportó fue I-214 con un 95% de ejemplares vivos, mientras que Pegaso se acercó al 85% de supervivencia. El clon con una mayor mortalidad fue el AF-2, contabilizándose al finalizar los dos primeros ciclos tan solo un 64,6% de árboles supervivientes.

Figura 3.1.1. Porcentaje de supervivencia de los distintos clones de chopo al finalizar el primer ciclo del cultivo (2010) y durante los tres años del segundo ciclo (2011, 2012 y 2013).

Durante el primer ciclo de cultivo, antes de que se diferenciases dosis de riego, la mortalidad en las distintas subparcelas presentó ligeras variaciones que simplemente se deben achacar al azar (**Tabla 3.1-II**). Tras el rebrote y la diferenciación de las 8 dosis de riego, hay que reseñar que la dosis más alta no sumó ningún individuo muerto a los ya perdidos durante el primer turno, mientras que la dosis más baja perdió casi un 25% de sus ejemplares. Sin embargo, en las dosis 2 y 3 la mortalidad fue mayor que en otras dosis más bajas, por lo que no se observa una relación clara entre el riego y la supervivencia de los chopos.

Tabla 3.1-II: Porcentaje de supervivencia en las distintas dosis de riego de chopo al finalizar el primer ciclo del cultivo (2010) y durante los tres años del segundo ciclo (2011, 2012 y 2013).

DOSIS	Supervivencia (%)			
	PRIMER CICLO	SEGUNDO CICLO		
	2010	2011	2012	2013
1	94,17	94,17	94,17	94,17
2	95,83	86,25	86,67	85,83
3	95,83	80,42	80,00	80,00
4	98,33	80,42	80,42	80,83
5	93,33	91,25	90,83	90,42
6	100,00	96,25	94,58	94,58
7	97,50	87,50	84,58	85,00
8	99,17	95,42	71,25	71,67

3.1.3. Humedad edáfica

Con los datos recogidos a tres profundidades y en dos bloques diferentes de cada dosis se obtuvo un dato medio de humedad (**Figura 3.1.2.**). Este dato es muy útil para realizar modificaciones en el volumen de agua de riego aportada, ya que ofrece información sobre la cantidad de agua disponible realmente para las plantas.

Las primeras mediciones del año 2011 se realizaron con los TDR entre las líneas de gotero, observándose que las dosis 5, 6 y 8 presentan una humedad del suelo muy similar y excesivamente baja, mientras que la dosis más regada tan solo superaba ligeramente el 8%. Tras cambiar los TDR junto a las líneas de gotero, la humedad de las dosis más bajas quedó entre el 6% y el 10%, mientras que la del suelo de la dosis 2 superó el 12% y se acercó al 14% en la dosis 1. Estas humedades están bastante próximas a las que según la USDA debe presentar un suelo de estas características entre la capacidad de campo y el punto de marchitez (Saxton y Rawls, 2006).

En los siguientes años las humedades edáficas se ajustaron aun mejor a los datos de la USDA, ya que la humedad de la dosis menos regada estuvo por debajo del 5% mientras que la más regada superó tan solo ligeramente el 10%. Si bien, hay que tener en cuenta que las precipitaciones registradas y la proximidad entre capacidad de campo y punto de marchitez dificultaron una perfecta diferenciación entre dosis. Destaca el fuerte incremento de la humedad a mediados de julio de 2013, a causa de las tormentas que tuvieron lugar en estas fechas en el CEDER

Figura 3.1.2. Humedad edáfica (%) registrada en cinco de las subparcelas de chopo durante los 3 años de la segunda rotación (2011, 2012 y 2013).

3.1.4. Número de brotes

Durante el primer ciclo de tres años, buena parte de los chopos presentaron solamente un brote, siendo muy pocos los árboles en los que se contabilizaron más de 3. El número máximo de brotes alcanzado fue 7 y se observó en un ejemplar del clon Monviso. El clon AF-2 fue el que menor cantidad de brotes tenía con una media de 1,22 brotes por cepa (**Tabla 3.1-III**), mientras que los clones I-214 y Pegaso alcanzaron medias en torno a los 1,5 tallos por árbol. El clon Monviso fue el que mayor número de brotes presentó, estando su media cerca de los 1,9 brotes por cepa.

Tabla 3.1-III: Número de brotes por planta en cada uno de los clones de chopo al finalizar el primer ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Clon	Media	Máximo	Mínimo
AF-2	1,22 (c)	4	1
I-214	1,56 (b)	4	1
Monviso	1,89 (a)	7	1
Pegaso	1,45 (b)	5	1
MEDIA	1,53		

El número de brotes que presentaron los chopos tras el rebrote (2º ciclo) fue mayor que durante el ciclo anterior (**Figura 3.1.3.**), contabilizándose en la mayoría de las plantas entre 5 y 11 brotes. La distribución del número de vástagos se asemeja a una distribución normal, observándose desde ejemplares con un solo brote hasta plantas con más de 20, siendo 23 el número máximo de brotes registrado.

Figura 3.1.3. Número de brotes por planta en el conjunto de las subparcelas de chopo el primer año del segundo ciclo.

Al igual que sucediese durante el primer ciclo, el ejemplar en el que se observó un mayor número de brotes fue del clon Monviso, además este clon también volvió a ser el que presentó una media más alta, registrándose un promedio de casi 10 brotes por tocón (**Tabla 3.1-IV**). El segundo clon con mayor número de brotes por árbol fue I-214, mientras que la tercera plaza la ocupó Pegaso. AF-2 volvió a ser el clon en el que se contabilizaron menos brotes, quedando muy por debajo del resto con una media de 4,77 brotes por planta.

Tabla 3.1-IV: Número de brotes por planta en cada uno de los clones de chopo el primer año tras el rebrote. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Clon	Media	Máximo	Mínimo
AF-2	4,77 (d)	12	1
I-214	9,32 (b)	19	2
Monviso	9,95 (a)	23	1
Pegaso	8,43 (c)	20	1
MEDIA	8,12		

Al analizar el número de brotes por dosis de riego, se observó que el factor agua no fue muy relevante, ya que en la mayoría de las parcelas se registraron valores similares. Únicamente es significativamente menor, el número de brotes obtenido en la dosis más baja, en la que tan solo se registraron 6,78 brotes por planta como media (**Tabla 3.1-V**).

Tabla 3.1-V: Número de brotes por planta en las distintas dosis de riego el primer año tras el rebrote (considerados los 4 clones). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Dosis	Media	Máximo	Mínimo
1	8,15 (a)	19	1
2	8,18 (a)	19	1
3	8,83 (a)	23	1
4	9,24 (a)	20	1
5	8,60 (a)	18	1
6	8,66 (a)	20	1
7	8,91 (a)	18	1
8	6,78 (b)	15	1

3.1.4.1. Mortalidad brotes durante el segundo ciclo

Al final del segundo periodo vegetativo se observó que el número de brotes por cepa había descendido en todos los clones. En este caso como máximo se contabilizaron 18 brotes, siendo un ejemplar del clon I-214 el que presentó esta cifra. El clon AF-2 es el que menos brotes seguía presentando con poco más de 4 por planta como media (**Tabla 3.1-VI**), Pegaso había perdido alrededor de 1,5 brotes y ocupó la tercera posición, mientras que Monviso es el que presentó una mayor mortalidad, descendiendo de 9,95 a tan solo 7,74 brotes por planta. Los ejemplares del clon I-214 perdieron también un buen número de brotes, pero menos que los del clon Monviso.

En todas las dosis de riego disminuyó el número de brotes por cepa al finalizar el segundo ciclo. La dosis no parece ser relevante en esta disminución, ya que no se observaron mayores tasas de mortalidad en las dosis más bajas, descendiendo la cantidad de brotes en dosis altas y bajas por igual (**Tabla 3.1-VII**). La dosis menos regada siguió siendo la que presentó un menor número de brotes, con tan solo 5,55 por planta.

Tabla 3.1-VI: Número de brotes por planta en cada uno de los clones de chopo al finalizar el segundo ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Clon	Media	Máximo	Mínimo
AF-2	4,07 (c)	12	1
I-214	7,92 (a)	18	2
Monviso	7,74 (a)	16	1
Pegaso	7,01 (b)	17	1
MEDIA	6, 68		

Tabla 3.1-VII: Número de brotes por planta en las distintas dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años (considerados los 4 clones). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Dosis	Media	Máximo	Mínimo
1	6,58 (ab)	14	1
2	7,25 (ab)	17	1
3	7,12 (ab)	13	1
4	7,45 (a)	17	1
5	7,54 (a)	18	1
6	7,14 (ab)	15	1
7	6,37 (bc)	17	1
8	5,55 (c)	15	1

3.1.5. Crecimiento y producciones

3.1.5.1. Alturas y Áreas basimétricas

3.1.5.1.1 Al final del primer ciclo de tres años

Tras tres periodos vegetativos el clon que presentó una altura media menor fue Pegaso con poco más de 5 metros, mientras que los otros tres clones se acercaron o sobrepasaron los 6 m. Los clones que mostraron un mayor crecimiento en altura fueron AF-2 y Monviso, si bien entre este último y el clon I-214 no se encontraron diferencias estadísticamente significativas (**Figura 3.1.4. y Tabla 3.1-VIII**).

Figura 3.1.4. Altura total media (m) de los diferentes clones de chopo al finalizar el primer ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Tabla 3.1-VIII: Análisis de varianza (ANOVA) para la altura (m) al finalizar el primer ciclo de tres años. DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
Altura total (m)	Entre Grupos	156,9	3	52,3	52,1	0.0 *
	Intra grupos	929,9	927	1,0		
	Total	1.086,8	930			

En cuanto al AB, el clon Pegaso presentó un área por planta significativamente menor que el resto, con algo menos de 14 cm² por árbol. Los clones I-214 y Monviso alcanzaron AB muy similares, sobrepasando ambos los 20 cm² por planta, mientras que el clon AF-2 fue el que presentó un área significativamente mayor, superando su media los 27 cm² por ejemplar (**Figura 3.1.5. y Tabla 3.1-IX**).

Figura 3.1.5. Área basimétrica (AB) media por planta (cm²) en los diferentes clones de chopo al finalizar el primer ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Tabla 3.1-IX: Análisis de varianza (ANOVA) para el AB por planta (cm²) al finalizar el primer ciclo de tres años. DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
Área basal total (cm2)	Entre Grupos	20.044,20	3	6.681,38	80,44	0.0 *
	Intra grupos	77.080,20	928	83,06		
	Total	97.124,30	931			

3.1.5.1.2 Al final del segundo ciclo de tres años

Los chopos alcanzaron alturas similares a las del primer ciclo en aquellas parcelas en las que se suministró una mayor cantidad de agua de riego. El clon que mostró en este caso mayores alturas fue el I-214, superando en algunas dosis los 6 m de media (**Figura 3.1.6.**). El clon Pegaso volvió a registrar bajos crecimientos en altura, quedando la altura media por debajo de los 5,5 m en las parcelas más regadas y superando solo ligeramente los 2 m en las dosis más bajas. En el conjunto de las dosis de riego no se obtuvieron diferencias significativas en altura entre este clon y los clones AF-2 y Monviso (**Figura 3.1.7.**). En ninguno de los cuatro clones se observaron diferencias significativas en cuanto a la altura en las tres primeras dosis de riego, registrándose incluso en alguno de ellos valores medios más altos en la segunda y en la tercera dosis que en la primera. Al analizar todos los clones conjuntamente se obtuvo el mismo resultado que analizando clones por separado, no observándose diferencias entre las tres dosis más altas (**Figura 3.1.8.**).

Figura 3.1.6. Altura total media (m) de cada clon en cada una de las 8 dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Figura 3.1.7. Altura total media (m) de cada clon en el conjunto de las dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Figura 3.1.8. Altura total media (m) por dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años (considerados los 4 clones en conjunto). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Tabla 3.1-X: Análisis de varianza (ANOVA) de la altura (m) por clon y por dosis de riego (los cuatro clones en conjunto y cada uno por separado) al finalizar el segundo ciclo de tres años. DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
Altura total (m) AF-2	Entre Grupos	118,87	7	16,98	21,79	0.0 *
	Intra grupos	110,66	142	0,78		
	Total	229,53	149			
Altura total (m) I-214	Entre Grupos	340,55	7	48,65	58,47	0.0 *
	Intra grupos	181,38	218	0,83		
	Total	521,93	225			
Altura total (m) Monviso	Entre Grupos	234,88	7	33,55	39,11	0.0 *
	Intra grupos	190,47	222	0,86		
	Total	425,35	229			
Altura total (m) Pegaso	Entre Grupos	210,86	7	30,12	41,92	0.0 *
	Intra grupos	140,12	195	0,72		
	Total	350,98	202			
Altura total (m) por clones	Entre Grupos	39,11	3	13,04	6,87	0.0 *
	Intra grupos	1.527,79	805	1,90		
	Total	1.566,90	808			
Altura total (m) por dosis	Entre Grupos	876,37	7	125,20	145,22	0.0 *
	Intra grupos	690,53	801	0,86		
	Total	1.566,90	808			

A partir de la tercera dosis el crecimiento en altura descende de manera constante, alcanzándose tan solo una altura media de en torno a tres metros en las dosis menos regadas. Al analizar todos los clones en conjunto se obtuvieron diferencias significativas entre cada una de las dosis desde la tercera a la séptima, sin embargo al analizar cada clon por separado, las diferencias entre algunas dosis próximas no eran significativas. En algunos clones se encontraron diferencias significativas entre las dosis 7 y 8, pero en el análisis de todos los clones en conjunto no se obtuvieron diferencias en altura entre estas dos dosis.

Al analizar las AB obtenidas para cada clon se observa también una tendencia decreciente a medida que disminuye la dosis de riego (**Figura 3.1.9.**) y, al igual que sucede con la altura, el valor máximo no se alcanza en la dosis más alta, sino en la segunda o en la tercera. En el clon I-214, la dosis 1 presentó un AB mucho menor que la dosis 2, siendo la diferencia entre ambas de casi 20 cm² por planta. Este clon fue el que mostró mayores crecimientos en AB en las dosis de riego más altas, duplicando en algunos casos las AB de los otros clones; sin embargo I-214 no presentó el mismo comportamiento en las dosis más bajas, donde se obtuvieron AB similares o incluso menores que en el resto de los clones. En el clon I-214, el AB de la dosis que presentó un valor más alto fue casi cuatro veces mayor que la de la dosis con menor área basal, mientras que en el resto de los clones esta diferencia fue bastante menor. El clon AF-2 presentó un diagrama mucho más plano que el clon I214, observándose muy pocas diferencias significativas entre las AB de las distintas dosis, pudiendo decir únicamente que las dos primeras dosis presentan un AB mayor que las cuatro últimas. Monviso y Pegaso presentaron también un comportamiento similar al de AF-2.

Al analizar todas las dosis conjuntamente, el clon que presentó un AB más alta fue I-214 con una media de más de 32 cm² por planta (**Figura 3.1.10.**). Los clones Monviso y Pegaso presentaron AB similares, registrando medias de entre 16 y 18 cm² por planta, casi la mitad que I-214. AF-2 mostró también un AB más baja que I-214, pero mayor que Monviso y Pegaso. En el conjunto de los clones (**Figura 3.1.11.**), el AB media por planta más alta se obtuvo en la dosis 2, la cual no mostró diferencias significativas con la dosis 3 pero si con la primera dosis, que como media registró unos 5 cm² menos por planta. De las dosis 3 a la dosis 6 el AB va descendiendo paulatinamente, mientras que en las tres dosis más bajas el AB es muy similar y no se aprecian diferencias significativas.

Figura 3.1.9. Área basimétrica (AB) media por planta (cm²) en cada una de las 8 dosis de riego en cada uno de los 4 clones al finalizar el segundo ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Figura 3.1.10. Área basimétrica (AB) media por planta (cm²) en los cuatro clones estudiados al finalizar el segundo ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Figura 3.1.11. Área basimétrica (AB) media por planta (cm²) en cada dosis de riego (considerados los 4 clones) al finalizar el segundo ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Tabla 3.1-XI: Análisis de varianza (ANOVA) del AB por planta (cm²) por clon y por dosis de riego (los cuatro clones en conjunto y cada uno por separado) al finalizar el segundo ciclo de tres años. DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
AB por planta (cm ²) AF-2	Entre Grupos	4.254,3	7	607,76	3,62	0,0013 *
	Intra grupos	23.808,9	142	167,67		
	Total	28.063,3	149			
AB por planta (cm ²) I-214	Entre Grupos	42.556,8	7	6.079,55	15,95	0.0 *
	Intra grupos	83.107,1	218	381,23		
	Total	125.664,0	225			
AB por planta (cm ²) Monviso	Entre Grupos	4.132,5	7	590,36	6,34	0.0 *
	Intra grupos	20.683,6	222	93,17		
	Total	24.816,1	229			
AB por planta (cm ²) Pegaso	Entre Grupos	3.026,9	7	432,42	2,44	0,02 *
	Intra grupos	34.531,6	195	177,09		
	Total	37.558,6	202			
AB por planta (cm ²) por clones	Entre Grupos	35.385,2	3	11.795,10	43,94	0.0 *
	Intra grupos	216.102,0	805	268,45		
	Total	251.487,0	808			
AB por planta (cm ²) por dosis	Entre Grupos	34.745,0	7	4.963,57	18,34	0.0 *
	Intra grupos	216.742,0	801	270,59		
	Total	251.487,0	808			

3.1.5.2. Humedad de la biomasa

Al finalizar el primer ciclo de tres años se determinó la humedad en los diferentes clones de chopo sin que se encontrasen diferencias significativas entre ellos. El valor de humedad encontrado estuvo en torno al 50% en todos los clones. AF-2 y Pegaso presentaron una humedad media exactamente del 50%, I-214 mostró una humedad del 49,3% y Monviso del 50,4%. También se calculó la humedad de tallos y ramas por separado, encontrándose un valor medio algo más alto en los primeros (51,6% y 48,3%).

Al finalizar el segundo ciclo se obtuvo la humedad de la biomasa en las diferentes dosis de riego aplicadas, sin que se observasen diferencias importantes entre unas y otras. (Tabla 3.1-XII).

Tabla 3.1-XII: Humedad (%) de la biomasa de chopo en las diferentes dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años.

Dosis	Humedad (%)
Dosis 1	50,3
Dosis 2	50,7
Dosis 3	52,8
Dosis 4	51,1
Dosis 5	51,2
Dosis 6	54,6
Dosis 7	52,4
Dosis 8	54,7

3.1.5.3. Producción de biomasa seca

3.1.5.3.1 Al final del primer ciclo de tres años

El clon Pegaso fue el que alcanzó una menor producción tras los tres primeros periodos vegetativos con un rendimiento que no llegó a los 7.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ (**Figura 3.1.12.**). El clon I-214 fue el siguiente clon menos productivo, pero logró un rendimiento bastante superior al del clon Pegaso con casi 11.800 kg ha⁻¹ año⁻¹. Con Monviso, al finalizar el ciclo, se registraron unos 12.800 kg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que AF-2 fue el clon más productivo con casi 14.000 kg ha⁻¹ año⁻¹.

Figura 3.1.12. Producción (kg MS ha⁻¹ año⁻¹) de los diferentes clones de chopo al finalizar el primer ciclo de tres años. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$).

Tabla 3.1-XIII: Análisis de varianza (ANOVA) para la producción (kg ha⁻¹ año⁻¹) al finalizar el primer ciclo de tres años. DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
Producción (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Entre Grupos	6,16 x 10 ⁹	3	2,05 x 10 ⁹	56,61	0.0 *
	Intra grupos	3,36 x 10 ¹⁰	925	3,63 x 10 ⁷		
	Total	3,97 x 10 ¹⁰	928			

3.1.5.3.2 Al final del segundo ciclo de tres años

Los mejores resultados se obtuvieron con el clon I-214, alcanzándose con la dosis 2, que resultó ser la más productiva, un rendimiento de casi 23.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca (**Figura 3.1.13.**). Además, en las cinco primeras dosis de este clon se lograron producciones que estuvieron cerca o superaron los 15.000 kg ha⁻¹ año⁻¹, rendimientos que no se alcanzaron con el resto de clones ni con dosis de riego superiores. La producción más altas del clon Monviso se obtuvo en la dosis 3 y fue de algo menos de 12.000 kg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que el clon AF-2 obtuvo su mejor rendimiento en la primera dosis con poco mas de 10.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ y el clon Pegaso no llegó a los 9.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ en ninguna de las dosis de riego.

Los clones I-214 y Monviso lograron producir casi 5.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ con las dosis de riego más bajas, mientras que los clones AF-2 y Pegaso quedaron con poco más de 3.000 kg ha⁻¹ año⁻¹. Las mayores diferencias entre las dosis más altas y las más bajas se

encontraron en el clon I-214, multiplicándose por cuatro la producción. El gran salto productivo en este clon se produce entre la dosis 5 y 6; cuando el aporte hídrico anual baja por debajo de unos $3.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, el rendimiento baja de golpe casi $8.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En el clon AF-2 ocurre algo similar, pero en la segunda dosis, siendo la producción de las dos primeras dosis el doble que en el resto.

Figura 3.1.13. Producción ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) de los cuatro clones estudiados en cada una de las 8 dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años.

Al analizar todas las dosis de riego conjuntamente, se observa que la producción del clon I-214 es más de dos veces superior que la de AF-2 y Pegaso, mientras que está muy cerca de duplicar la de Monviso (**Figura 3.1.14**). Concretamente con el clon I-214 se obtuvo una media de casi $14.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el conjunto de las dosis.

La dosis 3 resultó ser la más productiva en el conjunto de los cuatro clones, superando ligeramente los $12.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (**Figura 3.1.15**), si bien la diferencia entre esta dosis y la dosis 2 fue de apenas $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La dosis 1 también presentó un rendimiento similar, siendo su producción tan solo unos $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ menor que la de la tercera dosis. La diferencia productiva entre las tres primeras dosis fue por tanto

muy pequeña, pero el descenso productivo se acentuó a partir de la tercera dosis, donde el rendimiento de una dosis a la siguiente se redujo entre 1.500 y 2.000 kg ha⁻¹ año⁻¹. En el análisis individual de cada clon, se observó que el descenso en la producción no era constante, pudiendo encontrar incluso algunas parcelas menos regadas que eran más productivas que otras que recibían una dosis de agua mayor, sin embargo en el análisis conjunto de los clones se observó un descenso constante desde la dosis 3 a la 7. Entre las dosis 7 y 8 también hubo una bajada de la producción pero esta fue de solo 500 kg ha⁻¹ año⁻¹. La última dosis produjo en torno a 4.000 kg ha⁻¹ año⁻¹, es decir una tercera parte de lo producido con las dosis más altas.

Figura 3.1.14. Producción (kg MS ha⁻¹ año⁻¹) de los cuatro clones estudiados al finalizar el segundo ciclo de tres años (consideradas todas las dosis).

Figura 3.1.15. Producción (kg MS ha⁻¹ año⁻¹) en cada dosis de riego al finalizar el segundo ciclo de tres años (considerados los cuatro clones).

3.1.6. Producción foliar

La producción de hojas del clon I-214 durante el tercer periodo vegetativo del segundo ciclo fue muy similar en la dosis 2 y en la dosis 8, estando en ambos casos por encima de los 3.000 kg ha⁻¹ y siendo la diferencia entre ambas de apenas 700 kg ha⁻¹ (**Tabla 3.1-XIV**). Sin embargo, la producción de tallos y ramas fue mucho menor en la dosis octava que en la segunda, por lo que las hojas en la dosis 2 representaron un porcentaje sobre la biomasa total acumulada mucho menor.

Tabla 3.1-XIV: Producción de hojas (kg MS ha⁻¹) en las parcelas del clon I-214 durante el tercer año del segundo ciclo y porcentaje que representa respecto a la biomasa total acumulada en ramas y tallos durante el ciclo. H: peso hojas, R: peso acumulado en ramas, T: peso acumulado en tallos.

Dosis	Peso hojas (kg ha ⁻¹)	H / R + T (%)
Dosis 2	3.998,45	5,80
Dosis 8	3.270,37	22,14

3.1.6.1. Índice de área foliar (LAI)

El LAI del clon I-214 durante el segundo año del segundo ciclo alcanzó como máximo un valor de 4,5 m² m⁻², lográndose estos valores máximos a mediados de julio (**Figura 3.1.16**). La dosis 8 fue la que presentó unos valores más bajos a lo largo de todo el periodo estival y no sobrepasó en ninguna de las mediciones un valor medio de 3 m² m⁻². A pesar de la diferente cantidad de agua aportada, los LAI en las otras tres dosis fueron muy similares, oscilando entre 3 y 4,5 m² m⁻².

En el tercer periodo vegetativo, el follaje casi no había comenzado a desarrollarse en el mes de mayo en las parcelas regadas con dosis más bajas, mientras que en las parcelas más regadas ya alcanzaba valores en torno a 2 m² m⁻² (**Figura 3.1.17**). Desde mediados de junio y hasta las primeras semanas de julio se registran los mayores incrementos en el LAI, que continuó creciendo pero más lentamente hasta mediados de agosto y registró pequeños descensos en la parte final del verano. La dosis 2 fue la que presentó unos valores del LAI más altos, alcanzando en la parte final del periodo vegetativo índices próximos a 6 m² m⁻². La dosis 4 presentó un grafico muy similar al de la dosis 2 pero con valores que estaban alrededor de medio punto por debajo, mientras que la dosis 6 empezó con valores notablemente más bajos que las dosis anteriores pero a mediados del verano llegó a sobrepasarlas, para luego volver a bajar hasta valores próximos a los de la dosis 8. La dosis 8 fue la que presentó los valores más bajos de LAI, si bien las diferencias entre esta y la dosis más alta no superaron los 1,5 m² m⁻².

Figura 3.1.16. Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) durante el año 2012 (segundo periodo vegetativo del segundo ciclo) en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214.

Figura 3.1.17. Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) durante el año 2013 (tercer periodo vegetativo del segundo ciclo) en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214.

3.1.7. Estrés hídrico

Durante el año 2012, las parcelas de chopo que recibían la segunda dosis de riego más alta presentaron en todo momento Ψ_f en torno a $-0,5 \text{ MPa}$ (Figura 3.1.18.). La dosis cuatro mantuvo a lo largo de todo el periodo vegetativo valores muy próximos a los de las dosis 2, mientras que la octava dosis tuvo potenciales claramente inferiores a los registrados en las dos dosis anteriores quedando el potencial próximo a -1 MPa o incluso por debajo de esta cifra. Sin embargo, a pesar de recibir menos agua que las dosis 2 y 4, la dosis 6 fue la que presentó los potenciales más altos.

Figura 3.1.18. Potencial hídrico foliar (Ψ_f) a media mañana en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214 durante el año 2012 (segundo año del segundo ciclo).

Durante el año 2013, en las parcelas más regadas se consiguieron Ψ_{xm} a mediodía que estuvieron en torno a -0,5 MPa o por encima (**Figura 3.1.19.**). La dosis 4 en algunas fechas alcanzó los mismos potenciales que la dosis 2, siendo en otras ocasiones la diferencia de apenas 0,2 MPa. La dosis 6 mostró en algunas ocasiones valores próximos a -0,5 MPa, si bien su gráfica presenta más oscilaciones, aproximándose los potenciales recogidos en algunas fechas a los -1 MPa. Por último, la dosis 8 fue la que presentó valores más bajos, aunque en todo momento los registros estuvieron entre -0,5 y -1 MPa.

Los valores del Ψ_f a media mañana, como sucede habitualmente, fueron menores que los del Ψ_{xm} . En la dosis 2 se alcanzaron valores en torno -0,5 MPa en algunas fechas, pero se registraron valores más bajos en otras ocasiones. La cuarta dosis presentó una gráfica muy similar a la de la dosis 2 pero con valores ligeramente inferiores, mientras que la dosis 6 fue bastante irregular, presentando en ocasiones valores más altos que las anteriores y en ocasiones valores más bajos. La dosis 8 fue la que presentó los valores más bajos, que se quedaron entre los -1 y los -1,5 MPa.

Los valores del Ψ_f a mediodía fueron más bajos que los de los otros dos tipos de potencial estudiados. La dosis 2 fue también en este caso la que mostró los valores más altos, aunque hubo una alta variabilidad en los registros. Los gráficos de las dosis 4 y 6 fueron también irregulares, ofreciendo generalmente potenciales menores a los de la dosis 2. En la octava dosis se llegaron a alcanzar valores próximos a -2 MPa.

Figura 3.1.19. Potencial hídrico foliar (Ψ_f) a media mañana y a mediodía y potencial hídrico xilemático (Ψ_{xm}) a mediodía en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214 durante el año 2013 (tercer año del segundo ciclo).

3.2. Cultivo de olmo de Siberia

3.2.1. Brotación

El inicio del periodo vegetativo de los olmos varió ligeramente en función de la climatología registrada cada año. El año 2012 presentó un mes de marzo con una temperatura media aproximadamente 2 grados superior a la registrada en este mes habitualmente, lo cual adelantó unos días la brotación (**Tabla 3.2-I**). En general, los olmos iniciaron el periodo vegetativo entre finales de marzo y mediados de abril. Los grados-día acumulados desde el 1 de enero también variaron de unos años a otros, si bien la oscilación no es demasiado grande, requiriendo siempre entre 38 y 62 grados-día.

Tabla 3.2-I: Fecha de brotación del olmo y grados-día acumulados hasta esa fecha

2010		2011		2012		2013	
Fecha	°C-día	Fecha	°C-día	Fecha	°C-día	Fecha	°C-día
05/04	38,4	04/04	61,5	23/03	47,3	16/04	61,4

El año 2013 registró una primavera bastante fría lo que generó algunos problemas en la brotación del olmo. El inicio del periodo vegetativo fue más tardío que en años anteriores, observándose además una brotación bastante desigual, quedando numerosos individuos en la parte nordeste de la parcela en parada vegetativa casi un mes más que el resto (**Figura 3.2.1.**). Además, este año no se observó prácticamente floración en los olmos.

Figura 3.2.1. Fotografía de las parcelas de olmo de Siberia a comienzos del mes de mayo de 2013, donde se puede observar la brotación desigual que se produjo ese año.

3.2.2. Mortalidad

A comienzos de la primavera del primer periodo vegetativo en las parcelas del CEDER se llevó a cabo un conteo de marras, observándose que en el conjunto de las parcelas no habían sobrevivido un 10% de los individuos, por lo que se decidió reponer estos ejemplares. Una vez realizada la reposición de marras, ningún otro individuo murió durante el primer periodo vegetativo, ni tampoco durante todo el primer ciclo de vida de las plantaciones. En Almazán, unas semanas después de la plantación se observó que un 2% de los árboles no habían enraizado, por lo que a mediados de mayo se procedió también a la reposición de esas marras. Al igual que sucedió en el CEDER no se perdió ningún otro olmo ni durante el primer periodo vegetativo ni durante todo el primer turno.

Tras la primera corta a los tres años de edad, la mortalidad en las parcelas de secano del CEDER alcanzó el 6,05%, mientras que no se observó ningún árbol muerto en las parcelas rebrotadas de regadío. La densidad de plantación no afectó a la tasa de mortalidad, ya que el porcentaje de individuos muertos fue casi idéntico en los dos espaciamientos. En el caso de los olmos de Almazán, establecidos todos ellos en condiciones de secano, se registró una tasa la mortalidad tras el rebrote muy similar a la obtenida en el CEDER, perdiéndose un 6,6% de los individuos.

3.2.3. Número de brotes

El número de brotes de las parcelas de olmo durante el primer ciclo fue bajo, presentado todos los tratamientos como media entre 1 y 2 brotes (**Tabla 3.2-II**). La mayoría de los árboles tenían un solo brote y en muy poco ejemplares se contabilizaron más de 2; el ejemplar que presentó un mayor número de brotes se encontraba en una parcela de regadío del CEDER y tenía un total de 6 brotes. Las parcelas con una dosis de riego más alta y las parcelas de Almazán ofrecieron un número de brotes mayor. Mientras que en Almazán el número de brotes estuvo próximo a 2, en las mismas condiciones de cultivo en el CEDER, como media, solo se contabilizó poco más de 1 brote. Respecto a la densidad, esta no parece afectar al número de brotes, obteniéndose valores similares en los dos espaciamientos estudiados.

Tras la primera corta, el número de brotes por cada individuo fue mucho mayor, llegando a tener plantas con 35 brotes y siendo muy pocos los individuos con tan solo 1 ó 2 vástagos (**Tabla 3.2-III**). Las parcelas que presentaron más brotes por planta fueron las del CEDER establecidas con densidad de 3333 pl ha⁻¹ y las de Almazán que habían sido también implantadas con este mismo espaciamiento, encontrándose diferencias significativas entre las dos densidades estudiadas. Las parcelas de menor densidad del CEDER y las de Almazán registraron una media próxima a los 17 brotes por planta, mientras que en las parcelas con menores espaciamientos se contabilizaron entre 11 y

13 brotes de media. Durante el segundo ciclo no se obtuvieron diferencias significativas en cuanto al riego, contabilizándose en las plantas de secano un número de brotes similar que en las de regadío.

Tabla 3.2-II: Número de brotes por planta antes de realizar la primera corta (R4T4). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Parcelas	Media	Máximo	Mínimo
CS-SB	1,08 (d)	4	1
CS-SA	1,13 (cd)	3	1
CS-R1-A	1,03 (d)	2	1
CS-R2-B	1,60 (b)	6	1
CS-R2-A	1,45 (bc)	5	1
ALM-SB	2,03 (a)	5	1
MEDIA	1,39		

Tabla 3.2-III: Número de brotes por planta el primer año tras la corta (R4T1). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Parcelas	Media	Máximo	Mínimo
CS-SB	16,43 (a)	35	4
CS-SA	11,07 (b)	24	1
CS-R1-A	13,25 (b)	29	2
CS-R2-B	16,58 (a)	33	5
CS-R2-A	11,29 (b)	25	2
ALM-SB	17,47 (a)	32	7
MEDIA	14,35		

3.2.4. Crecimiento y producciones

3.2.4.1. Alturas y Áreas basimétricas

3.2.4.1.1 Evolución a lo largo del ciclo

El crecimiento en altura y en AB por planta se mantuvo constante a lo largo del ciclo en las parcelas del CEDER, mientras que se observó un crecimiento claramente

exponencial en las parcelas de Almazán, con incrementos sensiblemente mayores durante el tercer y el cuarto periodo vegetativo (**Figuras 3.2.2. y 3.2.3.**). Las pendientes de las rectas de las parcelas de regadío fueron más altas que en secano, pero las dos dosis de riego ofrecieron rectas casi superpuestas, observándose solamente una ligera diferenciación el cuarto año. El crecimiento en AB, tanto en secano como en regadío, fue mayor en las parcelas establecidas con una menor densidad, mostrándose mayores pendientes. Sin embargo, en el caso de la altura las parcelas regadas que tenían una densidad de 6.666 pl ha^{-1} presentaron mayores incrementos que las parcelas implantadas con una densidad de 3.333 pl ha^{-1} .

Los crecimientos anuales en altura en las parcelas de secano estuvieron en torno a los 50 cm en las parcelas menos densas y en torno a los 40 cm en las más densas, mientras que las parcelas de regadío superaron los 70 cm y algunos años se acercaron a los 90 cm. Por su parte, las parcelas de Almazán presentaron crecimientos anuales que superaron en todo momento el metro, superando incluso el metro y medio durante el último periodo vegetativo. En cuanto a las AB, los crecimientos variaron entre los poco más de 3 cm^2 por plantas, que se registraron en las parcelas de secano y alta densidad del CEDER, hasta los más de 26 cm^2 por planta, que se observaron en las parcelas de Almazán durante el último periodo vegetativo.

Figuras 3.2.2. Altura total del olmo de Siberia (m) a lo largo del primer ciclo de cultivo en las diferentes condiciones de cultivo. CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Figuras 3.2.3. Área basimétrica (AB) total por planta (m) a lo largo del primer ciclo de cultivo en las diferentes condiciones de cultivo. CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

3.2.4.1.2 Final del tercer periodo vegetativo (R3T3)

Al finalizar el tercer periodo vegetativo se encontraron diferencias significativas respecto a la altura entre los distintos tratamientos (**Tabla 3.2-IV**). Los menores valores medios se registraron en las parcelas de secano del CEDER; donde la altura media superó por muy poco los 2 metros de altura, encontrándose individuos con una altura de tan solo 75 cm (**Figura 3.2.4**). Las mayores alturas se observaron en los olmos de Almazán, que a pesar de desarrollarse en condiciones de secano alcanzaron una altura media de 3,72 m, superando algunos ejemplares los 5 m.

Tabla 3.2-IV: Análisis de varianza (ANOVA) para el área basal y la altura tras tres años (R3T3). DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
Área basal total (cm ²)	Entre Grupos	26.677,9	5	5.335,6	87,6	0.0 *
	Intra grupos	21.557,9	354	60,9		
	Total	48.235,8	359			
Altura total (m)	Entre Grupos	117,9	5	23,6	80,5	0.0 *
	Intra grupos	103,7	354	0,3		
	Total	221,6	359			

Se encontraron diferencias significativas en altura respecto a la densidad de plantación, pero mientras que en secano los árboles más altos fueron los de densidad menor, en regadío sucedió lo contrario. Con el riego, la altura fue significativamente mayor, pero no se encontraron diferencias significativas entre las dos dosis.

Figuras 3.2.4. Altura total (m) al finalizar el tercer periodo vegetativo (R3T3). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Los diámetros medios de los brotes en las distintas condiciones de cultivo variaron entre 3,5 y 5,5 cm, si bien este dato no aporta demasiada información, ya que en general las plantas que presentan mayores grosores en los tallos tienen un menor número de ellos, por lo que resulta más adecuado medir el incremento en grosor mediante el área basimétrica por planta. El test de Duncan reveló diferencias significativas en el área basimétrica entre las parcelas de secano y las de regadío (**Figura 3.2.5.**), llegándose a alcanzar superficies basales más de dos veces superiores en las parcelas más regadas. Sin embargo, al igual que ocurrió con la altura, no se encontraron diferencias entre las dos dosis de riego aplicadas.

La densidad de plantación también resultó ser un factor relevante en el incremento del AB, observándose mayores áreas en las plantas establecidas con una menor densidad. Sin embargo, a pesar de tener una mayor AB por planta, los valores registrados nunca llegaron a duplicar a los de las parcelas con menor espaciamiento (densidad doble), por lo que en el conjunto de la parcela se obtuvo un AB mayor en las parcelas implantadas con una densidad de 6.666 pl ha⁻¹. Las parcelas de Almazán fueron las que mayor AB alcanzaron con una media de casi 40 cm² por planta.

Figuras 3.2.5. Área basimétrica (AB) por planta (cm²) al finalizar el tercer periodo vegetativo (R3T3). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

3.2.4.1.3 Final del cuarto periodo vegetativo (R4T4)

El crecimiento en altura durante el cuarto año fue especialmente importante en las parcelas de Almazán donde la altura media aumentó más de un metro y medio respecto al año anterior hasta alcanzar los 5,3 m, encontrándose ejemplares de hasta 6,40 m (**Figura 3.2.6.**). En el CEDER, sin embargo, el crecimiento en altura fue bastante menor, quedándose este aumento entre los 60 y los 80 cm como media. En el caso de las parcelas de secano en alta densidad este incremento fue todavía menor, registrándose un crecimiento medio que no llegó a los 40 cm. En el CEDER el ejemplar más alto midió 5 metros y se encontraba en las parcelas de regadío, mientras que en secano numerosos individuos quedaron por debajo del metro de altura.

En cuanto a las diferencias entre las diversas condiciones de cultivo (**Tabla 3.2-V**), se encontraron las mismas que a la edad de tres años, es decir las parcelas regadas crecieron más en altura, pero no se encontraron diferencias significativas entre dosis y la densidad afectó a la altura de manera diferente en secano que en regadío.

Al igual que sucedió con la altura, en Almazán el olmo de Siberia experimentó un fuerte crecimiento en AB durante el cuarto año, alcanzando un área media de casi 65 cm², es decir un 70% superior que el año anterior (**Figura 3.2.7.**). Las parcelas del CEDER con una dosis de riego más alta aumentaron su AB en torno a un 40%, registrándose medias

al final del ciclo entre 20-30 cm² más bajas que en Almazán, mientras que el crecimiento en AB fue todavía menor en las parcelas que recibían un menor aporte hídrico. Los mayores incrementos se produjeron en las parcelas con densidad de plantación más baja, donde el espacio aún disponible para el desarrollo de las plantas era mayor. Las diferencias significativas encontradas fueron las mismas que un año antes, si bien se observa que la diferencia entre las parcelas de Almazán y las del CEDER es mayor.

Figuras 3.2.6. Altura total del olmo de Siberia (m) al finalizar el cuarto periodo vegetativo (R4T4). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Tabla 3.2-V: Análisis de varianza (ANOVA) para el área basal y la altura tras cuatro años (R4T4). DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
Área basal total (cm ²)	Entre Grupos	904.166,2	5	18.083,2	144,3	0.0 *
	Intra grupos	44.355,7	354	125,3		
	Total	134.772,0	359			
Altura total (m)	Entre Grupos	305,4	5	61,1	169,5	0.0 *
	Intra grupos	127,6	354	0,36		
	Total	433,0	359

Figuras 3.2.7. AB total por planta del olmo de Siberia (m) al finalizar el cuarto periodo vegetativo (R4T4). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

3.2.4.1.4 Rebrote (R4T1)

La media de las alturas el primer año tras el rebrote estuvo entre los 1,31 m de las parcelas de secano de densidad más alta y los 1,83 m de las parcelas mas regadas y densidad más baja del CEDER (**Figura 3.2.8**). Respecto a las diferencias significativas (**Tabla 3.2-VI**), se encontraron entre el secano y el regadío, pero de nuevo no hubo diferencias entre las dos dosis de riego. La densidad fue relevante en el secano, donde las parcelas implantadas con densidad menor desarrollaron individuos de mayor altura, pero no se encontraron diferencias significativas en el regadío, si bien el valor medio registrado fue también ligeramente mayor en las parcelas de menor densidad. Las alturas en Almazán no fueron mayores que en el CEDER, a pesar de que el desarrollo, tanto en altura como en AB, fue mucho mayor en estas parcelas durante el primer ciclo.

Tabla 3.2-VI: Análisis de varianza (ANOVA) para la altura (m) el primer año tras el rebrote. DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
Altura total (m)	Entre Grupos	10,78	5	2,16	17,64	0.0 *
	Intra grupos	42,30	346	0,12		
	Total	53,09	351

Figura 3.2.8. Altura total del olmo de Siberia (m) el primer periodo vegetativo tras el rebrote (R4T1). Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

3.2.4.2. Humedad de la biomasa

Al final de cada periodo vegetativo se midió el contenido de humedad de la biomasa en las diferentes condiciones de cultivo, observándose en todos los tratamientos un porcentaje de humedad bastante similar (**Tabla 3.2-VII**). En un mismo año, las diferencias de humedad entre las distintas condiciones de cultivo fueron tan solo de entre un 2% y un 3 %, sin que se observase ningún tratamiento que sistemáticamente presentara valores mayores o menores. El contenido de humedad fue ligeramente mayor en las plantas con tallos de un año de edad, si bien las diferencias fueron pequeñas y los valores oscilaron en todo momento entre un 40% y un 50%.

Tabla 3.2-VII: Humedad media (%) de la biomasa de olmo en las diferentes condiciones de cultivo. R: Rebrote, CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Parcelas	2010	2011	2012	2013	2013 (R)
CS-SB	46,80	41,19	41,07	45,78	44,43
CS-SA	45,13	40,65	42,65	45,82	
CS-R1-A	46,96	40,34	43,43	45,28	48,28
CS-R2-B	45,55	44,05	41,75	43,60	
CS-R2-A	48,36	42,64	41,82	43,66	
ALM-SB			44,26	45,07	47,67
MEDIA	46,56	41,77	42,14	44,83	46,36

3.2.4.3. Producción de biomasa seca

En las parcelas de regadío del CEDER cortadas con turno de tres años, la producción de biomasa rondó los $5.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, sin que se observase apenas diferencia entre las dos dosis de riego existentes; sin embargo el rendimiento sí fue mucho menor en las parcelas de secano, donde la producción quedó por debajo de los $2.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (**Figura 3.2.9.**). En las parcelas de regadío, al reducirse la densidad de plantación a la mitad, el rendimiento casi lo hizo en la misma proporción, mientras que en las de secano la producción obtenida con ambos espaciamientos estuvo más próxima. A pesar de desarrollarse en condiciones de secano y de haber sido implantadas con la densidad más baja, la producción en las parcelas de Almazán se acercó a los $5.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Figuras 3.2.9. Producción de biomasa seca en las parcelas de olmo de Siberia cortadas con turno de tres años (R3T3). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Los rendimientos de las parcelas cortadas con turno de cuatro años fueron ligeramente mayores en casi todos los tratamientos (**Figura 3.2.10.**), destacando el fuerte incremento en la producción de las parcelas de Almazán, donde se llegaron a superar los $7.600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Las parcelas más productivas del CEDER fueron las que recibieron la dosis de riego más alta, alcanzando con una densidad de 6.666 pl ha^{-1} un rendimiento de casi $6.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La densidad de plantación continuó siendo relevante en el regadío, pero no en el secano; mientras que el efecto del riego se hizo más patente, observándose una mayor diferencia entre las dos dosis de riego.

Figuras 3.2.10. Producción de biomasa seca en las parcelas de olmo de Siberia cortadas con turno de cuatro años (R4T4). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

En el CEDER las parcelas rebrotadas alcanzaron una producción similar o incluso superior a la obtenida como media durante los tres primeros años, sin embargo el rendimiento en las parcelas de Almazán bajó sensiblemente, registrándose una producción algo menor que durante tres primeros periodos vegetativos y muy inferior a la obtenida el cuarto año en las parcelas que no habían sido cortadas (**Figura 3.2.11.**). Respecto al efecto de la densidad y el riego, se pueden extraer conclusiones similares que durante el primer turno.

Figuras 3.2.11. Producción de biomasa seca en las parcelas de olmo de Siberia tras el primer año de rebrote (R4T1). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

3.2.5. Producción foliar

La producción de hojas fue aumentando a lo largo del ciclo, obteniéndose en algunos casos más del doble de producción que el año anterior (**Tabla 3.2-VIII**). Estos incrementos en la producción foliar son habituales, ya que al aumentar el tamaño de ramas y tallos aumentará también la cantidad de follaje. El porcentaje que supone la producción de hojas respecto a la biomasa total acumulada en ramas y tallos oscila entre el 10-30%; pero mientras que en las parcelas de regadío esta proporción disminuye con el paso de los años, en las de secano las hojas van suponiendo cada vez un porcentaje mayor. En el regadío la producción foliar creció casi al mismo ritmo que la producción de ramas y fustes, representando las hojas un porcentaje que osciló entre un 20% y un 35%. Sin embargo, en las parcelas de secano la producción de hojas durante el año 2012 llegó a representar en torno al 50% de la producción de ramas y fustes, mientras que en 2013 superó este porcentaje, llegando incluso a igualar las producciones en el caso de la densidad más alta. En cuanto a la densidad, la biomasa foliar representó un porcentaje mayor de la biomasa total acumulada en las parcelas con mayores espaciamientos que en las parcelas de mayor densidad.

Tabla 3.2-VIII: Producción de hojas (kg MS ha⁻¹) en las parcelas del CEDER durante el segundo, el tercero y el cuarto periodo vegetativo del primer ciclo (2011, 2012 y 2013) y porcentaje que representa esta biomasa respecto a la biomasa anual producida y respecto a la biomasa total acumulada en ramas y tallos. H: peso hojas, R: peso ramas, T: peso tallos, CS: Cubo de la Solana (CEDER), SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Tratamiento	2011			2012			2013		
	Peso hojas (kg/ha)	H / (R + T anual) (%)	H / (R + T Acu.) (%)	Peso hojas (kg/ha)	H / (R + T anual) (%)	H / (R + T Acu.) (%)	Peso hojas (kg/ha)	H / (R + T anual) (%)	H / (R + T Acu.) (%)
CS-SB	494,5	27,00	21,07	815,9	42,73	19,17	2212,3	64,18	28,72
CS-SA	496,6	20,27	14,68	909,4	53,59	17,90	1937,3	102,12	27,76
CS-R1-A	991,4	19,34	14,30	1310,5	20,32	9,79	-	-	-
CS-R2-B	796,3	29,42	23,82	1753,8	34,38	20,77	-	-	-
CS-R2-A	1220,7	26,75	19,75	1892,3	26,46	14,19	3758,6	34,30	15,47

Durante el año 2013 también se estudió la producción de hojas en las parcelas rebrotadas, realizando el estudio únicamente en las parcelas con una dosis de riego más alta y establecidas con una densidad de 6666 pl ha⁻¹. La producción de hojas en estas parcelas fue de unos 1800 kg ha⁻¹, siendo esta cifra sensiblemente inferior a la observada en estas mismas condiciones de cultivo en las parcelas no rebrotadas, pero representando un porcentaje similar de la biomasa producida ese año en ramas y tallos (31,4 %).

3.2.5.1. Índice de área foliar (LAI)

Durante el tercer periodo vegetativo, el LAI en las parcelas de secano del CEDER osciló entre 1,7 y poco más de 2,5 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, observándose valores ligeramente más altos en las parcelas con mayor densidad (**Figura 3.2.12.**). En las parcelas de regadío, se alcanzaron valores de LAI bastante más altos, registrándose en las parcelas de menor densidad índices de entre 3-3,5 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, mientras que en la densidad más alta se superaron en todo momento los 4 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ e incluso los índices se acercaron puntualmente a los 5,5 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$. Aunque las diferencias en el LAI entre las parcelas de secano y regadío son importantes, las dos dosis de riego aplicadas presentaron valores próximos, observándose incluso en algunas ocasiones valores más altos en la dosis de riego más baja.

Durante el cuarto periodo vegetativo, año 2013, las parcelas del CEDER tardaron más que el año anterior a desarrollar el follaje, presentando a mediados de junio valores de LAI bastantes más bajos que en 2012. Como se observa en la **Figura 3.2.13.**, no hay prácticamente diferencia entre los valores de LAI a mediados de mayo y los recogidos 20 días más tarde. Fue a partir de mediados de junio cuando el área foliar de los olmos del CEDER creció rápidamente, en especial en las parcelas de riego con densidad más alta. Desde mediados de julio, el LAI se mantuvo estable o creció lentamente, salvo en las parcelas con dosis de riego más alta y menor densidad, donde se observó durante el último mes un crecimiento del LAI de casi 3 puntos, lo que hizo que se igualasen los LAI en las dos densidades de plantación estudiadas.

Figura 3.2.12. Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) durante el tercer periodo vegetativo en las parcelas del CEDER. CS: Cubo de la Solana (CEDER), SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja

Figura 3.2.13. Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) durante el cuarto periodo vegetativo del primer ciclo (edad R4T4) en las parcelas del CEDER y Almazán. CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Las parcelas de Almazán, por su parte, presentaron un desarrollo foliar mucho mayor durante los primeros meses, alcanzando en junio un LAI mayor de $5 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$, mientras que en las parcelas del CEDER, en el mejor de los casos, era de $2 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$. Tras una fase de fuerte crecimiento del LAI, al igual que sucedió en el CEDER, este índice pasó a tener un crecimiento más lento, si bien en todo momento se registraron valores más altos que en el CEDER.

3.2.6. Estrés hídrico

Durante el tercer periodo vegetativo (año 2012), las parcelas que se regaban con la dosis más alta presentaron Ψ_f a media mañana que oscilaron entre -0,5 y -1 (**Figura 3.2.14**). Las parcelas que percibieron la dosis de riego más baja registraron unos valores ligeramente inferiores, aunque la diferencia entre ambas dosis fue habitualmente de tan solo 0,1 - 0,2 MPa, observándose únicamente una diferencia mayor en la medición realizada el 23 de agosto. Las parcelas de secano a finales de junio todavía presentaban un Ψ_f próximo al de las de regadío, ya que se comenzó con el riego solo unos días antes, pero este potencial bajó rápidamente hasta situarse por debajo de -2 MPa a mediados de julio. El potencial hídrico en secano se vio muy afectado por las condiciones meteorológicas, observándose fuertes oscilaciones a causa de las precipitaciones registradas durante el verano en forma de tormenta.

Figura 3.2.14. Potencial hídrico foliar (Ψ_f) a media mañana durante el tercer periodo vegetativo (2012). Parcelas con densidad de plantación de 6.666 pl ha⁻¹. Regadio 1: dosis de riego más baja, Regadio 2: dosis de riego más alta.

Durante el cuarto periodo vegetativo, en las parcelas de regadío se registró un Ψ_f a media mañana bastante similar al del año anterior, quedándose habitualmente entre -0,5 y -1 MPa (**Figura 3.2.15.**). Las parcelas de secano comenzaron el verano con unos Ψ_f a media mañana bastante altos, al registrarse en la zona temperaturas más bajas de lo habitual y precipitaciones más abundantes, siendo especialmente elevado el dato del 19 julio, debido a las cuantiosas precipitaciones registradas durante los días anteriores en la zona. Posteriormente, los potenciales bajaron hasta situarse en torno a -2 MPa, es decir valores similares a los registrados en el tercer periodo vegetativo.

Durante este año, además, se realizaron mediciones del Ψ_f y Ψ_{xm} a mediodía, observándose que a esta hora el Ψ_f era habitualmente algo menor que a media mañana, mientras que el Ψ_{xm} era mayor que los dos anteriores. En los gráficos de los tres potenciales se observa que a comienzos del verano las parcelas de secano y regadío presentan valores muy similares, pero según avanza el periodo estival las diferencias entre estas condiciones de cultivo se hacen cada vez más patentes. Esta diferencia comienza a observarse antes en el gráfico del Ψ_{xm} que en los gráficos de los Ψ_f . Por otra parte, hay que reseñar que el Ψ_f a media mañana es el que se muestra más sensible a variaciones en las condiciones meteorológicas, mostrando un gráfico con más oscilaciones.

Figura 3.2.15. Potencial hídrico foliar (Ψ_f) a media mañana y a mediodía y potencial hídrico xilemático (Ψ_{xm}) a mediodía durante el cuarto periodo vegetativo (2013) en plantas con edad R4T4. Parcelas con densidad de plantación de 6.666 pl ha^{-1} . Regadio 2: dosis de riego más alta.

4. DISCUSIÓN

4.1. Cultivo de chopo

4.1.1. Brotación

El estudio de la fenología de la planta es fundamental a la hora de conseguir individuos bien adaptados a diferentes condiciones climáticas, siendo algunos aspectos, como la fecha de brotación, esenciales para un mejor desarrollo de la planta, facilitándose mediante su estudio el avance en la mejora genética.

Los chopos presentaron diferentes fechas de brotación en función del clon. El clon más temprano fue I-214, mientras que Monviso y Pegaso fueron los más tardíos. En principio, resultarían más adecuados los clones que brotan antes, pero también hay que tener en cuenta la resistencia que estos presenten a las heladas tardías. El clon I-214 brota muy temprano, pero en caso de producirse heladas al final de la primavera se ve fuertemente afectado por ellas, produciéndose la muerte de las células de los tejidos más jóvenes y observándose la típica imagen de brotes ennegrecidos por la helada, con el consiguiente retraso en el desarrollo. Sin embargo, los clones Monviso y Pegaso, brotan más tarde y presentan una mejor resistencia a las heladas tardías, lo que resulta muy positivo en climas como el que está siendo objeto de estudio.

Se ha observado que la temperatura acumulada es muy importante para el inicio de la brotación de los chopos, si bien algunos estudios han indicado que también existen otros factores como el fotoperiodo, las precipitaciones o las horas de frío que se han mostrado relevantes (Smith-Ramírez y Armesto, 1994; Garau et al, 2000). Estos otros factores hacen que de un año a otro los grados acumulados necesarios para el inicio del periodo vegetativo del chopo varíen, si bien hay que reseñar que las especies leñosas se han mostrado menos sensibles que las herbáceas al fotoperiodo (Kozłowski et al., 1991) y que distintos autores coinciden en que el efecto de la suma de las temperaturas es más relevante que la acumulación de frío para el inicio de la brotación (Hunter y Lechowicz, 1992).

Al comparar la fecha de brotación de los chopos con la obtenida en otros trabajos, como el de Garau et al. (2000), se observa que en el presente trabajo los chopos han sido algo más tardíos, si bien se debe tener en cuenta que el clima argentino en el que se realizó el estudio de Garau no presentaba inviernos tan frío como los registrados en el CEDER. En el presente trabajo, desde el 1 de enero hasta la brotación transcurrieron entre 94 y 152 días dependiendo del clon, mientras que en el trabajo de Garau, llevado a cabo con *Populus deltoides* en Argentina, los chopos tardaron entre 80 y 100 días en brotar (contabilizando en este caso los días desde el 1 de julio, al realizarse el estudio en el hemisferio Norte).

4.1.2. Mortalidad

La mortalidad del chopo, según el trabajo de Ceulemans y Deraedt (1999), depende fundamentalmente de tres factores: de las dificultades para enraizar, de los daños abióticos sufridos y de la densidad plantación. En las plantaciones objeto de estudio, la capacidad de enraizamiento no fue mala, como muestra la alta supervivencia en todos los clones al finalizar el primer periodo vegetativo, mientras que el efecto de la densidad de plantación no puede ser evaluado, ya que todas las parcelas se establecieron empleando el mismo espaciamiento. Por ello, la mortalidad debe ser achacada a daños abióticos y posiblemente, en este caso, también a daños bióticos, siendo especialmente importante el ataque de roya (*Melampsora alli-populina*) sufrido por las plantaciones durante el verano del primer año tras el rebrote (año 2011). A pesar de que se aplicó fungicida para evitar más daños en las plantaciones, la práctica totalidad de los individuos se vieron afectados en mayor o menor medida, siendo las dosis más bajas (especialmente la dosis 8), debido a la morfología de las plantas y a la menor capacidad de crecimiento, las que sufrieron más los efectos de la enfermedad. Las plantaciones con un menor desarrollo en altura son más frondosas y por ello en el interior de estas parcelas la humedad es mayor y se propaga la roya con mayor facilidad. Otros autores ya señalaron anteriormente a la roya como una importante causa de mortalidad en cultivos de chopo y de sauce (Laureysens et al., 2003; Al Afas et al., 2008; Verwijst, 1993).

La procedencia del material vegetal también es considerada como un factor relevante en la supervivencia de las plantaciones de chopo. Coyle et al. (2005) concluyeron que los clones de híbridos tenían una mayor tasa de supervivencia que las especies puras, mientras que Guo y Zhang (2010) mostraron una mortalidad tras tres años del cultivo del 65% en chopos procedentes del cruce *Populus trichocarpa* y *Populus nigra*, alcanzando en el resto de los clones apenas el 20%. Por su parte, Al Afas et al. (2008) indican una mayor dificultad de enraizamiento para los clones procedentes de madres *Populus deltoides* y un peor comportamiento tras el rebrote para los cruces *Populus trichocarpa* x *Populus Deltoides*. Sin embargo, en el CEDER no se observó una mayor mortalidad el primer año en los clones AF-2 y I-214 (*P.deltoides* x *P. nigra*), mientras que el clon que peor se comportó tras el rebrote fue el AF-2. A pesar de la mala capacidad de rebrote de AF-2, no se puede decir que el cruzamiento *P.deltoides* x *P. nigra* haya presentado un mal comportamiento tras la corta, ya que el clon I-214 proveniente del mismo cruce presentó una alta tasa de supervivencia.

Por otro lado, en el trabajo de Kaczmarek et al. (2013) se observó que la mortalidad de los chopos tras el primer año estaba fuertemente relacionada con la de los chopos a los 10 años de vida, es decir que un clon que comience con una mala tasa de supervivencia seguramente va a perder todavía muchos más individuos con el paso de los años; circunstancia también observada en el presente estudio.

Respecto al efecto del riego en la mortalidad de los individuos, no se ha observado una clara relación entre ambos. Coyle et al. (2005) en un trabajo llevado a cabo en el Sur de Carolina en Estados Unidos, también estudiaron la influencia del riego en la mortalidad, obteniéndose que al aplicarlo solamente mejoraban las tasas de supervivencia en algunos de los clones.

En general, las tasas de supervivencia observadas deben ser consideradas como buenas, ya que aunque algunos trabajos como el de Ceulemans et al. (1996) mostraron tasas de supervivencia de entre el 92% y el 99%, otros trabajos, como el de Armstrong et al. (1999), presentaron para algunos clones y dependiendo del emplazamiento unas tasas de supervivencia tras el año de la implantación inferiores al 50%. Por su parte, Al Afas et al. (2008) mostraron tasas de mortalidad que variaron entre el 15% y el 65%, dependiendo del clon, tras dos ciclos de tres años. Respecto a la capacidad de rebrote, esta fue satisfactoria en todos los clones excepto en el clon AF-2, cuya mortalidad creció significativamente durante el segundo ciclo.

4.1.3. Número de brotes

Durante el primer ciclo, en los distintos clones de chopo se contabilizaron como media entre 1 y 2 brotes. Este dato es habitual en plantaciones de chopo como muestran, por ejemplo, los trabajos de Baraza (2013) y Laureysens et al. (2003). Tras la primera corta, otros ensayos llevados a cabo en el CEDER mostraron un número de brotes medio que osciló entre los 12 y los 17 dependiendo del clon (Ciria et al., 2004), valores superiores a los registrados en el presente trabajo, si bien hay que tener en cuenta que la densidad era menor ($10.000 \text{ pl ha}^{-1}$) y el turno más largo (5 años). En el mencionado trabajo de Ciria et al. (2004) el número de brotes se redujo significativamente en el siguiente ciclo, presentando todos los clones un promedio de entre 9 y 10 brotes, lo cual indicaría que a mayor número de ciclos menor cantidad de brotes.

El trabajo de Laureysens et al. (2003) señaló que el cruzamiento del que procede el material vegetal es un factor importante a la hora de obtener un mayor o menor número de brotes, sin embargo en el presente trabajo los clones AF-2 e I-214, ambos híbridos de *P. deltoides* x *P. nigra*, presentaron un comportamiento muy diferente.

En cuanto al efecto de la dosis de riego en la cantidad de rebrotes, al no existir durante el primer ciclo diferenciación en la cantidad de agua aportada a las parcelas, habrá que esperar al tercer ciclo para poder analizar este aspecto. Durante este próximo ciclo, si cabría esperar una mayor producción de brotes en las dosis más regadas, debido al mayor tamaño de los ejemplares.

El número de brotes a lo largo del ciclo es habitual que disminuya (Philippot, 1996), siendo la densidad de plantación determinante, ya que según Weiner and Thomas (1996) es principalmente la competencia por la luz la que acaba con los brotes de menor tamaño. Según Laureysens et al. (2005) hay dos estrategias a seguir por los diferentes clones de chopos, unos tratan de eliminar rápidamente el mayor número de brotes para dejar solamente uno o dos retoños, mientras que otros conservan una gran cantidad de ellos. Los clones empleados en el CEDER parece que se aproximan más al segundo comportamiento, ya que la mayor parte de los individuos presentaron más de un par de brotes. Además, si se comparan los resultados con otros trabajos, se concluye que la mortalidad de brotes a lo largo del segundo ciclo de cultivo es bastante baja, puesto que se mantienen al menos el 75% de los brotes. Laureysens et al. (2003) indican que en la mayor parte de los clones se perdieron más del 40% de los brotes, aun siendo la densidad menor que la del CEDER.

Aunque en principio un mayor número de brotes es una característica demandada para un cultivo energético, un número elevado de pequeños tallos significará un mayor porcentaje de corteza en la biomasa final, motivo por el cual, en el caso del chopo, se está intentando producir en algunos viveros clones que no emitan una gran cantidad de rebrotes (Iriarte, 2008). También hay que considerar que una menor cantidad de brotes, pero más gruesos, podría dificultar el uso de algunas de las máquinas diseñadas para la cosecha de SRF.

4.1.4. Crecimiento y producción

4.1.4.1. Alturas y áreas basimétricas

4.1.4.1.1 Al final del primer ciclo de tres años

El clon AF-2 fue el que presentó una altura mayor, siguiéndole de cerca los clones I-214 y Monviso, mientras que el clon Pegaso quedó claramente por debajo del resto. En la provincia de León, con los mismo clones que los del presente trabajo se obtuvieron resultados similares en cuanto a la altura tras los tres primeros periodos vegetativos (Sixto et al., 2009b) y el estudio de Sixto et al. (2011), aunque con plantas de tan solo un año de edad, también señala que el clon Pegaso es el que menor altura registra en diferentes localidades españolas.

En cuanto al AB, también son numerosos los artículos que ya habían señalado a AF-2, como uno de los clones que presenta valores más altos, indicándose también que Pegaso es de los clones que registra menores áreas basimétricas (Sixto et al., 2009; Sixto et al., 2009b; Sixto et al., 2011). Por otra parte, los clones I-214 y Monviso, presentaron en el trabajo de Sixto et al. (2009b) AB muy similares, al igual que sucede en el presente trabajo, donde no se encontraron diferencias significativas entre ambos. En el trabajo de Baraza (2013) se repite este resultado, al presentar Monviso un diámetro medio de 6,12

cm y quedar Pegaso muy cerca con 5,70 cm de diámetro tras tres años de cultivo de estos chopos en la provincia de Zaragoza.

4.1.4.1.2 Al final del segundo ciclo de tres años

Algunos autores apuntan que la altura máxima de un clon en una plantación se alcanza durante el segundo ciclo (Pontailier et al., 1999); sin embargo en este caso las alturas medias registradas fueron menores a las del primer ciclo, si bien hay que tener en cuenta que el aporte de agua no fue el mismo que durante los tres primeros años. Aunque no se alcanzasen los mismos valores, si debería haberse mantenido el mismo ranking de clones, ya que según Pontailier et al. (1999) este se mantiene a lo largo de las distintas rotaciones; sin embargo el clon I-214 pasó a ser el clon con una altura media mayor, mientras que el clon AF-2, que era el de mayor altura en el primer ciclo, presentó una media significativamente menor, con unos 30 cm de altura menos. Pegaso que durante el primer ciclo había sido el que menos altura había alcanzado, tiene en este segundo ciclo una altura media similar a la de AF-2 y Monviso.

También a causa de la diferente cantidad de agua aportada, las AB en el segundo ciclo son en algunos clones menores que en el primero; sin embargo Pegaso mostró un AB media similar, mientras que I-214 experimenta un fuerte incremento desde los poco mas de 20 cm² por planta hasta los casi 32,5 cm². Las diferencias en AB entre clones durante el segundo ciclo fueron mucho más importantes que las encontradas en altura, ya que mientras las alturas medias difirieron entre los distintos clones menos de medio metro, el AB del clon I-214 llegó a ser prácticamente el doble que la de los clones Monviso y Pegaso.

En cada uno de los clones, las alturas en las tres primeras dosis fueron muy similares, apareciendo las diferencias significativas a partir de esta dosis, es decir parece existir una altura máxima en cada clon, la cual no se supera por mucho que se incremente el agua aportada. En algunos clones sucede algo parecido en las dosis más bajas, donde la escasa diferencia encontrada entre las dosis 7 y 8 indicaría que la altura registrada se aproxima al valor mínimo posible. Este comportamiento observado en las alturas es muy similar al que se puede apreciar en las AB.

4.1.4.2. Humedad de la biomasa

La humedad de la biomasa fue similar en todos clones de chopo. Este resultado ya se ha observado anteriormente en otros trabajos como el Mitchell et al. (1998), que señalan que ni el contenido de corteza, ni el de humedad dependen del clon de procedencia. También la humedad en las distintas dosis de riego fue similar, no habiéndose encontrado referencias que hablen de diferencias en la humedad de la biomasa en función de la cantidad de agua que reciben las plantas. Las ligeras variaciones encontradas podrían deberse a las variaciones meteorológicas durante los días que duró de la cosecha.

Las ramas de chopo presentaban un valor de humedad menor que el de los tallos. En otras especies se ha observado este mismo resultado; el estudio de Fernández et al. (2009) con olmo de Siberia muestra un mayor porcentaje de humedad en las ramillas finas que en las gruesas y los tallos, obteniendo también un mayor porcentaje de humedad en los individuos rebrotados de un año de edad que en los olmos al finalizar su primer ciclo de tres años.

4.1.4.3. Producción de biomasa seca

4.1.4.3.1 Al final del primer ciclo de tres años

Las producciones obtenidas en el presente trabajo son algo más bajas que las alcanzadas con estos mismos clones en la provincia de León, donde el rendimiento fue entre 2.000 y 3.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ mayor, excepto con el clon Pegaso con el que se obtuvo una producción similar a la alcanzada en el CEDER (Sixto et al., 2009b). En el trabajo de Baraza (2013) la producción obtenida con los clones AF-2 y Monviso es todavía mayor, alcanzando los 20.000 kg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que con I-214 se alcanzaron los 18.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca, si bien hay que tener en cuenta que las condiciones edafoclimáticas eran diferentes.

Los rendimientos obtenidos en el CEDER con otros clones de chopo también fueron mayores, por ejemplo los clones Boelare o Raspalje (ambos *P. trichocarpa* x *P. deltoides*) en el primer turno de cinco años alcanzaron unas producciones de 16.600 y 19.8000 kg ha⁻¹ año⁻¹; sin embargo otros clones procedentes del cruzamiento *P. deltoides* x *P. nigra* tuvieron rendimientos muy similares a los alcanzados en el presente trabajo, obteniendo una producción de 12.600 kg ha⁻¹ año⁻¹ con el clon Campeador y de tan solo 6.300 kg ha⁻¹ año⁻¹ con el clon Dorskamp (Ciria et al., 1996). La tesis doctoral de Ciria (1998), también llevada a cabo en el CEDER, indica que las producciones medias obtenidas con diferentes clones pueden alcanzar los 10.000 kg ha⁻¹ año⁻¹, destacando como clones más productivos Raspalje, Boelare, Unal y Beaupre, que lograron como máximo 16.500 kg ha⁻¹ año⁻¹. Algunos trabajos señalaron a I-214 como el mejor clon para la producción de biomasa, sin embargo otras investigaciones, como las comentadas anteriormente, pusieron de manifiesto que los cruzamientos entre *P. trichocarpa* x *P. deltoides* también ofrecen buenos resultados. Con I-214 San Miguel y Montoya (1984) obtuvieron un rendimiento de más de 17.000 kg ha⁻¹ año⁻¹, mientras que Marcos et al. (2002) lograron una producción de hasta 24.000 kg ha⁻¹ año⁻¹.

Otros ensayos llevados a cabo fuera de España, muestran gran diversidad en los rendimientos. En Italia, con algunos clones se alcanzó una producción de unos 20.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Mareschi et al., 2005), mientras que esos mismos clones en otros trabajos producían la mitad (Facciotto y Schenone, 1998). En Francia, con el clon Beaupre se alcanzaron las 12.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Bewa y Gavaland, 1999), mientras que en Reino Unido con este mismo clon el rendimiento estuvo por debajo de los 10.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Armstrong et al., 1999). Los clones Hazendans y Hoogvorst, que al igual que Beaupre

proceden de un cruce *P. trichocarpa* × *P. deltoides*, ofrecieron un rendimiento en Bélgica de 11.400 y 10.400 kg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente (Laureysens *et al.*, 2004). Por otra parte cabe señalar la fuerte variación en la producción que obtuvieron Scarascia *et al.* (1997) en EE.UU dependiendo del clon, con rendimientos que oscilaron entre los 14.000 a 35.000 kg ha⁻¹ año⁻¹.

Son numerosos los autores que inciden en que el clon es un factor fundamental para obtener una buena producción (Facciotto *et al.*, 2006; Pontailier *et al.*, 1999), sin embargo los resultados muestran que el rendimiento depende también en gran medida del lugar en el que se lleven a cabo las plantaciones. La facilidad de hibridación, así como para la multiplicación vegetativa, ha propiciado que se disponga de una extensa variedad de clones, los cuales presentan unas buenas características para distintos usos y también para distintas localizaciones, por lo que se deberá estudiar detenidamente cual es el material vegetal más idóneo para las características concretas de cada emplazamiento. También hay otros factores como la densidad, el turno de corta o los tratamientos culturales que sin duda afectaran la producción del chopo.

4.1.4.3.2 Al final del segundo ciclo de tres años

Durante el segundo ciclo el clon I-214 resultó ser el más productivo, pero cuando se analiza la producción en cada una de las dosis de riego se observa que su rendimiento es irregular (**Figura 3.1.13.**). En las cinco primeras dosis el rendimiento de I-214 superó con creces al del resto de clones, mientras que en las tres dosis más bajas su producción es casi igual. Por lo tanto, se puede concluir que I-214 es un clon muy productivo, pero que presenta una dosis crítica a partir de la cual su desarrollo queda fuertemente limitado.

El clon AF-2 alcanzó alturas similares a las de los clones Monviso y Pegaso y les superó en AB por planta, sin embargo su producción fue igual o menor que la de estos clones debido a la alta mortalidad registrada durante el segundo ciclo. Anteriormente, este clon ya había mostrado mala capacidad de rebrote con mortalidades que se acercaron al 30% (Sixto *et al.*, 2009b), si bien había conseguido mantener unos buenos resultados productivos, superando a otros clones con un porcentaje de supervivencia mayor.

A pesar de que algunos estudios hablan de importantes diferencias en la producción en función de la procedencia del material parental (Laureysens *et al.*, 2003; Laureysens *et al.*, 2005), en el presente trabajo los clones procedentes del mismo cruzamiento presentaron resultados muy diversos. Estos mismo trabajos señalan que los cruzamientos que dan buenos resultados durante el primer ciclo no tienen porque mantenerlos en la segunda rotación, ni viceversa. Al comparar las producciones de los dos ciclos estudiados en el presente trabajo, se observa que la producción de AF-2 durante el primer ciclo fue claramente superior a la alcanzada en el segundo en

cualquier dosis, sin embargo el clon I-214 mejoró sustancialmente la producción del primer ciclo, incluso con dosis de agua menores. Por su parte, el clon Monviso obtuvo en los mejores casos rendimientos ligeramente inferiores a los del primer ciclo, mientras que Pegaso superó también en alguna de las dosis la producción de la primera rotación. Hay que tener en cuenta que las producciones en las dosis más altas deberían ser similares a las obtenidas en el primer ciclo, ya que el volumen de agua aportado es parecido.

La mayaría de los trabajos realizados anteriormente reflejan una disminución de la producción en los sucesivos turnos, o como mucho un ligero aumento, siendo extraño que se produzca una mejora en el rendimiento tan importante como la que ha ofrecido el clon I-214. El estudio de Armstrong et al., 1999 muestra una reducción de la producción en el segundo ciclo que, dependiendo del clon, puede variar entre los 3.000 y los 6.000 kg ha⁻¹ año⁻¹; mientras que en los trabajos de Laureysens et al. (2003) y Laureysens et al. (2005) se reduce el rendimiento hasta la tercera parte en la mayoría de los clones estudiados. Por el contrario, en el trabajo de Pontailler et al. (1999) se obtuvieron mejores producciones durante el segundo ciclo de 2 años que durante el primero, si bien el rendimiento volvió a bajar a partir del tercer turno. La reducción de la producción tras las sucesivas cortas podría deberse a que los ejemplares de mayor edad pierden el crecimiento explosivo tras el rebrote característico de los individuos jóvenes (Al Afas et al., 2008). Según Nassi et al. (2010) en las plantaciones con turnos más largos la reducción de la producción se produce a partir del segundo ciclo, mientras que con turnos más cortos se pueden alcanzar las producciones más altas en la segunda o tercera rotación.

En cuanto al aporte de agua, son numerosos los autores que han reflejado un aumento de la producción al aplicar agua de riego (Coyle et al., 2005; Strong y Hansen, 1993), sin embargo es difícil estimar en qué medida este volumen de agua va a mejorar el rendimiento, ya que dependerá del tipo de material vegetal empleado, así como de la precipitación registrada en la zona. Al establecer un clon de chopo en secano y con tres diferentes aportes hídricos hasta alcanzar la capacidad de campo, Hansen (1988) obtuvo tras cuatro años de cultivo un rendimiento tan solo un 40% superior en las parcelas más regadas, es decir una diferencia mucho menor que la mostrada en el presente ensayo. Sin embargo, otros trabajos llevados a cabo más recientemente en España ofrecen diferencias en el crecimiento mayores, llegando a ser la producción en las parcelas a capacidad de campo más del doble que en las que percibían un 40% de esta cantidad (Sixto et al., 2009b). Además, en este último trabajo se observaron menores diferencias entre la primera y la segunda dosis y también entre las dos últimas, coincidiendo con los resultados del presente trabajo.

Las producciones obtenidas deben considerarse como buenas, ya que Armstrong et al. (1999) en un clima mucho más húmedo obtuvieron con distintos clones una producción

máxima de 8.500 kg ha⁻¹ año⁻¹ en la segunda rotación. Tampoco Laureysens *et al.* (2005) superaron los 10.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ con 17 clones diferentes en Bélgica, obteniendo con la mayoría de ellos tan solo 3.000 o 4.000 kg ha⁻¹ año⁻¹. Sin embargo, también hay plantaciones que han alcanzado mejores resultados, como las del trabajo de Nassi *et al.* (2010) en Italia que superaron los 20.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ o las Pontaillet *et al.* (1999) que sobrepasaron con algunos clones los 30.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ durante el segundo ciclo.

4.1.5. Eficiencia en el uso del agua (EUA)

La EUA de los clones AF-2 y Monviso durante el primer ciclo estuvo cerca de los 1,2 g l⁻¹, mientras que el clon I-214 se acercó a los dos anteriores ofreciendo una eficiencia de en torno a 1 g l⁻¹. El clon Pegaso fue el menos eficiente, registrando un valor de poco más de 0,6 g l⁻¹. (Figura 4.1.1.).

Figura 4.1.1. Eficiencia en el Uso del Agua (g l⁻¹) de los distintos clones de chopo durante el primer y el segundo ciclo de cultivo.

Durante el segundo ciclo, la EUA de Pegaso subió ligeramente, pero siguió registrando el valor más bajo de los cuatro clones. Por su parte, el clon AF-2, que había sido el más eficiente durante los primeros tres años, presentó una EUA bastante más baja durante el segundo turno, con un valor muy próximo al del clon Pegaso. El clon Monviso también redujo su eficiencia, pero en menor medida que AF-2, mientras que el clon que tuvo un mejor comportamiento fue I-214 que subió hasta algo más de 1,4 g l⁻¹.

Algunos trabajos han señalado que la EUA de una plantación depende de la procedencia del material vegetal. Zhang *et al.* (2004) señalaron que los chopos procedentes de ambientes más secos alcanzaban mayores eficiencias, mientras que el estudio de Li

(1999) con Eucaliptos también indicó que algunas procedencias eran más eficientes que otras. Sin embargo, en el ensayo objeto de estudio no se pueden sacar demasiadas conclusiones sobre la mayor o menor eficiencia de los clones, ya que el comportamiento de la mayoría de ellos varió de un ciclo a otro. Únicamente el clon Pegaso presentó el mismo resultado en ambas rotaciones, mostrando en las dos cortas las EUA más bajas.

Durante el segundo ciclo se estudió la EUA en las distintas dosis de riego, observando que la dosis 3 fue la que mayor eficiencia presentó, alcanzando algo más de $1,1 \text{ g l}^{-1}$ (**Figura 4.1.2.**). A partir de la tercera dosis todas las EUA estuvieron bastante próximas, oscilando entre algo menos de $0,8 \text{ g l}^{-1}$ y 1 g l^{-1} , es decir un aumento en el agua de riego estaba directamente relacionado con un aumento en la producción. Por otro lado, las menores eficiencias encontradas en las dosis más altas podrían deberse, o bien a la incapacidad del suelo para retener unas cantidades de agua tan elevadas, o bien a que se ha superado la cantidad de agua necesaria para mantener la planta a capacidad de campo. Por lo tanto, el volumen de agua aplicado a chopos en localizaciones con características edafoclimáticas como las del CEDER no deberá superar el volumen aplicado en la dosis 3, es decir unos $7000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Figura 4.1.2. Eficiencia en el Uso del Agua (g l^{-1}) en las distintas dosis de riego durante el segundo ciclo (considerados los 4 clones).

Los valores de EUA obtenidos son similares a los alcanzados por otros chopos en zonas donde el agua no era un factor limitante, como por ejemplo en el trabajo de Bungart y Hüttl (2002) donde las eficiencias estuvieron entre los $1,5\text{-}2 \text{ g l}^{-1}$. Sin embargo, estas eficiencias quedan muy por debajo de las registradas en otros trabajos, donde se han alcanzado con chopos y sauces hasta 5 g l^{-1} (Nixon et al., 2001; Martin y Stephens, 2006) o se han superaron los 3 g l^{-1} con el eucalipto (Stape et al, 2004).

Las EUA deben ser analizadas con cautela, ya que la obtención de unos valores altos no es suficiente para determinar si una especie o un clon de chopo son adecuados para la producción de biomasa. En ocasiones, el cierre de estomas puede generar altas eficiencias en situaciones de baja disponibilidad hídrica, pero acompañadas a su vez de producciones demasiado bajas que hacen inviable el cultivo. Por tanto, se deberá buscar una EUA alta, combinada con una productividad también alta.

4.1.6. Producción foliar

Se observó que el porcentaje que suponían las hojas respecto a la biomasa de ramas y tallos era mayor en las plantas con menores aportes hídricos. La dosis 8 produjo una cantidad de hojas equivalente a más del 22% de la biomasa acumulada en ramas y tallos durante todo el ciclo, un porcentaje similar al observado en otros estudios con chopos (Laureysens et al., 2005); mientras que en la dosis 2 la producción foliar representaba poco más del 5%, un dato que se aproxima al de Poorter y Nagel (2000) para árboles de gran tamaño. El clon I-214, a pesar de tener unos tallos con tan solo tres años de edad, ha conseguido producir en el ciclo casi 70.000 kg ha⁻¹, por lo que por su tamaño podría asemejarse a una población de mayor edad, donde se reduce el porcentaje que suponen las hojas en la biomasa total.

4.1.6.1. Índice de área foliar (LAI)

El LAI durante el verano se mantiene estable o crece muy ligeramente, mientras que durante la primavera es cuando se producen los mayores aumentos. Un desarrollo más temprano o más tardío del follaje dependerá sin duda de la climatología. En el gráfico del LAI de 2013 (**Figura 3.1.17.**) puede observarse que a causa de las bajas temperaturas registradas durante ese año en los meses de mayo y junio, el LAI permaneció estancado durante varias semanas. Un LAI estable a lo largo del verano es fundamental para obtener un correcto desarrollo de la plantación, ya que no sirve de nada obtener valores altos puntuales que luego no se mantienen (Dickmann, 1979). Las plagas o enfermedades son uno de los factores más importantes que puede afectar a la cantidad de hojas en una plantación y por tanto al LAI. En el caso del chopo, la roya (*Melampsora alli-populina*) afectó habitualmente las plantaciones en la parte final de cada periodo vegetativo, lo que generó la caída prematura de algunas hojas. Durante los años 2012 y 2013 (en los que se realizaron controles del LAI), el grado de afectación por roya fue bajo, sin embargo durante 2011, a causa de las temperaturas especialmente bajas registradas durante el verano, los daños fueron mucho mayores y más tempranos. Algunos autores señalan a la disminución del follaje a causa de la roya como uno de los principales problemas a los que se enfrenta la producción de chopo para biomasa (Sixto et al., 2007). El estrés hídrico también ha sido señalado como causante del descenso en el volumen de hojas a lo largo del periodo vegetativo (Kira, 1975), sin embargo en el presente trabajo no se ha observado este efecto. Los chopos de las dosis más bajas contaron desde un principio con una cantidad de agua muy pequeña, por lo que

desarrollaron menos follaje y por tanto no tuvieron luego que adaptarse a la escasez hídrica desprendiéndose de las hojas.

En 2012, los valores de LAI registrados durante el verano en las dosis 2, 4 y 6 fueron muy similares, observándose únicamente un valor significativamente menor en la dosis 8. En 2013 ni los valores del LAI de las dosis 2, 4 y 6 ni los de las dosis 4, 6 y 8 presentaron diferencias significativas, siendo únicamente diferentes las medias de las dosis segunda y octava. (**Figura 4.1.3. y Tabla 4.1-I**).

Figura 4.1.3. Índice de área foliar (LAI) durante los años 2012 y 2013 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214, considerando únicamente los valores registrados a partir del 15 de junio.

Tabla 4.1-I: Análisis de varianza (ANOVA) para el índice de área foliar (LAI) durante los años 2012 y 2013 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) en las dosis 2, 4, 6 y 8 del clon I-214, considerando únicamente los valores registrados a partir del 15 de junio. DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
LAI 2012 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)	Entre Grupos	27,1	3	9,0	17,0	0.0 *
	Intra grupos	36,1	68	0,5		
	Total	63,2	71			
LAI 2013 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)	Entre Grupos	19,6	3	6,5	3,4	0.0 *
	Intra grupos	174,8	92	1,9		
	Total	194,3	95			

Los LAI fueron más altos en 2013 que en 2012, siendo en 2013 los índices de las dosis 2, 4 y 6 en torno a $0,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ más altos y el LAI de la dosis 8 casi $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ superior. Estudios anteriores, como el de Debell et al. (1997), ya mostraron la importancia que tiene la edad de la plantación sobre la producción de hojas, indicando que cuatros clones de chopo incrementaron su LAI durante los tres primeros periodos vegetativos, estabilizándose este índice a partir del cuarto año. Una vez alcanzada la tangencia de copas el LAI deberá permanecer constante, circunstancia que puede resultar muy útil para conocer de forma rápida y sencilla el turno óptimo de una plantación (Hernández et al., 2009).

Cabe reseñar que los valores de LAI registrados están lejos de los valores máximos que se pueden alcanzar con frondosas, que algunos autores fijan entre los 8 y los $10 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Perri, 1994). En otras plantaciones de chopo en corta rotación, el LAI de distintos clones se mantuvo entre 4 y $8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ en parcelas que contaban con 3-4 años de edad (Debell, 1997), mientras que en plantaciones de sauce los valores máximos oscilaron entre 5 y $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Bullard et al., 2002b), por lo que los LAI aquí observados deben considerarse algo bajos.

4.1.7. Estrés hídrico

En 2012, en la dosis 2 los Ψ_f a media mañana estuvieron siempre en torno a $-0,5 \text{ MPa}$, mientras que en 2013 los Ψ_{xm} a mediodía en esta dosis se aproximaron también a este valor señalado como óptimo (Selles et al., 2002), lo que indicaría que estas parcelas no estaban apenas estresadas. Sin embargo, durante 2013 tanto el Ψ_f a media mañana como el Ψ_f a mediodía fueron ligeramente más bajos, registrándose en algunas ocasiones valores próximos a -1 MPa .

En la dosis más baja los Ψ_f fueron menores, rondando los $-1,5 \text{ MPa}$ o incluso acercándose a los -2 MPa en el caso de las mediciones realizadas a mediodía. Sin embargo, los Ψ_{xm} a mediodía no bajaron en ningún momento de -1 MPa , lo que indicaría que, a pesar de la baja cantidad de agua recibida, las plantas no estaban prácticamente estresadas. Estos potenciales, más altos de lo inicialmente esperado, podrían deberse a que el chopo evita las pérdidas de agua reduciendo la evaporación mediante el cierre de estomas. Anteriores trabajos ya habían indicado la alta capacidad del chopo para el control estomático, sin embargo también se señala que este cierre de estomas va acompañado de una fuerte reducción en el rendimiento, encontrándose relaciones negativas entre la mayor eficiencia en el uso del agua y la producción (Zhang et al., 2005). Considerando que con Ψ_{xm} a mediodía en torno a $-0,5 \text{ MPa}$ las plantas no están sufriendo estrés hídrico, tanto en 2012 como en 2013 únicamente habrían estado estresadas las parcelas de chopo con la dosis más baja (8); sin embargo los datos de producción denotan que la ausencia de agua ha reducido considerablemente el crecimiento en las dosis 4 y 6, concluyéndose que es el cierre de estomas el que hace

que el descenso del potencial no sea muy acusado hasta que las disponibilidades hídricas son muy bajas.

Las diferencias de potencial entre las distintas dosis de riego han sido en muchos casos muy pequeñas, si bien pequeñas diferencias pueden significar variaciones importantes en el estado hídrico de la planta. Según Girona et al. (2006) las vides con Ψ_f a mediodía de -0,8 MPa estarían bien regadas, pero si el potencial desciende hasta -1,2 MPa ya presentarían un déficit importante, que sería severo al bajar de -1,5 MPa. En el caso de la caña de azúcar, las parcelas que recibían un 80% del agua necesaria para mantenerlas a capacidad de campo tenían un Ψ_f a media mañana de unos -0,8 MPa y un Ψ_f a mediodía de -1,2 MPa, mientras que estos potenciales bajaban hasta -1,5 y -1,8 MPa si la dosis era del 40% de la capacidad de campo (Chen et al., 2012). Aunque los potenciales hídricos varían de unas especies a otras, a la vista de los datos anteriormente expuestos se puede decir que los chopos regados con la dosis 2 no sufrían estrés o este era muy leve, con las dosis 4 y 6 sufrieron en ocasiones un estrés moderado, mientras que con la dosis 8 el estrés fue moderado o en ocasiones severo.

El estrés hídrico de las plantas está relacionado con la disponibilidad de agua, por lo que debería existir una relación entre este parámetro y la humedad edáfica. En plantaciones de Sorgo, García et al. (2010) encontraron un índice de correlación R^2 del 70% entre la humedad del suelo y el Ψ_f a mediodía, correlación que era todavía más fuerte si el estrés hídrico de la planta se medía a primera hora de la mañana, mostrando un valor de más del 86%. En las plantaciones de chopo objeto de estudio la relación entre ambas variables no fue tan intensa, obteniéndose en 2012 un valor de R^2 entre la humedad edáfica y el Ψ_f a media mañana de poco más del 30% (**Figura 4.1.4.**), mientras que durante 2013 se obtuvo un R^2 similar entre los valores de humedad obtenidos con el TDR y el Ψ_{xm} a mediodía.

Los valores del Ψ_{xm} , son más estables que los del Ψ_f (**ver epígrafe 1.6.4.**), al no verse sus resultados afectados por variaciones en la insolación, la temperatura o la humedad ambiental (McCutchan y Schakel, 1992; Sellés *et al.*, 2002). Al depender los valores Ψ_f de la meteorología, las correlaciones encontradas entre los distintos potenciales no fueron excesivamente altas, si bien los tres parámetros estudiados reflejan, en mayor o en menor medida, el estrés hídrico que sufre la planta, observándose entre ellos índices de correlación significativos. La mayor correlación fue la observada entre el Ψ_f y el Ψ_{xm} a mediodía, mientras que las correlaciones de los dos anteriores parámetros con el Ψ_f a media mañana fueron menores (**Tabla 4.1-II**). Esta menor correlación posiblemente se deba a que no todas las hojas recogidas a esta hora llevaban el mismo tiempo expuestas al sol, debido a la disposición de las subparcelas.

Figura 4.1.4. Regresión lineal entre la humedad edáfica y el Ψ_f a media mañana durante 2012 y entre la humedad edáfica y el Ψ_{xm} a mediodía durante 2013.

Tabla 4.1-II: Coeficiente de correlación de Pearson entre el Ψ_f a media mañana, el Ψ_f a mediodía y el Ψ_{xm} a mediodía durante 2013 (tercer periodo vegetativo del segundo ciclo).

	Ψ_f Media mañana	Ψ_f Mediodía	Ψ_{xm} Mediodía
Ψ_f Media mañana	1	0,439*	0,445*
Ψ_f Mediodía	—	1	0,676*
Ψ_{xm} Mediodía	—	—	1

* $P < 0,05$. $n = 14$

4.2. Cultivo de olmo de Siberia

4.2.1. Brotación

La brotación en los olmos se solía producir varios días antes que en otras especies implantadas también en las parcelas de cultivos energéticos del CEDER, como los chopos o la Robinia. Estudios anteriores también informaron de que el olmo de Siberia presenta un periodo vegetativo largo (Argent et al., 1985). Esta característica de la especie es un aspecto positivo desde el punto de vista productivo, ya que a mayor duración del periodo de crecimiento, mayor rendimiento. Sin embargo, hay que destacar, como dato negativo, la desigual brotación que se produjo en 2013, cuando numerosos ejemplares situados en la parte nordeste de las parcelas vieron el inicio de su periodo vegetativo retrasado casi un mes. Esta situación pudo deberse al intenso frío que se registró esa primavera, con vientos dominantes del noreste, y al efecto borde al que se vieron sometidas estas pequeñas parcelas experimentales al cortar las parcelas adyacentes de olmo de Siberia, las cuales habían llegado a su turno de tres años.

4.2.2. Mortalidad

El número de marras observado tras la implantación en las parcelas de olmo del CEDER (implantadas en otoño) fue más alto que en las parcelas de Almazán (implantadas en primavera), diferencia que podría deberse a las difíciles condiciones que presentó el suelo en el CEDER durante el invierno de la implantación, ya que se registraron temperaturas muy bajas y altas precipitaciones, lo que propició que el terreno estuviese encharcado durante un largo periodo de tiempo. Estas condiciones fueron especialmente negativas para el olmo de Siberia, que es una especie bastante intolerante a los suelos inundados (Loucks and Keen, 1973). Coyle et al. (2005) también señalaron al encharcamiento de las parcelas durante el año de establecimiento como la principal causa de mortalidad en chopos. Tras la reposición de marras ningún otro individuo murió a lo largo del primer ciclo de vida de las plantaciones.

Estudios llevados a cabo en España bajo condiciones climáticas similares a las que nos ocupan (provincia de Teruel), mostraron una tasa de supervivencia del olmo el año de la implantación mayor que la obtenida en el CEDER (Fernández et al., 2009). En el citado trabajo sobrevivieron un 96,5% de los árboles tras los primeros tres años de cultivo, un dato próximo al encontrado en las parcelas de Almazán. Sin embargo, tras el rebrote en el trabajo de Teruel la tasa de supervivencia fue del 89,7%, es decir las parcelas rebrotaron peor que en cualquiera de las dos localizaciones aquí estudiadas. Por su parte, en el estudio de Sanz et al. (2011) llevado a cabo en Alcalá de Henares (Madrid), la tasa de supervivencia del olmo en secano una vez finalizado el primer ciclo de cultivo fue del 100%, sobreviviendo también todos los individuos una vez realizada la primera corta. En el trabajo de Iriarte (2008), sin embargo, murieron un 9% de los

individuos tras el primer ciclo de cultivo, pero, al igual que se sucedió en el trabajo de Alcalá de Henares, la capacidad de rebrote fue buena y no se registró ninguna muerte más tras la corta.

Fuera de España los resultados obtenidos sobre la supervivencia del olmo son muy diversos. En EE.UU, tras 6 periodos vegetativos en los que se realizaron cortas anualmente, Geyer (2006) obtuvo una tasa de supervivencia del 76%, la cual estuvo muy por encima de la de otros cultivos energéticos estudiados por este autor como el chopo o la robinia. Sin embargo, el trabajo de Geyer et al. (2007), presenta tasas de supervivencia mucho más bajas para diferentes genotipos de olmo de Siberia, sobreviviendo, como media, tras cinco años de cultivo tan solo el 33% de los individuos, si bien esta tasa de supervivencia se mantuvo y fue del 30,2% tras 16 años.

Otras especies cultivados en España en condiciones similares, como el sauce o la robinia, mostraron también una buena capacidad de implantación, registrando una mortalidad inferior al 2%; sin embargo en el caso del plátano de sombra se contabilizaron un 50% de marras (Sixto et al., 2010). Al comparar la capacidad de supervivencia del olmo de Siberia con la de otras especies, se debe tener en cuenta que el olmo no se ve prácticamente afectado por plagas y enfermedades, representando esto una ventaja respecto a otras especies como, por ejemplo, el chopo. Además, la capacidad de rebrote del olmo habitualmente es bastante satisfactoria, circunstancia que no siempre se observa en todos los clones chopo (**ver epígrafe 4.1.2**).

4.2.3. Número de brotes

El número de brotes que presentaron los olmos durante el primer ciclo de cultivo fue similar al observado en otros trabajos. Sanz et al. (2011) en la localidad española de Alcalá de Henares contabilizaron 1,6 brotes por planta como media, mientras que en el trabajo de Geyer et al. (2007) en Estados Unidos se muestra una media de 2 brotes por planta. Sin embargo, el estudio de Fernández et al. (2009) ofreció un número mayor de brotes durante el primer ciclo, contabilizándose 3,2 vástagos por planta como media.

El número de brotes tras la cosecha suele ser bastante más elevado que durante el primer turno, siendo generalmente positivo un alto número de rebrotes a la hora de seleccionar las especies para fines energéticos. Las parcelas establecidas con una densidad más baja fueron las que presentaron un mayor número de ellos, lo que podría achacarse al mayor tamaño de las plantas antes de la corta, ya que, según las investigaciones realizadas por Iriarte (2008) con olmos y Laureysens et al (2003) con chopos, existe una correlación positiva entre el número de rebrotes y el tamaño previo del ejemplar. Sin embargo, el tamaño alcanzado antes de la corta por las plantas de regadío de densidad más alta era mayor que el de las de secano con densidad más baja,

mientras que el número de brotes fue mayor en estas segundas, por lo que el espacio disponible y la facilidad de expansión también parece determinante a la hora de generar un mayor o menor número de brotes.

Tras el rebrote, en el trabajo de Sanz et al. (2011) el número brotes por planta fue tan solo de 5,2, un número bastante bajo que el autor achaca a la densidad de plantación (6.666 pl ha^{-1}), sin embargo en el presente estudio se cuenta con parcelas de idéntica densidad, registrándose valores mucho mayores. A pesar de contar con una densidad de plantación mayor ($10.000 \text{ pl ha}^{-1}$), la tesis de Iriarte (2008) ofreció un número de brotes tras la primera corta muy similar al registrado en el CEDER y en Almazán, mientras que en el trabajo de Fernández et al. (2009), con una densidad de 3333 pl ha^{-1} , obtuvieron como media 27,1 brotes tras la cosecha. Por su parte, Geyer (1991) contabilizó solo 3 brotes por planta una vez realizada la segunda corta, por lo que es difícil sacar una conclusión sobre la cantidad de brotes que presenta el olmo de Siberia tras la corta y sobre el efecto que tiene la densidad de plantación en esta cantidad.

4.2.4. Crecimiento y producción

4.2.4.1. Alturas y áreas basimétricas

En el CEDER el crecimiento en altura y AB fue constante a lo largo de los cuatro periodos vegetativos del primer ciclo, mientras que en las plantaciones de Almazán hubo mayores incrementos de estas variables durante el tercer y el cuarto año (**Figuras 3.2.2. y 3.2.3.**). Sanz et al. (2011) indicaron que el incremento del diámetro y la altura de los olmos durante el tercer periodo vegetativo era igual a la suma de los dos años anteriores, lo que indicaría que esta especie muestra un crecimiento exponencial, ya observado también en otras especies como el chopo o el sauce (Labrecque y Teodorescu; 2005). Sin embargo, el mayor crecimiento registrado en Almazán, sobre todo durante el cuarto año, quizá deba achacarse más a las buenas condiciones climatológicas registradas durante este año, en el que las precipitaciones fueron especialmente altas. De todas formas, en ambas localizaciones la producción creció de forma exponencial, ya que un crecimiento lineal de diámetros y alturas significará un crecimiento exponencial de la producción, como muestra por ejemplo el trabajo de Geyer et al. (2007), donde los diámetros y las alturas desde los 5 a los 16 años solamente se duplicaron, pero el volumen de biomasa obtenido fue casi 5 veces mayor.

Algunos estudios llevados a cabo con olmo de Siberia en España ofrecen alturas mayores que las aquí logradas, por ejemplo en el trabajo de Sanz et al. (2011), a los tres años los olmos alcanzaron una altura media de más de 5 m en secano y con densidad de 6.666 pl ha^{-1} ; mientras que en el de Andivia et al. (2013) en tan solo 2 años, en regadío y densidad de 5.625 pl ha^{-1} , se logró una altura media de unos 4 m. Sin embargo, en condiciones climáticas similares a las que nos ocupan, el crecimiento del olmo de

Siberia fue muy similar al de los presentes ensayos, quedando la altura media a los tres años y en condiciones de secano por debajo de los 3 m (Fernández et al., 2009). En cuanto al AB, en los dos primeros trabajos fue muy similar a la obtenida en las parcelas de secano del CEDER y bastante inferior a la obtenida en regadío y en las parcelas de Almazán; mientras que en las parcelas de Teruel de Fernández et al. (2009) que habían mostrado una altura menor, el AB media fue bastante más alta, lo cual seguramente se deba a la menor densidad de plantación utilizada. Los resultados anteriores confirman que los datos de altura y AB hay que analizarlos siempre de manera conjunta.

Debido a la alta correlación que de manera habitual existe entre los sucesivos años de cultivo (Laureysens et al., 2003), en muchos casos los datos obtenidos a los 3 y 4 años en cuanto a altura, AB y producciones muestran resultados de los cuales se pueden extraer conclusiones similares. A ambas edades se encontraron diferencias significativas en cuanto a la altura y el AB entre los olmos de secano y regadío, pero no entre las dos dosis de riego, lo cual podría deberse a que las plantas no pueden aprovechar el agua suministrada debido a la baja capacidad de retención del suelo o también a otros factores, como la baja fertilidad, que pueden actuar como factores limitantes.

El efecto de la densidad sobre las alturas fue distinto en las parcelas de secano que en las de regadío, circunstancia observada tanto a los 3 como a los 4 años. En secano, debido al pequeño tamaño de los individuos no hubo competencia por la luz, por lo que estos no se vieron obligados a desarrollarse en altura, obteniéndose ejemplares más altos en las parcelas menos densas, ya que estas disponían de más recursos hídricos por planta. Sin embargo, los olmos de regadío establecidos con una densidad de plantación más alta, registraron alturas medias significativamente mayores que sus compañeros establecidos a menor densidad. Los ejemplares más esbeltos típicos de plantaciones de alta densidad tienen una mayor proporción de corteza en la biomasa, lo que supondrá una mayor cantidad de cenizas en su aprovechamiento energético (Kauter et al., 2003).

Al contrario que lo sucedido con la altura, la densidad sí tuvo el mismo efecto sobre el AB en el secano y en el regadío, observándose AB por planta significativamente mayores en las parcelas menos densas. Sin embargo, las AB por planta en ningún caso llegaron a ser el doble en las parcelas menos densas, por lo que el AB por hectárea será mayor en las parcelas con densidad 6.666 pl ha⁻¹ que en las de 3.333 pl ha⁻¹. En el artículo de Cañellas et al. (2012) con chopo, el AB tras el primer año de crecimiento mostró una estrecha relación con la densidad, si bien advierte que, en años sucesivos, esta relación tiende a desaparecer al llegar las plantaciones a la tangencia de copas, observándose similares AB en todas las densidades de plantación.

Las mayores alturas y AB durante el primer ciclo de cultivo se obtuvieron en las parcelas de Almazán, mostrando que el tipo de suelo es un elemento fundamental a la hora de alcanzar una buena producción. Sin embargo, a pesar de que algunos autores

han indicado la existencia de una fuerte correlación entre el crecimiento antes y después del rebrote (Al Afas et al., 2008), en Almazán la altura media de los olmos rebrotados no fue superior a la que presentaban los del CEDER. La causa del escaso desarrollo de la plantación durante este año en Almazán puede ser la ausencia de trabajos de eliminación de las malas hierbas que circundaban los olmos.

4.2.4.2. Humedad de la biomasa

El porcentaje de humedad de la biomasa en las diferentes condiciones de cultivo fue muy similar, por lo que se puede decir que ni la densidad, ni el riego afectan al contenido de humedad en el momento de la corta. Si que existió variabilidad entre los distintos periodos vegetativos, la cual podría deberse a las diferentes condiciones ambientales a la hora de realizar la corta, ya que las mayores humedades se registraron cuando las plantas tenían tallos de un año de edad, periodos en los que, en un principio, deberían haberse obtenido las humedades más bajas. Cuanto menor es el tamaño de tallos y ramas, mayor es el porcentaje de corteza, la cual presenta un porcentaje de humedad sensiblemente menor al de la madera. En el trabajo de Iriarte (2008) la corteza de olmo de Siberia presentaba una humedad del 30%, mientras que la madera contenía un 42%.

Según la mayor parte de la bibliografía consultada, la humedad de la biomasa del olmo de Siberia esta generalmente por debajo del 50%, llegando a presentar en ocasiones una humedad de tan solo el 36 % (Sanz et al., 2011); es decir valores inferiores a los presentados por otros cultivos energéticos como el chopo, que tiene en torno al 50% de humedad en este estudio (**ver epígrafe 3.1.5.2.**) y que puede tener en el contenido de humedad un importante problema, llegando a alcanzar valores de entre el 55-60% (Kauter et al., 2003). Un alto contenido de humedad es un dato negativo, ya que en la combustión el agua no genera energía calorífica si no que la consume; además un alto contenido de humedad aumenta los gastos de transporte y durante el almacenamiento genera problemas por degradación de la biomasa. Otras especies como la *Robinia pseudoacacia* suelen presentar valores de humedad más bajos, similares a los presentados por el olmo (Geyer y Walawender, 1994).

4.2.4.3. Producción de biomasa seca

4.2.4.3.1 Modelos de regresión

Una vez conocidas la altura y el AB por planta, se estimó la producción de biomasa del olmo a lo largo del primer ciclo de cultivo mediante modelos de regresión lineal que relacionan estas variables. Algunos de los modelos obtenidos utilizan tanto el AB como la altura total de la planta para conocer el peso seco de las plantas, mientras que en otros solo se empleó el AB, ya que el coeficiente de determinación R^2 mejoraba tan solo ligeramente al añadir más variables. A pesar de usar la altura total junto con el AB, la ecuación de regresión que estima la producción durante el primer año, mostró un coeficiente R^2 de tan solo el 63,04%; mientras que este ajuste mejoró en años

posteriores, obteniéndose una variabilidad explicada de en torno al 85% o superior (**Tabla 4.2-I**). Además de obtener ecuaciones para calcular la producción en cada uno de los cuatro años del primer ciclo, se realizó una ecuación con datos de todos los años, con el fin de obtener una única ecuación válida para todo el ciclo. El resultado en este último caso fue también satisfactorio, ya que el coeficiente R^2 fue del 82,6%.

Tabla 4.2-I: Modelos de regresión para estimar el peso seco (PS) por árbol (g) en función del área basimétrica (AB) dada en mm^2 y la altura (h) en metros. R^2 : R^2 ajustada por grados de libertad.

Periodo vegetativo	Edad de la plantación	MODELO DE REGRESIÓN
1°	R1T1	$\text{PS} = -43,5554 + 0,318699 \cdot \text{AB} + 0,626922 \cdot h$ $R^2 = 63,04\%$
2°	R2T2	$\text{PS} = 53,9707 + 0,573709 \cdot \text{AB}$ $R^2 = 86,61\%$
3°	R3T3	$\text{PS} = -504,438 + 0,990885 \cdot \text{AB}$ $R^2 = 88,70\%$
4°	R4T4	$\text{PS} = -1.307,99 + 1,46803 \cdot \text{AB}$ $R^2 = 82,50\%$
Ciclo	Todo el ciclo	$\text{PS} = -658,294 + 1,23578 \cdot \text{AB}$ $R^2 = 82,60\%$

Los modelos obtenidos se emplearon para estimar el peso seco del resto de los individuos en los que se habían medido diámetros y alturas, obteniendo una estimación del rendimiento en cada condición de cultivo. Estas producciones se pudieron comparar con los datos reales obtenidos en las cortas llevadas a cabo al finalizar el tercer y el cuarto periodo vegetativo. El modelo obtenido para el tercer periodo vegetativo predecía bastante bien el rendimiento, observándose diferencias entre la producción real y la estimada menores del 20% (**Tabla 4.2-II**), mientras que el modelo de estimación para todo el primer ciclo obtuvo todavía mejores resultados en algunas de las condiciones de cultivo, con diferencias en la producción menores del 5% en muchos casos. Sin embargo, este último modelo no fue capaz de estimar correctamente la producción en las parcelas de baja densidad del CEDER, ni en secano ni en regadío, obteniendo más de un 40% de diferencia entre el rendimiento real y el estimado. Esta dificultad de ajuste podría deberse a las distintas morfologías que presentan las plantas, ya que en una menor densidad de plantación y siempre que las masas no hayan alcanzado la tangencia

de copas, los arboles se desarrollaran mas en diámetro y menos en altura, es decir los individuos serán menos esbeltos. Esta tendencia a sobreestimar la producción en las parcelas de menor densidad se observa también en el modelo anual, si bien aquí la diferencia es mucho menor.

Tabla 4.2-II: Producción estimada y real (kg MS ha⁻¹ año⁻¹) al final del tercer periodo vegetativo en las diferentes condiciones de cultivo. CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

	Prod. real (kg MS ha ⁻¹ año ⁻¹)	Prod. Estimada (kg MS ha ⁻¹ año ⁻¹)		Diferencia (%)	
		Ecuación 3 ^{er} año	Ecuación ciclo	Ecuación 3 ^{er} año	Ecuación ciclo
CS-SB	1.183,4	1.418,8	1.737,0	19,9	46,8
CS-SA	1.631,2	1.332,7	1.571,7	-18,3	-3,6
CS-R1-A	5.191,1	4.460,8	5.498,4	-14,1	5,9
CS-R2-B	2.432,3	2.814,8	3.478,0	15,7	43,0
CS-R2-A	4.930,8	4.444,1	5.477,6	-9,9	11,1
ALM-SB	4.581,1	3.633,8	4.499,5	-20,7	-1,8

En las subparcelas con turno de cuatro años se realizó un nuevo modelo anual, el cual predijo el rendimiento con bastante precision en todas las condiciones de cultivo excepto en el secano de alta densidad, donde subestimó la producción en un 38%, y en el regadío de alta densidad, donde sobrestimó el rendimiento en un 23,7% (**Tabla 4.2-III**). Estos resultados indican que si los modelos se adaptan mejor a la baja densidad, pierden capacidad predictiva en la densidad alta, es decir que es difícil encontrar un modelo que se adapte perfectamente a todas las condiciones de cultivo, debido a la diferente morfología que presentan los olmos en cada una de estas condiciones. La ecuación obtenida para todo el ciclo mostró mejores resultados que el modelo anual, con errores en general menores al 20%.

Al comparar los modelos de regresión obtenidos para el olmo con los de otros autores, se observa que en algunos casos estos tuvieron una variabilidad explicada mayor, llegando al alcanzar R² de más del 95% (Iriarte y Fernández, 2006), si bien hay que tener en cuenta que en este caso todos los olmos introducidos en el modelo se desarrollaron en las mismas condiciones de cultivo. En otras ocasiones la R² fue algo menor, aunque siempre estuvo por encima de 90% si se empleaba en la regresión el diámetro de los brotes antes de bifurcarse (Iriarte, 2008). Por otra parte, algunos trabajos llevados a cabo con chopo, como el de Ciria et al. (2007) o el de Al Afas et al. (2008), desarrollaron modelos conjuntos para distintos clones, edades o densidades de

plantación, obteniendo buenos ajustes; sin embargo otros autores apuntan a la necesidad de llevar a cabo modelos por separado para cada edad (Telenius y Vertwijst, 1995; Godino, 2005).

Tabla 4.2-III: Producción estimada y real (kg MS ha⁻¹ año⁻¹) al final del cuarto periodo vegetativo (edad de la planta R4T4) en las diferentes condiciones de cultivo. CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

	Prod. real (kg MS ha ⁻¹ año ⁻¹)	Prod. Estimada (kg MS ha ⁻¹ año ⁻¹)		Diferencia (%)	
		Ecuación 4º año	Ecuación ciclo	Ecuación 4º año	Ecuación ciclo
CS-SB	1.946,6	1.849,4	1.925,8	-5,0	-1,1
CS-SA	1.929,2	1.195,7	1.744,5	-38,0	-9,6
CS-R1-A	4.810,9	5.434,1	5.312,3	13,0	10,4
CS-R2-B	3.356,5	4.153,1	3.865,1	23,7	15,2
CS-R2-A	5.826,2	6.337,2	6.072,6	8,8	4,2
ALM-SB	7.600,0	6.779,9	6.076,2	-10,8	-20,0

4.2.4.3.2 Evolución de la producción a lo largo del ciclo

Con las ecuaciones obtenidas y las mediciones de diámetros y alturas realizadas en 60 plantas de cada una de las condiciones de cultivo, se estudió la evolución de la producción de biomasa a lo largo de los cuatro años que duró el ciclo. En la mayoría de los casos se empleó para estimar la biomasa el modelo anual, pero el último año en el CEDER se utilizó el modelo para todo el ciclo, ya que en esta ocasión era el modelo que mejor predijo la producción real obtenida.

Durante el primer periodo vegetativo, la producción de biomasa fue mucho menor que en años posteriores en todas las condiciones de cultivo (**Figura 4.2.1. y Tabla 4.2-IV**). Además, en la mayoría de las parcelas, sobre todo en las de Almazán y en las de regadío del CEDER, el rendimiento durante el segundo año fue también bajo en comparación con el del tercer y el cuarto periodo vegetativo. Las parcelas de Almazán lograron producir durante el cuarto año más que en los tres anteriores. Por lo tanto, en estas parcelas la producción creció exponencialmente a lo largo del ciclo, no observándose tan claramente este crecimiento exponencial en las parcelas de secano del CEDER, donde la baja disponibilidad de agua y de nutrientes limitó fuertemente el crecimiento a lo largo de los cuatro años de ensayo. Labrecque y Teodorescu (2005) indicaron anteriormente crecimientos exponenciales para especies como el chopo o el sauce,

mientras que en el caso del olmo de Siberia, Sanz et al. (2011) señalaron que la producción se multiplicó casi por cuatro, llegando a los 39.500 kg ha⁻¹ durante el tercer periodo vegetativo.

Figura 4.2.1. Evolución de la producción de biomasa (kg MS ha⁻¹) a lo largo del primer ciclo de cuatro años. Las diferentes letras indican diferencias significativas en la producción de acuerdo al test de Duncan al finalizar el tercer y el cuarto periodo vegetativo ($P \leq 0.05$). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Tabla 4.2-IV: Análisis de varianza (ANOVA) para la producción al final del tercer y el cuarto periodo vegetativo. DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
Producción (kg ha ⁻¹) a los tres años	Entre Grupos	$4,73 \times 10^9$	5	$9,47 \times 10^8$	59,62	0.0 *
	Intra grupos	$5,62 \times 10^9$	354	$1,58 \times 10^7$		
	Total	$1,03 * 10^{10}$	359			
Producción (kg ha ⁻¹) a los cuatro años	Entre Grupos	$2,18 \times 10^{10}$	5	$4,35 \times 10^9$	78,52	0.0 *
	Intra grupos	$1,96 \times 10^{10}$	354	$5,54 \times 10^7$		
	Total	$4,14 * 10^{10}$	359			

Las características del suelo fueron más importantes que el riego o la densidad de plantación a la hora de obtener una buena producción, observándose las producciones

más altas en las parcelas de Almazán, las cuales se establecieron en condiciones de secano y con la densidad más baja. El olmo de Siberia se desarrolló perfectamente en los suelos poco arenosos de Almazán, a pesar de que estudios anteriores habían señalado que esta especie, al igual que sucede con otros cultivos energéticos leñosos como el chopo o el sauce, prefería suelos bien drenados (Loucks and Keen, 1973; Tufekcioğlu et al., 2005). Hay que señalar que el fuerte crecimiento registrado durante el último año en Almazán, se debe también en buena parte a la precipitación excepcionalmente alta registrada ese año durante el verano, la cual permitió un mayor desarrollo de estas parcelas, que crecían sin aportes de agua de riego.

A pesar de que en las parcelas de secano del CEDER se obtuvo una producción bastante más baja que en Almazán, los resultados obtenidos deben ser considerados como buenos, ya que los inputs utilizados han sido bajos, al no aplicar riego, y se han empleado terrenos que no se estaban usando para la agricultura por su bajo potencial agrícola y que por lo tanto no entra en competencia con el mercado alimentario. Sin embargo, también es cierto que la aplicación de riego hizo aumentar considerablemente la producción y que por tanto se deberá hacer un estudio económico exhaustivo para ver la conveniencia o no de su uso. Se encontraron diferencias significativas entre la producción en secano y en regadío, observándose también diferencias entre las dos dosis de riego al finalizar el cuarto periodo vegetativo. La diferencia en el rendimiento entre dosis se alcanzó durante el último año, ya que un año antes no se observaron diferencias entre estas dos condiciones de cultivo. En caso de aplicar riego, habrá que tener en cuenta que las dosis de riego altas, por encima de unos $2000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, puede que no sean aprovechadas correctamente por los olmos en suelos como el del CEDER, con una baja capacidad de retención de agua y una baja disponibilidad de nutrientes, que pueden actuar como factores limitantes.

En cuanto a la densidad, en secano no se encontraron diferencias significativas entre los dos espaciamientos estudiados, lo cual podría deberse a la escasa disponibilidad hídrica, que hizo que las plantaciones más densas tuvieran una alta competencia por el agua y no pudieran aprovechar ese mayor potencial inicial de la alta densidad. Por el contrario, en las plantaciones de regadío la producción fue mayor al reducir el espaciamiento, tanto al finalizar el tercer como el cuarto año, si bien hay tener en cuenta que, según numerosos autores, con turnos más largos esta producción tendería a igualarse (Cañellas et al., 2012; Liesebach et al., 1999; DeBell et al. (1996).

4.2.4.3.3 Comparación producción turno 4 años y 3+1 años

Al comparar la producción obtenida en las plantaciones cortadas con cuatro años y la suma de la producción a los tres años más la del primer año tras el rebrote, se observa que en algunos tratamientos los dos rendimientos son muy similares, mientras que en otros la producción con turno de cuatro años es superior (**Figura 4.2.2.**). Las menores diferencias productivas se observan en el secano y en la dosis de riego más baja del

CEDER, donde incluso se muestra ligeramente más productiva la opción de cortar a los tres años. En estas parcelas el crecimiento “explosivo” de los árboles el primer año tras el rebrote ha sido suficiente para que se obtengan rendimientos iguales o superiores con el turno más corto; pero hay que tener en cuenta que, debido a la escasez de agua y nutrientes, la producción en ambos turnos es muy baja, no habiéndose llegado a la tangencia de copas y por tanto al turno óptimo. Es decir, un turno de al menos 4 años será más ventajoso en estas parcelas si se tiene en cuenta la pequeña diferencia productiva encontrada y el coste de las extracciones de biomasa.

Figura 4.2.2. Comparación de la producción de biomasa ($\text{kg}^{-1} \text{MS ha}^{-1}$) con turno de 3 años + rebrote y con turno de 4 años. CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Un turno de al menos 4 años es todavía más recomendable en las parcelas de regadío y en Almazán, donde la mayor disponibilidad de recursos hídricos y de nutrientes posibilitó un crecimiento exponencial de la producción a lo largo del ciclo. En Almazán, la diferencia entre los dos turnos fue especialmente importante debido a las dificultades para desarrollarse que tuvieron los rebrotes durante las primeras semanas, al encontrarse con una gran competencia por los recursos a causa de la proliferación de malas hierbas.

Anteriores trabajos llevados a cabo con el olmo de Siberia en España también concluyeron que el rendimiento mejora al alargar el turno; concretamente Sanz et al. (2011) obtuvieron una producción a los dos años de 1500 g por planta, que se multiplicó por cuatro durante el tercer periodo vegetativo en las parcelas que no habían sido cortadas, mientras que solamente se obtuvieron otros 1500 g por planta en las parcelas rebrotadas.

4.2.4.3.4 Comparación con otros estudios

Comparar la producción obtenida con la de otros trabajos resulta difícil, ya que en cada estudio la localización y, por tanto, la climatología y características de los suelos son muy diferentes. En Madrid, en plantaciones de tres años la producción fue de más de 13.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Sanz et al., 2011), es decir un rendimiento sensiblemente mayor al alcanzado en cualquiera de las parcelas objeto de estudio; si bien las temperaturas medias registradas en la capital de España suelen ser varios grados más altas que las de Soria. En Italia se consiguieron más de 10.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ durante los dos primeros periodos vegetativos en el Valle del Po (Pérez et al., 2012), donde se registran temperaturas y precipitaciones más elevadas que las alcanzadas en Soria, a lo que hay que añadir una mayor fertilidad de los suelos y una densidad de plantación superior a la empleada en el presente trabajo. En Teruel, en unas condiciones edafoclimáticas similares a las de Soria, la producción media durante tres años en secano y con una densidad de 3.333 pl ha⁻¹ fue de algo más de 5.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Fernández et al., 2009), mientras que en una zona montañosa fría y seca de la montaña granadina, como es Huescar, la producción anual tras dos periodos vegetativos con una densidad de unas 5.500 pl ha⁻¹ fue de en torno a 7.500 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Andivia et al., 2013), es decir unas producciones más próximas a las obtenidas en las parcelas aquí estudiadas.

Los primeros estudios realizados con el olmo de Siberia se llevaron a cabo en Estados Unidos, donde se pueden encontrar resultados bastante diversos. En el Este de Kansas, el olmo tras 7 años de cultivo produjo 9.800 kg ha⁻¹ año⁻¹ con una densidad de 7.000 pl ha⁻¹, mientras que la producción bajó hasta los 6.600 kg ha⁻¹ año⁻¹ cuando la densidad de plantación era de 3.200 pl ha⁻¹ (Geyer et al., 1987). Por otra parte, el estudio de Geyer (1993) mostró una fuerte variación de la producción en función de la localización concreta de la parcela, oscilando las producciones en distintos emplazamientos dentro del estado de Kansas entre los 700 kg ha⁻¹ año⁻¹ y los 5.200 kg ha⁻¹ año⁻¹; mientras que el estudio de Geyer (2006) concluyó, tras realizar 6 cortas anuales, que la producción variaba bastante de unos años a otros, con producciones entre los 4.500 kg ha⁻¹ y los 16.900 kg ha⁻¹, sin que se mostrase una tendencia clara ascendente o descendente con el paso del tiempo y señalando por tanto a la climatología como la causante de estas fuertes oscilaciones.

4.2.5. Eficiencia en el uso del agua (EUA)

Durante el primer año, las EUA en el CEDER fueron muy bajas en todas las condiciones de cultivo, alcanzando como máximo los 0,3 g l⁻¹ (**Figura 4.2.3.**). En los siguientes periodos vegetativos, la EUA creció de manera lineal en las parcelas de regadío, mientras que en las parcelas de secano solo se observó un aumento durante el segundo año, manteniéndose la eficiencia en torno a los mismos valores, o incluso disminuyendo, durante el tercer y el cuarto periodo vegetativo. Las parcelas con la dosis

de riego más baja fueron las que presentaron mayores EUA, llegando a alcanzar durante los dos últimos años valores por encima de 1 g l^{-1} y logrando como media del ciclo de cuatro años casi $0,8 \text{ g l}^{-1}$ (**Figura 4.2.4.**).

Figura 4.2.3. Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) en g l^{-1} en las parcelas de olmo de Siberia del CEDER a lo largo del primer ciclo de cuatro años. CS: Cubo de la Solana (CEDER), SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Figura 4.2.4. Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) media en g l^{-1} durante el primer ciclo de cuatro años y durante el primer año de rebrote en el CEDER y en Almazán. CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Las EUA obtenidas en el CEDER con el olmo fueron sensiblemente menores que las que registró esta especie en Italia, donde tras tan solo dos años de cultivo se alcanzó con la mayoría de las procedencias una eficiencia en torno a los $2,5 \text{ g l}^{-1}$. (Pérez et al., 2012). Sin embargo, las eficiencias en Almazán se acercaron a esta cifra, obteniéndose como media de los cuatro años de cultivo casi 2 g l^{-1} y logrando casi 4 g l^{-1} durante el cuarto periodo vegetativo. Estas mayores EUA se pueden atribuir a la mayor capacidad de retención de agua y a la cantidad de nutrientes que presenta el suelo de Almazán.

Tras el rebrote, la EUA en las parcelas de Almazán bajó significativamente, quedando por debajo de 1 g l^{-1} , si bien se mantuvo por encima de las eficiencias logradas en el CEDER. Esta menor eficiencia seguramente se deba a la proliferación de malas hierbas, las cuales dificultaron el rebrote de las parcelas de Almazán. En general, las EUA en las parcelas rebrotadas fueron menores que las observadas ese mismo año en las parcelas que no habían sido cortadas, sin embargo estas EUA fueron sensiblemente mayores que las obtenidas durante el primer año del primer ciclo.

Tras el primer ciclo de cuatro años, las parcelas de secano con densidad más baja fueron ligeramente más eficientes que las de densidad más alta, sucediendo lo contrario en el regadío. Durante los primeros periodos vegetativos y hasta la tangencia de copas, se suelen mostrar más eficientes las parcelas con densidad mayor, salvo en plantaciones con un elevado déficit hídrico, como en el caso de las parcelas de secano del CEDER.

El uso de lisímetros hubiese permitido una mayor precisión en el cálculo de las eficiencias, sobre todo en las parcelas del CEDER, ya que en suelos pedregosos y con textura arenosa se recomienda su uso para no introducir en el cálculo de las EUA los volúmenes de agua perdidos por percolación. Sin embargo, esta metodología es bastante costosa, por lo que no siempre puede utilizarse, considerándose el método aquí empleado una buena aproximación a la EUA.

4.2.6. Producción foliar

En las parcelas de regadío, el porcentaje que representaban las hojas respecto a la biomasa acumulada en ramas y tallos fue decreciendo a lo largo del ciclo, una circunstancia que ya observaron anteriormente Poorter y Nagel, (2000), quienes indicaban que el porcentaje que supone la biomasa foliar en los árboles iba disminuyendo a lo largo de los años, llegando a representar en las plantas más longevas solamente entre el 1% y el 4%. Sin embargo, en las parcelas de secano este porcentaje creció con el paso de los años; mientras que en 2011 los porcentajes eran inferiores a los observados en el regadío, en 2013 sucedía todo lo contrario. Según diversos autores, cuando hay pocos recursos hídricos las plantas dedican su esfuerzo, en primer lugar, a desarrollar las raíces en vez de las hojas o el tallo (Bédéneau y Auclair, 1989), lo cual explicaría el menor crecimiento registrado en las parcelas de secano durante el año 2011; mientras que la mayor producción de hojas en los siguientes periodos vegetativos

se debería a la amplitud de la que disponían estas plantas gracias a su, todavía, reducido tamaño. La tesis doctoral de Ciria (1998) determinó que con mayores espaciamientos la cantidad de ramas aumenta, lo que posiblemente venga asociado también a un mayor follaje. En el presente trabajo la densidad más baja presentó siempre un porcentaje de hojas algo más elevado que la densidad más alta, lo cual viene a confirmar la teoría anterior.

4.2.6.1. Índice de área foliar (LAI)

Los gráficos de evolución del LAI a lo largo del periodo vegetativo muestran la estrecha relación existente entre este índice y los registros meteorológicos. Durante la primavera de 2013, se registraron unas temperaturas más bajas de lo habitual, permaneciendo el LAI estancado durante varias semanas (**Figura 3.2.13**). En el estudio llevado a cabo con chopos, se ha señalado la importancia que pueden tener las plagas y las enfermedades en la reducción del LAI, sin embargo en el caso del olmo no se observó ningún daño durante los cuatro años que duró el estudio, lo cual será muy positivo a la hora de obtener unas mejores producciones. El estrés hídrico sufrido por los olmos en algunas de las condiciones de cultivo tampoco causó una disminución del LAI; las parcelas de secano o con una dosis de riego más baja desarrollaron desde un principio un menor follaje, el cual pudieron mantener posteriormente.

En la **Figura 4.2.5**, se muestran los valores medios de LAI registrados a lo largo de los veranos de 2012 y 2013, observándose que las parcelas de secano del CEDER registraron los valores de LAI más bajos en ambos años, sin que se observasen diferencias significativas entre ambas densidades (**Tabla 4.2-V**). En las parcelas de regadío, sin embargo, si se encontraron diferencias significativas entre las dos densidades, alcanzándose los valores más altos en las parcelas establecidas con densidad mayor. En el trabajo de Bullard et al. (2002b), llevado a cabo con sauces, se llegó a esta misma conclusión, si bien se indica que según avance el ciclo el LAI de plantaciones con diferentes espaciamientos tenderá a igualarse, pero que, al igual que sucede con la producción, este índice crece en inicio más rápidamente en las parcelas más densas.

Los olmos de Almazán, a pesar de desarrollarse en condiciones de secano y con la densidad más baja, presentaron el LAI más alto, superando los $7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ y poniendo de manifiesto una vez más que el suelo es un factor fundamental para el correcto desarrollo de las plantaciones. Estos valores se acercaron a los valores de LAI máximos para frondosas, que algunos autores fijan entre los 8 y los $10 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Perri, 1994). Los valores más altos en el CEDER en regadío se quedaron por debajo de $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, mientras que en secano tan solo sobrepasaron ligeramente los $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

Figura 4.2.5. Valor medio del índice de área foliar (LAI) durante los años 2012 y 2013 (plantas R3T3 y R4T4), considerados solamente los registros de LAI a partir del 15 de junio. Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Duncan ($P \leq 0.05$). CS: Cubo de la Solana (CEDER), ALM: Almazán, SA: Secano densidad alta, SB: Secano densidad baja, R1: Regadío dosis más baja, R2: Regadío dosis más alta, A: Densidad alta, B: Densidad baja.

Tabla 4.2-V: Análisis de varianza (ANOVA) para el índice de área foliar (LAI) durante los años 2012 y 2013 (considerados solamente los registros a partir del 15 de junio). DF: Grados de libertad. *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

		Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Sig.
LAI 2012 (m ² m ⁻²)	Entre Grupos	134,2	4	33,6	58,9	0.0 *
	Intra grupos	48,4	85	0,6		
	Total	182,6	89			
LAI 2013 (m ² m ⁻²)	Entre Grupos	376,2	5	75,2	36,7	0.0 *
	Intra grupos	282,8	138	2,0		
	Total	659,0	143			

El riego generó aumentos en el LAI, encontrándose diferencias significativas entre secano y regadío. Sin embargo, los índices en las dos dosis de riego fueron muy similares, siendo incluso ligeramente más altos los LAI de las parcelas que recibían la dosis más baja. Como ya se ha indicado en el apartado de producciones, esta ausencia de diferencias significativas entre las dos dosis se debe posiblemente a la baja capacidad de retención de agua, así como a la baja fertilidad del suelo del CEDER.

Los LAI fueron más altos en 2013 que en 2012 en todas las condiciones de cultivo, registrándose este segundo año unos valores en torno a un punto mayores. Estudios anteriores, como el de Al Afas et al. (2005), también informaron de un aumento del LAI con la edad, señalando que durante el segundo ciclo de cultivo este índice era mayor el segundo año que el primero en la mayoría de los 12 clones de chopo estudiados. Este trabajo también indica que la correlación entre el diámetro de las plantas y el LAI es alta.

En las plantaciones de olmo de Siberia se observó una alta correlación entre el valor medio del LAI durante el periodo estival y la producción anual obtenida, alcanzando mediante un modelo de regresión lineal una variabilidad explicada de casi el 89% (**Figura 4.2.6.**). Esta fuerte relación se debe a que la hoja es la superficie de intercambio entra la planta y la atmósfera, siendo por tanto determinante en la cantidad de luz interceptada y en el intercambio de gases, factores fundamentales en el desarrollo de la planta. Son numerosas las publicaciones que han mostrado la relación existente entre el área foliar y la producción de biomasa, como el trabajo de Pellis et al. (2004), donde se informa de una correlación superior al 91% en chopos en alta densidad, o el de Hernández et al. (2009), que presenta correlaciones igualmente altas. En este último trabajo se indica, además, que al realizar las mediciones de LAI se debe tener cuidado con la época y estado en el que se encuentran los cultivos, ya que en algunas de las parcelas la correlación fue inexistente, al realizar las mediciones en parcelas afectadas por la roya, en las que ya había empezado la defoliación.

Figura 4.2.6. Relación entre los valores medios de LAI ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) y la Producción de biomasa anual (kg MS ha^{-1}) en el tercer y el cuarto periodo vegetativo (plantas R3T3 y R4T4), considerados solamente los registros de LAI a partir del 15 de junio.

4.2.7. Estrés hídrico

Las parcelas de olmo de Siberia que recibían la dosis de riego más alta presentaron durante los dos años de estudio un Ψ_f a media mañana de entre -0,5 y -1 MPa, lo cual indica, según Selles et al. (2002), que las plantaciones no estaban estresadas y que disponían de la cantidad de agua necesaria. Durante el cuarto periodo vegetativo, los Ψ_{xm} a mediodía también oscilaron en este mismo rango de valores, lo cual confirma el buen estado hídrico en el que se encontraban las plantaciones, mientras que el Ψ_f a mediodía mostró valores sensiblemente más negativos, algo habitual, incluso en plantaciones suficientemente regadas, ya que en este caso la demanda evaporativa de la planta es máxima (Selles et al., 2002).

En el caso de las parcelas de secano, los potenciales indicaron que las plantas estaban sufriendo un acusado estrés hídrico durante buena parte del periodo vegetativo, ya que los valores registrados en cualquiera de los potenciales estuvieron por debajo de -1,5 MPa en muchas ocasiones. La obtención de valores tan negativos es habitual en especies cultivadas en climas mediterráneos (Kitsaki y Drossopoulos, 2005), presentando cada especie un potencial a partir del cual el crecimiento se detiene. Shackel et al. (1997) indicaron que a partir de un Ψ_{xm} de entre -1,5 y -1,7 MPa no existía crecimiento en los cerezos, mientras que en el caso de las vides, Baeza et al. (2007) informaron de que con Ψ_f a media mañana o a mediodía por debajo de unos -1,2 MPa había también crecimiento cero. Para estimar a partir de que potenciales el crecimiento en el olmo de Siberia se detendría, se realizó una regresión entre los Ψ_f a media mañana obtenidos durante los años 2012 y 2013 y los crecimientos mensuales que se producían en AB. Según puede observarse en el gráfico obtenido (**Figura 4.2.7.**), con potenciales por debajo de -2 MPa el crecimiento sería prácticamente nulo en esta especie; si bien hay que tener en cuenta que el modelo que mejor se ajustó (regresión exponencial), presentó solamente un coeficiente R^2 del 47%. Con vides, las relaciones entre producción y crecimiento encontradas por Baeza et al. (2007) fueron mejores que las mostradas en el presente trabajo, logrando una variabilidad explicada del 59% en el caso del Ψ_f al amanecer y un valor de R^2 del 68% si la relación se realizaba entre el crecimiento de los brotes y el Ψ_f a media mañana o a mediodía.

El estrés hídrico que sufrían las parcelas de secano iba aumentando según avanzaba el verano, circunstancia también observada en otros trabajos llevados a cabo con vides (Barajas et al., 2008) o con Nogales (Ferreira et al., 2001), mientras que se indicó que los potenciales hídricos dependían del estado fenológico de las plantas en el caso del maíz (Xu et al., 2010).

Figura 4.2.7. Relación entre el potencial hídrico foliar a media mañana (MPa) y el incremento en área basal mensual (mm² pl⁻¹ día⁻¹) durante el tercer y el cuarto periodo vegetativo (plantas R3T3 y T4T4).

Los resultados muestran unas altas correlaciones entre los dos tres tipos de potencial estudiados, obteniéndose en todos los casos valores entre 0-8 y 0,9. (Tabla 4.2-VI). Otros autores también señalaron fuertes correlaciones entre los distintos potenciales hídricos, por ejemplo Williams y Araujo (2002) indicaron que las correlaciones en vides entre el potencial al amanecer y los Ψ_f y Ψ_{xm} a mediodía eran de 0,85 y 0,88 respectivamente, mientras que entre el Ψ_f y el Ψ_{xm} a mediodía la correlación fue todavía mayor, alcanzando el 0,92.

Tabla 4.2-VI: Coeficiente de correlación de Pearson entre el Ψ_f a media mañana, el Ψ_f a mediodía y el Ψ_{xm} a mediodía durante el cuarto periodo vegetativo (plantas R4T4)

	Ψ_f Media mañana	Ψ_f Mediodía	Ψ_{xm} Mediodía
Ψ_f Media mañana	1	0,797*	0,875*
Ψ_f Mediodía	—	1	0,909*
Ψ_{xm} Mediodía	—	—	1

* P < 0,05. n = 32

5. CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el ensayo llevado a cabo con diferentes clones de chopo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Los clones procedentes del mismo cruzamiento presentan rendimientos muy diferentes, siendo también dispares las producciones alcanzadas por un mismo clon en los dos primeros ciclos de cultivo. El clon AF-2 es el más productivo durante el primer ciclo de tres años, alcanzando un rendimiento de casi 14.000 kg ha⁻¹ año⁻¹, sin embargo tras la primera corta su producción baja de forma considerable a causa principalmente de la mala capacidad de rebrote. Durante el segundo ciclo, I-214 pasa a ser el clon más productivo (14.000 kg ha⁻¹ año⁻¹). La producción aumenta al incrementar la dosis de riego, pero a partir de un volumen de agua (aproximadamente 7000 m³ ha⁻¹ año⁻¹) los rendimientos se mantienen constantes.
2. Los valores del índice de área foliar (LAI) aumentan con la edad de la plantación, alcanzando como máximo unos 4 m² m⁻² en las parcelas más regadas. Estos índices son muy similares en la mayor parte de las dosis de riego aplicadas, observándose únicamente en la dosis más baja unos valores del LAI significativamente menores (2-3 m² m⁻²). El porcentaje que representa la producción de biomasa foliar respecto a la biomasa leñosa existente en la planta es mayor en las dosis de riego más bajas. Los valores del LAI pueden descender de manera considerable a causa de plagas y enfermedades.
3. Las parcelas que reciben las dosis de riego más altas (por encima de unos 7000 m³ ha⁻¹ año⁻¹) no sufren estrés hídrico o es muy pequeño, las que reciben dosis intermedias solo sufren estrés moderado ocasionalmente, mientras que aquellas que reciben una menor cantidad de agua (en torno a 1000 m³ ha⁻¹ año⁻¹) sufren un estrés continuado, que llega a ser severo en determinadas fechas. El chopo no alcanza potenciales hídricos excesivamente bajos, lo que parece deberse al cierre de estomas, ya que estos valores vienen acompañados de una fuerte reducción en el rendimiento. El coeficiente de correlación entre los potenciales hídricos y la humedad edáfica supera tan solo ligeramente el 30%. Las correlaciones entre el Ψ_f a media mañana, el Ψ_f a mediodía y el Ψ_{xm} a mediodía están entre 0,4 - 0,7.

De los resultados obtenidos en el ensayo realizado con el olmo de Siberia se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El área basimétrica y la altura son variables eficaces para predecir la producción de biomasa, obteniéndose ecuaciones con una variabilidad explicada superior al 80%.

2. El tipo de suelo es más importante que el riego o la densidad de plantación para incrementar la producción. El aporte de agua de riego llega casi a triplicar el rendimiento ($6.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), pero entre las dos dosis estudiadas la diferencia productiva es pequeña, por lo que se considera que la calidad del suelo y su capacidad de retención de agua están actuando como factores limitantes. En secano no se observan diferencias significativas entre los rendimientos de las dos densidades, (3333 pl ha^{-1} y 6666 ha^{-1}), mientras que en regadío la producción es un 50% mayor en las parcelas más densas. Para optimizar el rendimiento del olmo en las condiciones de cultivo estudiadas es recomendable un turno de al menos 4 años.
3. En regadío, el porcentaje que representan las hojas respecto a la biomasa acumulada en ramas y tallos disminuye a lo largo del ciclo, sin embargo en condiciones de secano este porcentaje aumenta.
4. Existe una alta correlación entre el valor medio del LAI durante el periodo estival y la producción anual obtenida, alcanzando mediante un modelo de regresión lineal una variabilidad explicada de casi el 89%. El índice de área foliar (LAI) aumenta significativamente con la calidad del suelo, hasta alcanzar más de $7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ en condiciones de secano. En suelos de peor calidad, incluso en regadío, el índice queda ligeramente por debajo de los $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Se observan diferencias significativas entre el secano y el regadío, registrándose LAI en secano de tan solo $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$; sin embargo, los índices en las dos dosis de riego estudiadas son muy similares. Las parcelas con mayor densidad presentan LAI más altos en regadío, pero no se observaron diferencias significativas entre las dos densidades en secano.
5. Los olmos de regadío apenas sufren estrés hídrico, mientras que los de secano padecen un acusado estrés durante buena parte del periodo vegetativo, especialmente en la parte final del mismo. El modelo de regresión que relaciona el estrés hídrico con el crecimiento en área basimétrica, logra un R^2 del 47%. Las correlaciones entre el Ψ_f a media mañana, el Ψ_f a mediodía y el Ψ_{xm} a mediodía son altas, alcanzando valores por encima de 0,8.

En general, se puede concluir que el cultivo del olmo de Siberia en corta rotación y alta densidad puede ser una buena alternativa para la obtención de biomasa, incluso en suelos de secano de baja calidad agrícola por los beneficios medioambientales que podría conllevar. Con el chopo, queda manifiesta la importancia de la elección del clon y del ajuste de la cantidad de agua de riego en la obtención de unos buenos rendimientos.

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Dado el interés que presenta la producción de chopo y de olmo de Siberia como cultivos energéticos, en un futuro se deberán seguir realizando estudios con estas especies, mejorando la información disponible con datos de un mayor número de años y de más localizaciones. Será muy importante realizar mejoras en el material vegetal, consiguiendo de esta forma una mayor adaptabilidad a las distintas condiciones edafoclimáticas, mayor resistencia a plagas y enfermedades, mayor calidad de la biomasa y mayor homogeneidad y rendimiento de las plantaciones.

Será fundamental llevar a cabo evaluaciones económicas, energéticas y medioambientales, especialmente en el caso del olmo de Siberia, donde estos estudios son todavía muy escasos. Al tratarse de especies leñosas de hoja caduca se deberá estudiar el secuestro y flujo de carbono, evaluando la fijación en el suelo de este elemento a través de la descomposición de la hojarasca.

Otra línea de investigación todavía por explorar es el aporte de purines, aguas residuales o cenizas resultantes de la combustión de la biomasa como fertilizantes, utilizando de esta manera insumos de bajo coste a la vez que se busca una solución a la eliminación de estos residuos con gran repercusión medioambiental.

Asimismo, será interesante profundizar en las labores de mantenimiento de las plantaciones, mejorando sobre todo los métodos de control de la flora arvense (mecánicos o químicos), y desarrollar nueva maquinaria para el establecimiento del cultivo y la recolección de la biomasa, produciendo a un coste cada vez más competitivo.

7. PUBLICACIONES FRUTO DE LA INVESTIGACIÓN

PUBLICACIONES FRUTO DE LA INVESTIGACIÓN

Los trabajos de investigación llevados a cabo para la realización de la presente tesis doctoral han dado también como fruto las siguientes publicaciones científicas:

■ **Artículos en revistas científicas:**

- Ignacio Pérez, Javier Pérez, Juan Carrasco, Pilar Ciria. **Siberian elm responses to different culture conditions under short rotation forestry in Mediterranean areas.** Turkish Journal of Agriculture and Forestry 38: 652-662. Índice impacto revista: 0.929 (Cuartil 2).

■ **Artículos en proceeding de congresos:**

- Ignacio Pérez, Pilar Ciria, Sara Bergante, Javier Pérez, Juan E. Carrasco, Laura Rosso, Gianni Facciotto (2012). **Biomass production of Siberian elm at the end of the second vegetative period in Spain and Italy.** 20th European Biomass Conference & Exhibition - Setting the course for a biobased economy. Pags: 402 - 408. Milan (Italia). ISBN: 978-88-89407-54-7.
- Ignacio Pérez, Javier Pérez. Juan E. Carrasco y Pilar Ciria (2011). **Ulmus pumila under irrigate and rain-fed continental conditions in the first year of growth.** 19th European Biomass Conference & Exhibition from research to industry and markets. Págs: 765-769. Berlín (Alemania). ISBN: 978-88-89407-55-7.

8. BIBLIOGRAFÍA

A

- AEMA (Agencia Europea del Medio Ambiente). (2008) ¿Cuánta bioenergía puede producir Europa sin dañar el medio ambiente? Centro de publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, 68 pp. ISBN: 978-84-8320-437-5.
- AEMA (Agencia Europea del Medio Ambiente). (2010). Estimación del potencial de bioenergía de la agricultura compatible con el medio ambiente. Centro de publicaciones Secretaría general Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 134 pp. ISBN: 978-84-491-1018-4.
- AFOCEL (Association Forêt-Cellulose) (1982). Culture de la biomasse ligneuse: Taillis a courte rotation. Paris, AFOCEL, 212 pp.
- Agencia de evaluación y calidad (2011). Evaluación del plan Español de Energías renovables 2005-2010. Ministerio de Política Territorial y Administración Pública. 249 pp. Disponible en: <http://www.aeval.es/comun/pdf/evaluaciones/E24-PER.pdf>
- AIE (Agencia Internacional de la Energía). (2006). *World Energy Outlook*. París, 596 pp. ISBN: 92-64-10989-7.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía). (2012). *World Energy Outlook 2012*. Paris, 690 pp. ISBN: 9789264181342.
- Al Afas, N., Pellis, A., Niinemets, U., Ceulemans, R. (2005). Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar. II. Clonal and year-to-year differences in leaf and petiole characteristics and stand leaf area index. *Biomass and Bioenergy* 28: 536-547.
- Al Afas, N., Marron, N., Van Dongen, S., Laureysens, I., Ceulemans, R. (2008). Dynamics of biomass production in a poplar coppice culture over three rotations (11 years). *Forest Ecology and Management* 255: 1883-1891.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements. Roma (Italia), FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- Allué, J.L. (1966). Subregiones fitoclimáticas de España. Madrid, Ministerio de Agricultura. Dirección General de Montes, Caza y Pesca fluvial. I.F.I.E. Madrid.
- Andivia, E., Fernández, M., Alaejos, J., Tapias, R. (2013) Producción de biomasa de especies leñosas con fines energéticos: resultados tras 18 meses de cultivo en parcelas de condiciones edafoclimáticas contrastadas. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria.

- Argent, R.M., Geyer, W.A., Walawender, W.P. (1985). Siberian elm: from windbreaks to wood energy. En: Proceedings of the 17th Annual Meeting of the Kansas Academy of Science. Pittsburg (US). pp: 1–3.
- Armstrong, A., Johns, C., Tubby, I. (1999). Effect of spacing and cutting cycle on the grown as an energy crop. *Biomass and Bioenergy* 17: 305-314.
- Ashby, W., Bresnan, D., Kjelgren, R., Roth, P., Preece, J., Huetteman, C. (1993). Coppice growth and water relations of silver maple. *Biomass and Bioenergy* 5: 317-323.

B

- Bacher, W. (1998). Poplar. En: Energy plant species. Their use and impact on environment and development. Londres, James & James Science Publishers, pp: 203-206. ISBN: 978-1-873936-75-7.
- Baeza, P., Sanchez, P., Centeno, A., Junquera, P., Linares, R., Lissarrague, J.R. (2007). Water relations between leaf water potential, photosynthesis and agronomic vine response as a tool for establishing thresholds in irrigation scheduling. *Scientia Horticulturae* 114: 151-158.
- Barajas, E., De La Iglesia, E., San Miguel M.A., Yuste J. (2008). Potencial hídrico a mediodía y desarrollo foliar en la Variedad tempranillo: respuesta a la variación de la Distancia entre cepas en cuatro situaciones climáticas edáficas diferentes en el valle del Duero. *Revista Enología* 6: 1-9.
- Baraza, C. (2013). Cultivos demostrativos de chopo (*Populus spp.*) a altas densidades con fines energéticos realizados en Aragón. Primeros datos y resultados. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria, 10-14 de junio.
- Barbour J.R. y Brinkman K.A. (2002). *Ulmus L.* En: Woody Plant Seed Manual. USDA. Disponible en : <http://www.nsl.fs.fed.us/T&U%20genera.pdf>
- Barigah, T.S., Saugier, B., Mousseau, M., Guittet, J., Ceulemans, R. (1994). Photosynthesis, leaf area and productivity of five poplar clones during their establishment year. *Annals of Forest Science* 5: 613-621.
- Barrett, J.E., Nell, T.A. (1986). Water relations and water potential measurements for vegetative poinsettia. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 111: 773-776.
- Bédéneau, M., Auclair, D. (1989). Effect of coppicing on hybrid poplar fine root dynamics. *Annals of Forest Science* 46: 294-296.
- Bergante, S. (2010). Indagini sulle Short Rotation Crops con pioppo, salice e robinia. Tesis doctoral. Facoltà di Agraria, Università degli studi di Torino. Italia. 132 pp.

- Bergkvist, P., Ledin, S. (1998). Stem biomass yields at different planting designs and spacings in willow coppice systems. *Biomass and Bioenergy* 14: 149–56.
- Bewa, H., Gavaland, A. (1999). The INRA Short Rotation Coppice programme. Biobase B10239.
- Bowersox, T.W., Stover, L.R., Blankenhorn, P.R., Strauss, C.H., Lord, B.E. (1991). Height and diameter growth of dense *Populus* plantations in response to fertilization and irrigation. *Biomass and Bioenergy* 1: 111-117
- Buhler, D., Neter, D., Riemenschneider, E., Hartler, R. (1998). Weed management in short rotation poplar and herbaceous perennial crops grown for biofuel production. *Biomass and Bioenergy* 14: 385-394.
- Bullard, M.J., Mustill, S.J., McMillan, S.D., Nixon, P.M.I., Carver, P., Britt, C.P. (2002a). Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp.1.Yield response in two morphologically diverse varieties. *Biomass and Bioenergy* 22: 15-25.
- Bullard, M.J., Mustill, S.J., Carver, P., Nixon, P.M.I. (2002b) Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp.—2. Resource capture and use in two morphologically diverse varieties. *Biomass and Bioenergy* 22: 27–39
- Bungart, R., Hüttl, R.F. (2002). Biomass production water budget and nutrition of fast growing tree species on a mine spoil in the Lusatian mining region. 12th European Conference on Biomass for energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam (Holanda). pp: 170-172.
- Bunn, S.M., Rae, A.M., Herbert, C.S., Taylor, G. (2004). Leaf-level productivity traits in *Populus* grown in short rotation coppice for biomass energy. *Forestry*, Vol. 77, N° 4: 307-323.
- Busso, C.A. (2008). Uso de la cámara de presión y los psicrómetros a termocupla en la determinación de las relaciones hídricas en tejidos vegetales. *Phyton* 77: 327-350.

C

- Canellas, I., Huelin, P., Hernandez, M.J., Ciria, P., Calvo, R., Gea-Izquierdo, G., Sixto, H. (2012). The effect of density on short rotation *Populus* sp. plantations in the Mediterranean area. *Biomass and Bioenergy* 46: 645-652.
- Carrasco, J. (2011) La biomasa como recurso energético. *Vida Rural* 323: 68-73.
- Ceulemans, R., Pontailier, J.Y., Mau, F., Guittet, J. (1993) Leaf allometry in young poplar stands: Reliability of leaf area index estimation, site and clone effects. *Biomass and Bioenergy* 4: 315–321.

- Ceulemans, R., McDonald, A.J.S., Pereira, J.S. (1996). A comparison among eucalypt, poplar and willow characteristics with particular reference to a coppice, growth-modelling approach. *Biomass and Bioenergy* 11: 215–231.
- Ceulemans, R., Deraedt, W. (1999). Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture. *Forest Ecology and Management* 121: 9–23.
- Chason, J.W., Baldocchi, D.D., Huston M.A. (1991). A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology* 57: 107–128.
- Chen, H., Wang, P., Li, J., Zhang, J., Zhong, L. (2012). Canopy Spectral Reflectance Feature and Leaf Water Potential of Sugarcane Inversion. *Physics Procedia* 25: 595 – 600.
- Chone, X., Van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., Gaudillere, J.P. (2001). Stem water potential is a sensitive indicator for grapevine water status. *Annals of Botany* 87: 477- 483.
- Christersson, L. (2006). Biomass production of intensively grown poplars in the southernmost part of Sweden: Observations of characters, traits and growth potential. *Biomass and Bioenergy* 30: 497-508
- Ciria, M.P., González, E., Mazón, P., Carrasco, J.E. (1996). Influence of the rotation age and plant density on the composition and quality of poplar biomass. *Biomass for energy and the environment. 9th European Bioenergy Conference & 1st European Energy from biomass technology exhibition. Copenhagen (Dinamarca). pp: 968-973.*
- Ciria, M.P. (1998). Efecto del turno de corta y de la densidad de plantación sobre la productividad de diversos clones de chopo en condiciones de corta rotación. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 245 pp.
- Ciria, M.P., González, E., Carrasco J.E. (2002). The effect of fertilization and planting density on biomass productivity of poplar harvested after three-years rotation. *12th European Conference and technology exhibition on biomass for energy, industry and climate protection. Amsterdam (Holanda). pp: 283-286.*
- Ciria, M.P., Mazón, M.P., Carrasco, J.E. (2004). Poplar productivity on short rotation during three consecutive cycles in extreme continental climate. *Second World Biomass Conference. Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Florencia (Italia). pp: 370-373.*
- Ciria, P., Perez, J., Solano, M.P., Carrasco, J.E. (2007). Poplar biomass production estimation on short rotation conditions as a function of the tree physical parameters. *15th European Biomass Conference & Exhibition – From Research to*

- Market Deployment - Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Berlin (Alemania). pp: 628–632.
- Ciria, M.P. (2009). "El chopo (*Populus* spp) como cultivo energético". Madrid, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Hoja Divulgadora nº 2131. 32 pp. ISBN: 978-84-491-0894-5.
- Cogolludo-Agustin, M.A., Agundez, D., Gil, L. (2000). Identification of native and hybrid elms in Spain using isozyme gene markers. *Heredity* 85: 157-166
- Cohen, M. (1994). Funcionamiento hídrico y producción frutal del nogal en zonas semiáridas: aplicación al manejo del riego. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. 298 pp.
- Coleman, M., Tolsted, D., Nichols, T., Johnson, W.D., Wene, E.G., Houghtaling T. (2006). Post-establishment fertilization of Minnesota hybrid poplar plantations. *Biomass and Bioenergy* 30: 740-749.
- COM (Comisión de las Comunidades Europeas). (2005). Plan de acción sobre la biomasa. Bruselas (Bélgica), Comunicado SEC (2005) 1573, 46 pp.
- Comisión Europea (2012). Informe de la comisión al parlamento europeo y al consejo sobre los progresos realizados en la consecución de los objetivos de Kioto. 22 pp.
- Confalonieri, M., Belenghi, B., Balestrazzi, A., Negri, S., Facciotto, G., Schenone, G., Delledonne, M. (2000). Transformation of elite white poplar (*Populus alba* L.) cv. 'Villafranca' and evaluation of herbicide resistance. *Plant Cell Report* 19: 978-982.
- Corcuera, L., Maestro, C., Notivol, E. (2005). La ecofisiología como herramienta para la selección de clones más adaptados y productivos en el marco de una silvicultura clonal con chopos. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales* 14: 394-407.
- Coyle, D.R., Coleman, M.D. (2005). Forest production responses to irrigation and fertilization are not explained by shifts in allocation. *Forest Ecology and Management* 208: 137–152.
- Cutini, G. Matteucci, G., Mugnozza, G.S. (1998) Estimation of leaf area index with the Li-cor LAI 2000 in deciduous forests. *Forest Ecology and Management* 105: 55 - 65.

D

- DeBell, D.S., Clendenen, G.W., Harrington, C.A., Zasada, J.C. (1996). Tree growth and stand development in short-rotation *Populus* plantings: 7-year results for two clones at three spacings. *Biomass and Bioenergy* 11: 253-269.
- Debell, D.S., Harrington, C.A., Clendenen, G.W., Zasada, J.C. (1997) Tree growth and stand development of four *Populus* clones in large monoclonal plots. *New Forests* 14: 1-18.
- DeBell, D.S., Harrington, C.A. (2002). Density and rectangularity of planting influence 20-year growth and development of red alder. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1244–1253.
- Dickmann, D.I. (1979). Physiological determinants of poplar growth under intensive culture. En: Fayle, D.C.F., Zsuffa, L., Anderson, H.W. *Management and utilization in Canada. Forest Research Information* 102. Brockville (Ontario), Ministry of Natural Resources. pp: 12.
- Domac, J. (2002) Bioenergía y generación de empleo. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, Unasylva 211: 18-19.
- Domínguez A., 1997. Plantaciones Forestales. En: *Tratado de Fertilización*. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa. pp. 518-522. ISBN: 84-7114-622-3.
- Dufrêne, E., Bréda, N. (1995). Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods. *Oecologia* 104: 156–162.

E

- Eriksson, H., Eklundh, L., Hall, K., Lindroth, A. (2005). Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 129: 27–37.

F

- Facciotto, G., Schenone, G. (1998). Il Pioppo fonte di energia rinnovabile. *Sherwood Foreste ed Alberi Oggi* 35: 19–26.
- Facciotto, G., Bergante, S., Lioia, C., Rosso, L., Mughini, G., Zenone, T., Nervo, G. (2006). Produttività di cloni di pioppo e salice in piantagioni a turno breve. Sezione Speciale - Atti V Congresso SISEF: Foreste e Società Cambiamenti, Conflitti, Sinergie. 20 pp.

- FAO–ISRIC. (1990). Guidelines for soil description. 3rd Edition. FAO, Roma.
- FAO (2004). Socio-economic analysis and policy implications of the roles of agriculture in developing countries. Research Programme Summary Report 2004. Roles of Agriculture Project. Roma. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/es/esa/roa/pdf/summary.pdf>
- FAO (2008). El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación. Biocombustibles: Perspectivas, Riesgos y Oportunidades. Roma (Italia), FAO, Subdivisión de Políticas y Apoyo en Materia de Publicación Electrónica. 146 pp. ISBN: 978-92-5-305980-5.
- Fernández, J., Díaz, R., Cogolludo, M.A., Pereira, S. (2000). Conservación de los recursos genéticos de las frondosas nobles en España. Investigación agraria: sistemas y recursos Forestales. Fuera de Serie 2: 71-91.
- Fernández, J. (2004). Energía de la biomasa. En: Martínez-Val, J.M. La energía en sus claves. Madrid, Fundación Iberdrola, pp. 397-445. ISBN: 978-84-609-1337-5.
- Fernandez, J., Iriarte, L., Sanz, M., Curt, M.D. (2009). Preliminary study of Siberian elm (*Ulmus Pumila* L.) as an energy crop in a continental-Mediterranean Climate. 17th European Biomass Conference & Exhibition – From Research to Industry and Markets. Hamburgo (Alemania). pp: 148–153.
- Fernández, M.J., Barro, R., Ciria, P., Losada, J., Pérez, J., Carrasco, J.E. (2010). Quality of the Biomass Produced in a Poplar Energy Crop as a Function of Type of Clone, Fertilization and Harvest Alternative. 18th European Biomass Conference & Exhibition From Research to Industry and Markets. Lyon (Francia). pp: 244-248.
- Ferreira, E.R., Sellés, V.G., Sellés, M.I. (2001) Riego deficitario controlado en nogales: estrategias de riego para enfrentar situaciones de escasez de agua en frutales. Boletín INIA 58. 36 pp.
- Ferreira, R.E., Selles, V.G., Maldonado, P.B., Celedón, J.A., Gil, P.M. (2007). Efecto del clima, de las características de la hoja y de la metodología de medición en el potencial hídrico xilemático en palto (*Persea americana* Mill.). Agricultura Técnica (Chile) 67: 182-188.
- Fischer, G. (2008). *Implications for land use change*. Reunión de expertos sobre perspectivas mundiales de la seguridad alimentaria y de los combustibles. Roma, FAO, 46 pp. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/foodclimate/presentations/EM56/Fischer3.pdf

G

- Garau, A., Berrondo, G., Filippini de Delfino S. (2000). Influencia de factores climáticos en las fechas de inicio de floración y brotación de clones de álamo en el Delta del Paraná, Argentina. Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales, Vol. 9, Nº 1: 169-178.
- Garavilla, V. (2004). Manual de cultivo de choperas en La Rioja. Logroño, Gobierno de La Rioja. 52 pp.
- García, A., Cun, R., Montero, Montero, L. (2010). Efecto de la hora del día en el potencial hídrico foliar del sorgo y su relación con la humedad en el suelo. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 19, No. 3: 7-11.
- García-Baudin, J.M., Montero, G. (1996). Control de malas hierbas en la reforestación de tierras agrícolas. Vida Rural 35: 54-56.
- Garnier, E., Berger, A. (1985). Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 60: 47-56.
- Geyer, W.A., Melichar, M.W. (1986). Short-rotation forestry research in the United States. Biomass 9: 123-133.
- Geyer, W.A., Argent, R.M., Walawender, W.P. (1987). Biomass properties and gasification behavior of 7 year-old Siberian elm. Wood and Fiber Science 19: 176-182.
- Geyer, W.A. (1991). Coppice response to cut stump height of tree hardwood tree species. Proceedings of Conference on Biomass for Energy, Industry and environment. Ed.: G. Grassi, A. Colina y H. Zibetta. Atenas (Grecia). pp: 207-211.
- Geyer, W.A. (1993). Influence of environmental factors on woody biomass productivity in the Central Great Plains, U.S.A. Biomass and Bioenergy 4: 333-337.
- Geyer, W.A., Walawender, W.P. (1994). Biomass properties and gasification behavior of young black locust. Wood and Fiber Science 26: 354-359.
- Geyer, W.A. (2006). Biomass production in the Central Great Plains USA under various coppice regimes. Biomass and Bioenergy 30: 778-783.
- Geyer, W.A., Iriarte, L., Cunningham, R. (2007). *Ulmus pumila* L. seed source performance in Kansas. Arid Ecosystems 13: 73-79.
- Girona, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbones, A., Bartra, E., Marsal, J. (2006). The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. Irrigation Science 24: 115-127.

- Godino, M. (2005). Análisis de los cultivos de *Populus x euroamericana*, clon I-214, a turnos muy cortos con fines energéticos. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. 154 pp.
- González- Antoñanzas, F. (1983). Aumento de la producción en las choperas. Resultados de doce años de un estudio comparativo de técnicas selvícolas. Madrid, Comunicaciones INIA. Serie: Recursos Naturales 17, 38 pp.
- Grünewald, H., Eberts, J., Grundmann, P., Schneider, B.U., Hüttl, R. (2007). Economic Evaluation of the Production of Woody Biomass in Short Rotation Plantations and Agroforestry Systems. 15th European Biomass Conference and Exhibition, from research to market deployment. Berlín. pp: 46-53.
- Guidi, W., Piccioni, E., Bonari, E. (2008). Evapotranspiration and crop coefficient of poplar and willow short-rotation coppice used as vegetation filter. *Bioresource Technology* 99: 4832–4840.
- Gullner, G., Komives, T., Rennenberg, H. (2001). Enhanced tolerance of transgenic poplar plants overexpressing-glutamylcysteine synthetase towards chloroacetanilide herbicides. *Journal of Experimental Botany* 52: 971-979.
- Guo, X.Y., Zhang, X.S. (2010) Performance of 14 hybrid poplar clones grown in Beijing, China. *Biomass and Bioenergy* 34: 906–911.

H

- Hansen, E.A. (1988). Irrigating short rotation intensive culture hybrid poplars. *Biomass* 16: 237-250.
- Hellkvist, J., Richards, G.P., Jarvis, P.G. (1974). Vertical gradients of water potential and tissue water relations in sitka spruce trees measured with the pressure chamber. *Journal of the Applied Ecology* 11: 637-667.
- Hernández, M.J., Montes, F., Viscasillas, A., Sixto, H., Cañellas, I. (2009) Evolución del índice de área foliar en plantaciones de chopo con fines energéticos. Comparación entre métodos semidiréctos e indirectos de estimación. 5º Congreso Forestal Español. Ávila.
- Hoogwijk, M.M, Faaij, A.P.C., Eickhout, B., Vries, B., Turkenburg, W.C. (2005). Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy* 29: 225 -257.
- Hunter, A., Lechowicz, M. (1992). Predicting the timing of budburst in temperate trees. *Journal of Applied Ecology* 29: 597-604.

Hunter, J.J. (1998). Plant Spacing Implications for Grafted Grapevine II. Soil Water, Plant Water Relations, Canopy Physiology, Vegetative and Reproductive Characteristics, Grape Composition, Wine Quality and Labour Requirements. South African Society for Enology & Viticulture, Vol. 19, No.2: 35-52.

I

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético). (2005). Plan de Energías Renovables 2005-2010. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 350 pp.

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético). (2007). Biomasa: Cultivos energéticos. Madrid, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 51 pp. ISBN: 978-84-96680-17-3.

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético). (2011). Plan de Energías Renovables 2011-2020. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 774 pp.

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético). (2011a). Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 261 pp.

IPCC (Intergovernmental panel on climate change). (2012). Renewable Energy Source and Climate Change mitigation. 246 pp. ISBN: 978-92-9169-131-9. Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf

Iriarte, L., Fernandez, J. (2006). Stem weight ratios of Siberian elm (*Ulmus pumila* L.) grown as a short rotation crop. Proceedings of World Bioenergy 2006. Jonkoping (Suecia). pp: 217–221.

Iriarte, L. (2008). Caracterización del olmo de Siberia (*Ulmus pumila* L.) como cultivo energético. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. 266 pp.

J

Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles, T.R., Miles, T.R. (1998). Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology 54: 17-46.

Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. theories, sensors and hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology 121: 19–35.

Junquera, P. (2011). Influencia de la distancia entre filas y de la densidad de pámpanos en el aprovechamiento de los recursos ambientales y en la respuesta del cv.

Tempranillo (*Vitis vinífera* L.) conducido en espaldera con riego deficitario. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 255pp.

K

- Kaczmarek, D.J., Coyle, D.R., Coleman, M.D. (2013) Survival and growth of a range of *Populus* clones in central South Carolina USA through age ten: Do early assessments reflect longer-term survival and growth trends. *Biomass and Bioenergy* 49: 260-272.
- Kasanga, H., Monsi, N. (1954). On the light transmission of leaves and its meaning for the production of matter in plant communities. *Japanese Journal of Botany* 14: 304–324.
- Kaufmann, M.R. (1968). Evaluation of the pressure chamber technique for estimating plant water potential of forest tree species. *Forest Science* 14: 369-374.
- 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: 411-427.
- Khan, M.L. y Tripathi R.S. (1986) Tree Regeneration in a Disturbed Sub-Tropical Wet Hill Forest of North-East India: Effect of Stump Diameter and Height on Sprouting of Four Tree Species. *Forest Ecology and Management* 17: 199-209
- Kira, T. (1975). Primary production of forests. En: Cooper, J.P. *Photosynthesis and productivity in different environments*. Cambridge, Cambridge University Press, 744 pp. ISBN: 9780521113427.
- Kitsaki, C.K., Drossopoulos, J.B. (2005). Environmental effect on ABA concentration and water potential in olive leaves (*Olea europaea* L. cv. “Koroneiki”) under non-irrigated field conditions. *Environmental and Experimental Botany* 54: 77–89.
- Kopp, R.F., Abrahamson, L.P., White, E.H., Volk T.A., Nowak, C.A., Fillhart, R.C. (2001). Willow biomass production during ten successive annual harvests. *Biomass and Bioenergy* 20: 1-7.
- Koyama, H. y Kira, T. (1956). Intraspecific competition among- higher plants. 8. Frequency distribution of individual plant weight as affected by the interaction between plants. *Journal of the Institute of Polytechnics, Osaka City University* 7: 73-94.
- Kozlowsky, T., Kramer, P., Pallardy, S. (1991). *The physiological ecology of woody plants*. San Diego (EE.UU), Academic Press, 657 pp. ISBN: 978-0123958860.

L

- Labrecque, M., Teodorescu, T.I. (2005). Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). *Biomass and Bioenergy* 29: 1–9
- Larocque, G.R. (1999). Performance and morphological response of the hybrid poplar DN-74 (*Populus deltoides* x *nigra*) under different spacings on a 4-year rotation. *Annals of Forest Science* 56: 275-287.
- Laureysens, I., Deraedt, W., Indeherberge, T., Ceulemans, R. (2003) Population dynamics in a 6-year old coppice culture of poplar. I. Clonal differences in stool mortality, shoot dynamics and shoot diameter distribution in relation to biomass production *Biomass and Bioenergy* 24: 81 – 95
- Laureysens, I., Bogaert, J., Blust, R., Ceulemans, R. (2004). Biomass production of 17 poplar clones in short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest Ecology and Management* 187: 295-309.
- Laureysens, I., Pellis, A., Willems, J., Ceulemans, R. (2005) Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar. III. Second rotation results. *Biomass and Bioenergy* 29: 10–21.
- Li, C. (1999). Carbon isotope composition, water use efficiency and biomass productivity of *Eucalyptus microtheca* populations under different water supplies. *Plant and Soil* 214: 165-171.
- Li, Y.G., Jiang, G.M., Liu, M.Z., Niu, S.L., Gao, L.M., Cao, X.C. (2007). Photosynthetic response to precipitation/rainfall in predominant tree (*Ulmus pumila*) seedlings in Hunshandak Sandland, China. *Photosynthetica* 45: 133-138.
- Liesebach, M., Von Wuehlisch, G., Muhs, H.J. (1999). Aspen for short-rotation coppice plantations on agricultural sites in Germany: effects of spacing and rotation time on growth and biomass production of aspen progenies. *Forest Ecology and Management* 121: 25-39.
- López, J. (2006). Europa crece en los biocarburantes. *Revista Energías Renovables* 51: 50-51.
- Loucks, W.L., Keen, R.A. (1973). Submersion tolerant of selected seedling trees. *Journal of Forestry* 71: 496-497.
- Lui, Z., Dickmann, D.I. (1992). Responses of two hybrid *Populus* clones to flooding, drought, and nitrogen availability. I. Morphology and growth. *Canadian Journal of Botany* 70: 2265-2270.

M

- Madgwick, H.A.I. (1976). Mensuration of forest biomass. En: Oslo biomass studies. Orono, University of Maine, pp: 13-27.
- MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). (2014). Registro de Productos Fitosanitarios. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/temas/sanidad-vegetal/productos-fitosanitarios/registro/menu.asp>.
- Marcos, F., Izquierdo, I., Gracia, R., Godino, M., Ruiz, J., Vilegas, S. (2002). Estudio de plantaciones energéticas de chopo (*Populus× euramericana* cv.I-214) a turnos muy cortos. Documento interno del Departamento de Ingeniería Forestal ETSI de Montes, Madrid. 30 pp.
- Mareschi, L., Paris, P., Sabatti, M., Nardin, F., Giovanardi, R., Manazzone, S., Mugnozsa, G.S. (2005). Le nuove varietà di pioppo da biomassa garantiscono alta produttività interessanti. *Informatore Agrario* 61: 49-53.
- Marron, N., Delay, D., Petit, J.M., Dreyer, E., Kahlem, G., Delmotte, F.M., Brignolas, F. (2002). Physiological traits of two *Populus x euramericana* clones, Luisa Avanzo and Dorskamp, during a water stress and re-watering cycle. *Tree Physiology* 22: 849-858.
- Martin, P.J., Stephens, W. (2006). Willow growth in response to nutrients and moisture on a clay landfill cap soil. II Water use. *Bioresource Technology* 97: 449-458
- Martínez, S. (2009). Evolución de la Biomasa como recurso energético renovable en Cataluña. Tesis doctoral. Universitat de Girona. 234 pp.
- McCutchan, H., Schakel K.A. (1992). Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117: 607-611.
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*: 43: 63-84.
- Minotta, G., Facciotto, G., Bergante, S., Frenguelli, L., Giovanardi, R., Gras, M., Maggiore, T., Mughini, G., Muzzi, E., Bonari, E., Seufert, G., Zenone, T. (2007). Ongoing Researches on the Productivity of SRF Plantations in Italy. 15th European Biomass Conference and Exhibition, from research to market deployment. Berlín. pp: 15-18.
- Mitchell, C.P. (1992) Ecophysiology of short rotation forest crops. *Biomass and Bioenergy* 2: 15-37.

Mitchell, C.P., Sennerby-Forsse, L., Zsuffa, L. (1998). Biomass qualities and potential for genetic improvement in poplars and willows. *Biomass* 17: 21–37.

Moore, L.M. (2003). Siberian elm (*Ulmus pumila* L). En: Natural Resources Conservation Service Plant Guide. Washington, DC. (EE.UU), USDA, 2 pp.

N

Naor, A. (1998). Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field-grown woody species. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 73: 431-436.

Nassi o Di Nasso, N., Guidi, W., Ragaglini, G., Tozzini, C., Bonari, E. (2010) Biomass production and energy balance of a 12-year-old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles. *Global Change Biology Bioenergy* 2: 89-97

Nava-García, F.J., Doldán-García, X.R. (2014). Cultivos energéticos. *Agricultura Sociedad y desarrollo* 1: 25-34.

NCGIA (National Centre for Geographic Information and Analysis). (1990). Core Curriculum. 3 Vol: I. Introduction to GIS. II. Technical issues in GIS. III. Application issues in GIS, Santa Barbara, Cal. University of California.

Neuman, D.S., Wagner, M., Braatne, J.H., Howe, J. (1996). Stress physiology - abiotic. En: Stettler, R.F., Bradshaw, Jr., H.D., Heilman, P.E., Hinckley, T.M. (Eds.), *Biology of Populus and its Implications for Management and Conservation*. Ottawa (Canada), NRC Research Press, National Research Council of Canada, pp. 423-458.

Nixon, D.J., Stephens, W., Tyrrel. S.F., Brierley, E.D.R. (2001). The potential for short rotation energy forestry on restored landfill caps. *Bioresource Technology* 77: 237-245.

O

Obernberger, I., Brunnerl, T., Barnthaler, G. (2006) Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. *Biomass and Bioenergy* 30: 973-982.

P

- Padró, A., Orensanz, J. (1987). El chopo y su cultivo. Madrid, Serie Técnica MAPA, 446 pp.
- Parfitt, R.J., Royle, D.T. (1996). *Pupulus*, poplar : En: Renewable Energy – Potencial Energy Crops for Europe and the Mediterranean Region. REU Technical Series, 46. Braunschweig (Alemania), FAO, 200 pp.
- Pellis, A., Laureysens, I., Ceulemans, R. (2004). Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar I. Clonal differences in leaf characteristics in relation to biomass production. *Biomass and Bioenergy* 27: 9-19.
- Pérez, M.A. (2002) Densidad de plantación y riego: Aspectos ecofisiológicos, agronómicos y calidad de la uva en cv. Tempranillo (*Vitis vinifera* L.). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 284 pp.
- Pérez, I., Ciria, P., Bergante, S., Pérez, J., Carrasco, J.E., Rosso, L., Facciotto, G. (2012). Biomass production of Siberian elm at the end of the second vegetative period in Spain and Italy. 20th European Biomass Conference & Exhibition - Setting the course for a biobased economy. Milan (Italia). pp: 402 - 408.
- Pérez-Cruzado, C., Sánchez, D., Rodríguez-Soalleiro, R., Hernández, M.J., Sánchez-Martín, M.N., Cañellas, I., Sixto, H. (2013). Biomass production assessment and contribution to country-scale energy demands from *Populus* spp. short rotation irrigated crops in Spain. *Global Change Biology - Bioenergy* 6: 312-326.
- Perri, D.A. (1994) Forest Ecosystems. Baltimore (EE.UU), The John Hopkins University Press, 649 pp. ISBN: 0-8018-4760-5.
- Philippot, S. (1996). Simulation models of short-rotation forestry production and coppice biology. *Biomass and Bioenergy* 11: 85-93.
- Polanco, M., Silva-Pando, F.J., Rozados, M.J., Diaz, M., Rodriguez, P., Duo, I. (2005) El índice de área foliar (LAI) en masas de abedul (*Betula celtibérica* Rothm. Et Vasc.) en Galicia. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 20: 111-116.
- Pontailier, J.Y., Ceulemans, R., Guittet, J. (1999). Biomass yield of poplar after five 2-year coppice rotations. *Forestry* 72: 157-163.
- Poorter, H., Nagel, O. (2000). The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology* 27: 1191-1191.
- Proe, M.F, Craig, J., Griffiths, J., Wilson, A., Reid, E. (1999). Comparison of biomass production in coppice and single stem woodland management systems on an

imperfectly drained gley soil in Central Scotland. *Biomass and Bioenergy* 17: 141–51.

Proe, M., Griffiths, J.H., Craig, J. (2002). Effects of spacing, species and coppicing on leaf area, light interception and photosynthesis in short rotation forestry. *Biomass and Bioenergy* 23: 315-326.

R

REN 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st century). (2013) Renewable Global Status Report. Paris, 178 pp. ISBN 978-3-9815934-0-2.

Ridge, C.R., Hinckley, T.M., Stettler, R.E., Van Volkenburgh, E. (1986). Leaf growth characteristics of fast growing poplar hybrids *Populus trichocarpa* x *P.deltoides*. *Tree Physiology* 1: 209-216

Ritchie, G.A., Hinckley T.M. (1971). Evidence for error in pressure-bomb estimates of stem xylem potentials. *Ecology* 52: 534-536.

Ritchie, G.A., Hinckley, T.M. (1975) The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Advances in Ecological Research* 9: 165-254.

S

Saeki, T. (1960). Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. *Botanical Magazine (Tokyo)* 73: 55-63.

Sage, R.F., Coiner, H.A., Way, D.A., Runion, G.B., Prior, S.A., Torbert, H.A., Sicher, R., Ziska, L. (2009). Kudzu [*Pueraria montana* (Lour.) Merr. variety *lobata*]: a new source of carbohydrate for bioethanol production. *Biomass and Bioenergy* 33: 57-61.

San Miguel, A., Montoya, J.M. (1984). Resultados de los primeros 5 años de producción de talleres de chopo en rotación corta (2-5 años). INIA, Serie forestal 8: 73-91.

Sanz, M., Curt, M.D., Plaza, A., Garcia-Muller, M., Fernandez, J. (2011). Assessment of Siberian elm coppicing cycle. 19th European Biomass Conference & Exhibition – From Research to Industry and Markets. Berlin (Alemania). pp: 601–605.

Saxton, K.E., Rawls, R.J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1569-1578.

- Scarascia-Mugnozza, G.E., Ceulemans, R., Heilman, P.E., Isebrands, J.G., Stettler, R.F., Hinckley, T.M. (1997). Production physiology and morphology of *Populus* species and their hybrids grown under short rotation. II. Biomass components and harvest index of hybrid and parental species clones. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 285–294.
- Scholander, P.F., Brandstreet, E.D., Hammel, H.T., Hemmingen, E. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science* 148: 339–346.
- Scholz, V., Ellerbrock, R. (2002). The growth productivity, and environmental impact of the cultivation of energy crops on sandy soil in Germany. *Biomass and Bioenergy* 23: 81-92
- Schweier, J., Becker, G. (2012) New Holland Forage Harvester's Productivity in Short Rotation Coppice: Evaluation of Field Studies from a German Perspective. *International Journal of Forest Engineering* 23: 82-88.
- Sebastián, F., García-Galindo, D., Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa* (volumen I). Zaragoza, Prensas Universitarias de Zaragoza, 557 pp. ISBN: 978-84-92774-91-3.
- Sellés, G., Ferreira, R., Maldonado, P. (2002). Cámara de presión: instrumento para controlar el riego a través de mediciones del estado hídrico de las plantas. *Aconex* 76: 18-26.
- Sennerby-Forsse, L., Telenius, B., Von Fircks, H.A. (1993), Relation between moisture content and early growth in stem cuttings of selected fast-growing willow clones. *Biomass and Bioenergy* : 249-253.
- Sevine, E., Gasol, C.M., Brun, F., Rovira, L., Pagés, J.M., Camps, F., Rieradevall, J., Castells, F., Butnar, I., Gabarell, X. (2010). Potential Environmental Impacts and Water Consumption of *Populus* Spp. *Bioenergy Systems in Southern Europe*. 18th European Biomass Conference & Exhibition From Research to Industry and Markets. Lyon (Francia). pp: 321-327.
- Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L., Sibbett, S., Snyder, R., Southwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S., Yeager, J. (1997). Plant Water Status as an Index of Irrigation Need in Deciduous Fruit Trees. *HortTechnology* 7: 23-29
- Sixto H., Grau, J.M., García-Baudín, J.M. (2001). Assessment of the effect of broad-spectrum pre-emergence herbicides in poplar nurseries. *Crop Protection* 20: 121-126.

- 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. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 16: 277-294.
- Sixto, H., Sánchez, M.M., Montoto, J. L., Cañellas, I. (2009a) Eficiencia en el uso de los recursos como criterio de selección de clones híbridos de *Populus* como productores de biomasa bajo condiciones controladas. 5º Congreso Forestal Español. Ávila.
- Sixto, H., Rueda, J, García-Caballero, J.L; Montoto, J.L. (2009b) Evaluación de genotipos para la producción de biomasa con fines energéticos en la Comunidad de Castilla y León. 5º Congreso Forestal Español. Ávila.
- Sixto, H., Hernández, M.J., Ciria, P., Carrasco, J.E., Cañellas, I. (2010). Manual de cultivo de *Populus spp.* para la producción de biomasa con fines energéticos. Madrid, Monografías INIA: serie forestal, 60 pp. ISBN: 978-84-7498-530-6.
- Sixto, H., Salvia, J., Barrio, M., Ciria, M.P., Cañellas, I. (2011). Genetic variation and genotype-environment interactions in short rotation *Populus* plantations in southern Europe. *New Forests* 42: 163-177.
- Smit, B.A., Stachowiak, M.L. (1988). Effects of hypoxia and elevated carbon dioxide concentration on water flux through *Populus* roots. *Tree Physiology* 4: 153-165.
- Smith-Ramírez, C., Armesto, J. (1994). Flowering and fruting patterns in the temperate rainforest of Chiloé, Chile-ecologies and climatic constrains. *Journal of Ecology* 82: 353-365.
- Spomer, L.A. (1985). Techniques for measuring plant water. *Hortscience* 20: 1021-1028.
- Stape, J.L., Binkley, D., Ryan, M.G. (2004). Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management* 193: 17-31.
- Stenberg, P., Rautiainen, M., Manninen, T., Voipio, P., Smolander, H. (2004). Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in finnish pine and spruce stands. *Silva Fennica* 38: 3-14.
- Strong, T., Hansen, E. (1993) Hybrid poplar spacing/productivity relations in short rotation intensive culture plantations. *Biomass and Bioenergy* 4: 255-261.
- Swedish Energy Agency (2011). Energy in Sweden. Facts and figures.

T

- Telenius, B., Verwijst, T. (1995). The influence of allometric variation, vertical biomass distribution and sampling procedure on biomass estimates in commercial short-rotation forests. *Bioresource Technology* 51: 247–253.
- Tilman, D., Hill, J., Lehman, C. (2006). Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass. *Science* 5805: 1598-1600.
- Timothy, J., Tschaplinski, T.J., Blake, T.J. (1995). Growth and carbohydrate status of coppice shoots of hybrid poplar following shoot pruning. *Tree Physiology* 15: 333-338.
- Tomé, M. y Verwijst, T. (1996) Modeling Competition in short Rotation Forest. *Biomass and Bioenergy* 11: 177-187
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16: 574-582.
- Trinkauss, P. (1998). Short-rotation forestry: Discussion of 10 Austrian principles from the viewpoint of preservation of environment and nature. *Biomass and Bioenergy* 15: 109-114.
- Tubby, I.Y., Armstrong, A. (2002). Establishment and management of short rotation coppice. Edimburgo (Reino Unido), Forestry Commission, 12 pp. ISBN: 0-85538-567-7. Disponible en: [http://www.forestry.gov.uk/pdf/fcpn7.pdf/\\$FILE/fcpn7.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/fcpn7.pdf/$FILE/fcpn7.pdf)
- Tufekcioğlu, A., Altun, L., Kalay, H.Z., Yılmaz, M. (2005). Effects of soil properties on the growth of hybrid poplar in Terme-Golardı region of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 29: 221–226.

V

- Verwijst, T. (1993). Influence of the pathogen *Melampsora epitea* on intraspecific competition in a mixture of *Salix viminalis* clones. *Journal of Vegetation Science* 4: 717–22.

W

- Walsh, T.A., Burk, T.E, Isebrands, J.G. (1996). Development and evaluation of quantitative functions for early selection of *Populus* clones. *Biomass and Bioenergy* 11: 151–159.
- Waring, R.H., Cleary B.D. (1967). Plant moisture stress: Evaluation by pressure bomb. *Science* 155: 1248-1254.
- Watson, D.J. (1947). Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11: 41-76.
- Wei, C., Tyree, M.T., Bennink, J.P. (2000). The transmission of gas pressure to xylem fluid pressure when plants are inside a pressure bomb. *Journal of Experimental Botany* 51: 309-316.
- Weih, M., Nordh, N.E. (2005). Determinants of biomass production in hybrid willows and prediction of field performance from pot studies. *Tree Physiology* 25: 1197–1206
- Weiner, J. y Thomas, S.C. (1986). Size variability and competition in plant monocultures. *Oikos* 47: 211-222.
- Welles, J. (1990) Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews* 5: 31–43.
- Whittaker, R.H. (1975). *Communities and Ecosystems*. New York, Macmillan Publishing Co. ISBN: 0-02-427390-2.
- Willebrand, E. y Verwijst, T. (1993). Population dynamics of willow coppice systems and their implications for management of short-rotation forests. *The Forestry Chronicle* 69: 699-704.
- Williams, L.E., Araujo, F.J. (2002). Correlations among Predawn Leaf, Midday Leaf, and Midday Stem Water Potential and their Correlations with other Measures of Soil and Plant Water Status in *Vitis vinifera*. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 127: 448–454.
- Williams, L., Trout, T. (2005). Relationships among vine-and soil-based measures of water status in a Thompson seedless vineyard in response high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture* 56: 357-366.

X

Xu, H.W., Song, F.B., Zhu, X.C. (2010). Changes of husk leaf water potential of maize and relationship with environmental factors in black soil region of North-East China. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 8: 936-939.

Y

Yin, C., Wang, X., Duan, B., Luo, J., Li, C. (2005). Early growth, dry matter allocation and water use efficiency of two sympatric *Populus* species as affected by water stress. *Environmental and Experimental Botany* 53: 315-322.

Z

Zhang, X., Zang, R., Li, C. (2004). Population differences in physiological and morphological adaptations of *Populus davidiana* seedlings in response to progressive drought stress. *Plant Science* 166: 791-797.

Zhang, X., Wu., N., LI, C. (2005). Physiological and growth responses of *Populus davidiana* ecotypes to different soil water contents. *Journal of Arid Environments* 60: 567-579.

Zuurbier, P. and Vooren, J. (2008). Sugarcane Ethanol: Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment. Holanda, Wageningen Academic Publishers, 255 pp. ISBN: 978-90-8686-090-6

Legislación

Europa. Directiva 2001/77/CE de 27 de septiembre relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad. *Diario Oficial de la Unión Europea*. 27 de septiembre de 2001, núm. 283, pp: 33-40.

Europa. Directiva (UE) 2015/1513 del parlamento europeo y del consejo de 9 de septiembre de 2015 por la que se modifican la Directiva 98/70/CE, relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo, y la Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento

del uso de energía procedente de fuentes renovables. Diario Oficial de la Unión Europea. 15 de septiembre de 2009, núm. 239, pp: 1-29.

Naciones Unidas (1998). Protocolo de Kyoto de la convención Marco de las naciones unidas sobre el Cambio climático. 24 pp.