



---

**Universidad de Valladolid**

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍAS AGRARIAS  
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL Y RECURSOS  
FORESTALES

TESIS DOCTORAL

**CULTIVO DE CHOPO EN CORTA ROTACIÓN Y  
ALTA DENSIDAD Y, DINÁMICA DE  
DESCOMPOSICIÓN DE LA HOJARASCA.**

Presentada por Paloma Pérez Ortiz para optar al grado de  
doctora por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:

Dña. M<sup>a</sup> Pilar Ciria Ciria

Dña. Amelia R. Moyano Gardini



**A mis padres**

**Que siempre lo han dado todo por mí**



## **AGRADECIMIENTOS**

Al final de este trabajo, quiero expresar mi agradecimiento a todos aquellos que directamente o indirectamente han colaborado en su elaboración. En primer lugar, a mis directoras, M<sup>a</sup> Pilar Ciria y Amelia Ruth Moyano, porque confiaron en mí y se embarcaron junto a mí en esta aventura, la cual ha sido difícil pero finalmente satisfactoria. Gracias por vuestro tiempo y dedicación, por fin juntas hemos llegado al final del túnel. Muchísimas gracias a las dos.

Al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), en concreto al Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER), al Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), especialmente a Hortensia de CIFOR-INIA y, a la Universidad de Valladolid, por su apoyo en poner a mi alcance cualquier medio que ha sido necesario para el desarrollo de este trabajo.

A mi compañera Ruth por su gran ayuda sobre todo en lo referente a los análisis de laboratorio, y que no sólo me ha prestado su colaboración a nivel laboral sino que, también, me ha apoyado con su amistad.

A mi compañero Javi, por su ayuda en la recogida de muestras, toma de datos y cuidado de las plantaciones, pues sin él el grupo de cultivos no sería el mismo. Gracias por tu apoyo y amistad.

Finalmente a toda mi familia y amigas/os, en general, pero principalmente a mis padres y a mi querido Fernando por aguantar todos mis altibajos, por su apoyo incondicional y por la confianza que siempre han depositado en mí a lo largo de esta dura etapa que hace algunos años comencé, pues sin ellos no habría conseguido llegar al final. Muchísimas gracias por estar siempre junto a mí. A ellos, mi familia, les dedico este trabajo.



## ÍNDICE GENERAL

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                       | V         |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                      | IX        |
| ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....                                   | XI        |
| RESUMEN .....                                                | 13        |
| ABSTRACT .....                                               | 15        |
| <b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>                                   | <b>19</b> |
| 1.1 Interés del tema. ....                                   | 19        |
| 1.2 El género <i>Populus</i> spp. ....                       | 20        |
| 1.3 Reabsorción de nutrientes. ....                          | 25        |
| 1.4 Producción de hojarasca.....                             | 26        |
| 1.5 Descomposición de hojarasca .....                        | 28        |
| 1.6 Dinámica de los nutrientes. ....                         | 29        |
| 1.7 Secuestro del carbono.....                               | 31        |
| <b>2 OBJETIVOS .....</b>                                     | <b>35</b> |
| <b>3 MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>                             | <b>39</b> |
| 3.1 Localización y descripción de la zona experimental ..... | 39        |
| 3.1.1 <i>Ensayo 1</i> .....                                  | 40        |
| 3.1.2 <i>Ensayo 2</i> .....                                  | 42        |
| 3.3 Productividad de biomasa: muestreos.....                 | 49        |
| 3.3.1 <i>Biomasa leñosa</i> .....                            | 49        |
| 3.3.1.1 <i>Ensayo 1</i> .....                                | 49        |
| 3.3.1.2 <i>Ensayo 2</i> .....                                | 49        |
| 3.3.2 <i>Biomasa foliar</i> .....                            | 50        |

|           |                                            |           |
|-----------|--------------------------------------------|-----------|
| 3.4       | Descomposición hojarasca foliar .....      | 54        |
| 3.5       | Muestreo de la biomasa.....                | 57        |
| 3.6       | Muestreo del suelo .....                   | 57        |
| 3.7       | Métodos de análisis de la biomasa .....    | 58        |
| 3.8       | Métodos de análisis del suelo.....         | 60        |
| 3.9       | Cálculos y análisis de datos.....          | 60        |
| <b>4</b>  | <b>RESULTADOS.....</b>                     | <b>65</b> |
| 4.1       | Producción de biomasa.....                 | 65        |
| 4.1.1     | <i>Biomasa leñosa</i> .....                | 65        |
| 4.1.1.1   | <i>Ensayo 1</i> .....                      | 65        |
| 4.1.1.1.1 | Periodo vegetativo de la plantación .....  | 65        |
| 4.1.1.1.2 | Supervivencia .....                        | 65        |
| 4.1.1.1.3 | Número de brotes, diámetros y altura ..... | 66        |
| 4.1.1.1.4 | Producciones .....                         | 66        |
| 4.1.1.2   | <i>Ensayo 2</i> .....                      | 67        |
| 4.1.1.2.1 | Periodo vegetativo de la plantación .....  | 67        |
| 4.1.1.2.2 | Supervivencia .....                        | 69        |
| 4.1.1.2.4 | Número de brotes, diámetros y altura ..... | 70        |
| 4.1.1.2.5 | Producciones .....                         | 73        |
| 4.1.2     | <i>Biomasa foliar</i> .....                | 73        |
| 4.2       | Descomposición de hojarasca foliar.....    | 75        |
| 4.2.1.1   | <i>Ensayo 1</i> .....                      | 75        |
| 4.2.1.2   | <i>Ensayo 2</i> .....                      | 77        |
| 4.4       | Suelo.....                                 | 85        |
| 4.4.1     | <i>Ensayo 1</i> .....                      | 85        |

|           |                                                    |           |
|-----------|----------------------------------------------------|-----------|
| 4.4.2     | <i>Ensayo 2</i> .....                              | 87        |
| 4.5       | Secuestro del carbono y balance de nutrientes..... | 90        |
| 4.5.1     | <i>Ensayo 1</i> .....                              | 90        |
| 4.5.2     | <i>Ensayo 2</i> .....                              | 91        |
| <b>5</b>  | <b>DISCUSIÓN</b> .....                             | <b>99</b> |
| 5.1       | Producción de biomasa.....                         | 99        |
| 5.1.1     | <i>Biomasa leñosa</i> .....                        | 99        |
| 5.1.1.1   | <i>Ensayo 1</i> .....                              | 99        |
| 5.1.1.1.1 | Periodo vegetativo de la plantación .....          | 99        |
| 5.1.1.1.2 | Supervivencia .....                                | 99        |
| 5.1.1.1.3 | Número de brotes, diámetros y altura .....         | 100       |
| 5.1.1.1.4 | Producciones .....                                 | 101       |
| 5.1.1.1.5 | Modelos de estimación de la producción .....       | 101       |
| 5.1.1.2   | <i>Ensayo 2</i> .....                              | 104       |
| 5.1.1.2.1 | Periodo vegetativo de la plantación .....          | 104       |
| 5.1.1.2.2 | Supervivencia .....                                | 104       |
| 5.1.1.2.3 | Número de brotes, diámetros y altura .....         | 106       |
| 5.1.1.2.4 | Producciones .....                                 | 107       |
| 5.1.1.2.5 | Modelos de estimación de la producción .....       | 108       |
| 5.1.2     | <i>Biomasa foliar</i> .....                        | 114       |
| 5.2       | Descomposición de hojarasca foliar.....            | 115       |
| 5.2.1.1   | <i>Ensayo 1</i> .....                              | 115       |
| 5.2.1.2   | <i>Ensayo 2</i> .....                              | 119       |
| 5.3       | Suelo .....                                        | 132       |
| 5.3.1     | <i>Ensayo 1</i> .....                              | 132       |
| 5.3.2     | <i>Ensayo 2</i> .....                              | 134       |

|          |                                                   |            |
|----------|---------------------------------------------------|------------|
| 5.4      | Secuestro de carbono y balance de nutrientes..... | 136        |
| 5.4.1    | <i>Ensayo 1</i> .....                             | 136        |
| 5.4.2    | <i>Ensayo 2</i> .....                             | 139        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIONES .....</b>                         | <b>145</b> |
| <b>7</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                          | <b>149</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.1:</b> Secciones en las que se agrupa el género <i>Populus</i> (Ciria 2009) .....                                                                                                      | 24 |
| <b>Tabla 1.2:</b> Híbridos naturales del género <i>Populus</i> (Padró y Orensanz 1987).....                                                                                                       | 25 |
| <b>Tabla 3.1:</b> Condiciones meteorológicas durante el período estudiado en ambas localizaciones.....                                                                                            | 48 |
| <b>Tabla 3.2:</b> Cronograma de evaluación de ratio (Hojas/(ramas + tallos) por distintos procedimientos .....                                                                                    | 53 |
| <b>Tabla 3.3:</b> Cronograma de actividades realizadas en cada ensayo .....                                                                                                                       | 56 |
| <b>Tabla 4.1:</b> Duración del periodo vegetativo para el clon I-214 en Soria.....                                                                                                                | 65 |
| <b>Tabla 4.2:</b> Porcentaje de supervivencia de los años 2006 a 2009 para el clon I-214 ....                                                                                                     | 65 |
| <b>Tabla 4.3:</b> Número medio de brotes por planta, diámetro medio por brote a 10 y 130 cm de altura y altura media dominante para el clon I-214 .....                                           | 66 |
| <b>Tabla 4.4:</b> Producciones medias acumuladas de biomasa leñosa (Mg MS ha <sup>-1</sup> ) obtenidas para el clon I-214 en el ensayo 1 .....                                                    | 66 |
| <b>Tabla 4.5:</b> Duración del periodo vegetativo para los clones I-214 y AF2 en Soria y Madrid .....                                                                                             | 68 |
| <b>Tabla 4.6:</b> Comparativa del porcentaje de supervivencia entre los años dentro de un mismo clon para Soria .....                                                                             | 69 |
| <b>Tabla 4.7:</b> Comparativa del porcentaje de supervivencia entre los años dentro de un mismo clon para Madrid.....                                                                             | 69 |
| <b>Tabla 4.8:</b> Número medio de brotes por planta, diámetro medio por brote a 10 y 130 cm de altura y altura media dominante para la localización de Soria .....                                | 71 |
| <b>Tabla 4.9:</b> Número medio de brotes por planta, diámetro medio por brote a 10 y 130 cm de altura y altura media dominante para la localización de Madrid.....                                | 72 |
| <b>Tabla 4.10:</b> Producciones medias acumuladas de biomasa leñosa (Mg MS ha <sup>-1</sup> ) obtenidas para el clon AF2 e I-214 en el ensayo 2.....                                              | 73 |
| <b>Tabla 4.11:</b> Cantidad de hojas caídas (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) y ratio biomasa foliar (H) frente a biomasa leñosa (Tallos + Ramas) obtenido por diferentes métodos ..... | 74 |

|                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 4.12:</b> Media del porcentaje de eficiencia de reabsorción (RE%) y eficiencia de uso del nutriente a nivel de la hoja (LNUE g MS g <sup>-1</sup> de nutriente) para N, P y K en la localización de Soria..... | 75 |
| <b>Tabla 4.13:</b> Evolución del contenido absoluto de cada bioelemento en la hojarasca foliar. Todos los datos han sido referidos a 1 g MS (g bioelemento g <sup>-1</sup> hojas) .....                                 | 76 |
| <b>Tabla 4.14:</b> Materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S liberado de la hojarasca foliar (expresado como un porcentaje referido al contenido inicial en las hojas recién caídas) .....                               | 77 |
| <b>Tabla 4.15:</b> Evolución del contenido absoluto de cada bioelemento en la hojarasca foliar en Soria. Todos los datos han sido referidos a 1 g MS (g bioelemento g <sup>-1</sup> hojas) .....                        | 78 |
| <b>Tabla 4.16:</b> Evolución del contenido absoluto de cada bioelemento en la hojarasca foliar en Madrid a lo largo de 32 meses. Todos los datos han sido referidos a 1 g MS (g bioelemento g <sup>-1</sup> hojas)..... | 79 |
| <b>Tabla 4.17:</b> Evolución del contenido absoluto de cada bioelemento en la hojarasca foliar en Madrid a lo largo de 48 meses. Todos los datos han sido referidos a 1 g MS (g bioelemento g <sup>-1</sup> hojas)..... | 80 |
| <b>Tabla 4.18:</b> Materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S liberado de la hojarasca foliar en Soria y Madrid (expresado como un porcentaje referido al contenido inicial en las hojas recién caídas).....              | 81 |
| <b>Tabla 4.19:</b> Materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S remanente en la hojarasca foliar en Soria (expresado como un porcentaje referido al contenido inicial en las hojas recién caídas).....                      | 82 |
| <b>Tabla 4.20:</b> Materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S remanente en la hojarasca foliar en Madrid (expresado como un porcentaje referido al contenido inicial en las hojas recién caídas).....                     | 83 |
| <b>Tabla 4.21:</b> Contenido de lignina (%) en la localización de Soria y Madrid .....                                                                                                                                  | 84 |
| <b>Tabla 4.22:</b> Características físicas del suelo antes de la plantación en Soria .....                                                                                                                              | 85 |
| <b>Tabla 4.23:</b> Característica del suelo antes de la plantación (inicial) y después del ensayo de descomposición de la hojarasca (final) a tres profundidades diferentes.....                                        | 86 |
| <b>Tabla 4.24:</b> Características físicas del suelo antes de la plantación en Madrid.....                                                                                                                              | 87 |

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 4.25:</b> Características del suelo testigo antes de la plantación y al final del estudio de descomposición de hojarasca en Soria y en Madrid a tres profundidades diferentes                        | 88 |
| <b>Tabla 4.26:</b> Características del suelo al inicio y al final del ensayo de descomposición de hojarasca en Soria y en Madrid en los primeros 20 cm de suelo.....                                          | 89 |
| <b>Tabla 4.27:</b> Biomasa permanente, hojarasca foliar, carbono secuestrado y flujo de carbono .....                                                                                                         | 90 |
| <b>Tabla 4.28:</b> Absorción total de N, P y K por la biomasa leñosa (tallos + ramas) y la biomasa foliar .....                                                                                               | 91 |
| <b>Tabla 4.29:</b> Retornos de NPK al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar (expresado como %) en relación con la absorción total de NPK por la biomasa aérea total (leñosa + foliar) ..... | 91 |
| <b>Tabla 4.30:</b> Biomasa permanente, hojarasca foliar, carbono secuestrado y flujo de carbono .....                                                                                                         | 93 |
| <b>Tabla 4.31:</b> Absorción total de N, P y K por la biomasa leñosa (tallos + ramas) y la biomasa foliar .....                                                                                               | 94 |
| <b>Tabla 4.32:</b> Retornos de NPK al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar (expresado como %) en relación con la absorción total de NPK por la biomasa aérea total (leñosa + foliar) ..... | 95 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 1.1:</b> Superficie potencial según BIORAISE-CE para cultivar chopo en España en función de rangos de producción (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ).....                                | 21  |
| <b>Figura 3.1:</b> Localización de las parcelas objeto de estudio en Soria (ensayo 1 y 2) y en Madrid (ensayo 2).....                                                                                      | 39  |
| <b>Figura 3.2:</b> Cronograma de ensayos de producción (color <b>negro</b> ) y descomposición de hojarasca foliar (color <b>azul</b> ) .....                                                               | 40  |
| <b>Figura 3.3:</b> Esquema de la plantación del ensayo 1 .....                                                                                                                                             | 41  |
| <b>Figura 3.4:</b> Esquema de la plantación del ensayo 2 .....                                                                                                                                             | 43  |
| <b>Figura 3.5:</b> Diagramas ombrotérmicos de la zona de Soria (ensayo 1 y ensayo 2).....                                                                                                                  | 45  |
| <b>Figura 3.6:</b> Diagramas ombrotérmicos de la zona de Madrid (ensayo 2) .....                                                                                                                           | 46  |
| <b>Figura 3.7:</b> Temperatura media mensual (°C) y precipitación media mensual (mm) registrada durante los años 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011 en Soria y Madrid ..                                  | 47  |
| <b>Figura 5.1:</b> Evolución del porcentaje de mortandad a lo largo del periodo 2006-2009 .....                                                                                                            | 100 |
| <b>Figura 5.2:</b> Área basimétrica a 10 y 130 cm de altura a lo largo del periodo estudiado .....                                                                                                         | 101 |
| <b>Figura 5.3:</b> Evolución del porcentaje de mortandad a lo largo del periodo estudiado                                                                                                                  | 105 |
| <b>Figura 5.4:</b> Área basimétrica calculada con diámetros a 10 y 130 cm de altura a lo largo del periodo estudiado.....                                                                                  | 107 |
| <b>Figura 5.5:</b> Evolución temporal de la materia seca remanente (MSR) en las bolsas de hojarasca (expresada como un porcentaje de la materia seca inicial) t: tiempo en días                            | 116 |
| <b>Figura 5.6:</b> Evolución temporal del NPK remanente en las bolsas de hojarasca (expresada como porcentaje).....                                                                                        | 117 |
| <b>Figura 5.7:</b> Evolución temporal de la materia seca remanente (MSR) en las bolsas de hojarasca en Soria y en Madrid (expresada como un porcentaje de la materia seca inicial) t: tiempo en días ..... | 120 |
| <b>Figura 5.8:</b> Bioelementos liberados (%) a través de la descomposición de la hojarasca a lo largo del tiempo en Soria y Madrid.....                                                                   | 124 |

|                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 5.9:</b> Evolución temporal de la relación C/N en hojarasca foliar de las bolsitas en Soria y Madrid (y= relación C/N, t= tiempo en días).....                                | 126 |
| <b>Figura 5.10:</b> Evolución temporal del porcentaje de lignina en las bolsas de hojarasca foliar a lo largo de 973 y 1216 días para Soria y Madrid, respectivamente .....             | 131 |
| <b>Figura 5.11:</b> Evolución temporal de la relación lignina/N en las bolsas de hojarasca foliar a lo largo de 973 y 1216 días para Soria y Madrid, respectivamente .....              | 132 |
| <b>Figura 5.12:</b> Balance de nutrientes entre el aporte al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar caída y el total extraído por el cultivo.....                      | 138 |
| <b>Figura 5.13:</b> Balance de nutrientes entre el aporte al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar caída y el total extraído por el cultivo. A) Soria B) Madrid ..... | 141 |

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

|                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Foto 3.1:</b> Plantación de chopos en corta rotación a densidad de 25.000 plantas ha <sup>-1</sup> en hileras dobles. A: Inicio periodo vegetativo, B: Periodo vegetativo, C: Fin periodo vegetativo, D: Parada vegetativa .....     | 42  |
| <b>Foto 3.2:</b> Plantación de chopos en corta rotación a densidad de 33.333 plantas ha <sup>-1</sup> en filas individuales. A: Inicio periodo vegetativo, B: Periodo vegetativo, C: Fin periodo vegetativo, D: Parada vegetativa ..... | 44  |
| <b>Foto 3.3:</b> Trampas para recogida de hojas .....                                                                                                                                                                                   | 51  |
| <b>Foto 3.4:</b> Trampa colocada en el ensayo 2 .....                                                                                                                                                                                   | 52  |
| <b>Foto 3.5:</b> Bolsas de hojarasca, de 4 mm de luz de malla, colocadas en los ensayos.....                                                                                                                                            | 55  |
| <b>Foto 3.6:</b> Calicata realizada para la toma de muestras de suelo a distintas profundidades .....                                                                                                                                   | 58  |
| <b>Foto 4.1:</b> Aspecto del suelo en el ensayo 1 .....                                                                                                                                                                                 | 133 |



## RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la producción de biomasa de chopo (*Populus spp*) para fines energéticos, a lo largo de varios periodos vegetativos, cultivados en turno corto y alta densidad, en dos zonas edafoclimáticas diferentes de España. Además se pretende conocer la dinámica de nutrientes a través de la descomposición de la hojarasca foliar caída y sus posibles efectos sobre las características del suelo.

Se evalúa la supervivencia, el crecimiento y la capacidad de rebrote, además de la producción de biomasa área leñosa (tallos + ramas) y la de biomasa foliar. Se obtienen modelos alométricos para poder estimar la producción de biomasa leñosa por métodos no destructivos, se cuantifica el secuestro de C y se define el equilibrio al que se llega entre los procesos de mineralización y los de absorción de nutrientes.

Se realizó un primer ensayo, en Soria, con una plantación de chopo con el clon I-214 a densidad de 25.000 árboles ha<sup>-1</sup>, en la que se evaluó la descomposición de la hojarasca foliar durante 32 meses. En el mismo sentido, se llevó a cabo un segundo ensayo con los clones I-214 y AF2, a una densidad de 33.333 árboles ha<sup>-1</sup>, en dos zonas de diferentes características edafoclimáticas de España (Soria y Madrid), con una duración de 32 meses en ambas localidades y prolongándose hasta 48 meses en Madrid.

Como resultados más relevantes cabe citar que el clon AF2 tuvo mejor productividad que el clon I-214 en las condiciones de alta densidad y turnos de corta rotación considerados para ambas localizaciones estudiadas. Los modelos alométricos potenciales, considerando como variable independiente AB<sub>130</sub>, son los que mejor se ajustan para estimar la biomasa leñosa seca por planta, a excepción del año de implantación, en Soria, donde la variable independiente AB<sub>10</sub>, resulta ser la más adecuada. El ratio biomasa foliar/biomasa leñosa desciende al aumentar el crecimiento de las plantas con la edad. La tasa de descomposición anual se mantiene estable en la misma localidad, independientemente del periodo considerado, a pesar de las variaciones climáticas interanuales. En la zona más cálida considerada (Madrid), en un periodo de 32 meses, los nutrientes que en mayor porcentaje se liberaron de la hojarasca son el S y Mg, y los que menos el P y N, mientras que en la zona más fría (Soria), los de mayor porcentaje fueron C y Mg y los de menor Mn y N. En este mismo periodo, la descomposición de la hojarasca foliar proporcionó entre 1,4 y 4,0 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, siendo más alta en la zona de mayor producción de biomasa y con mejores condiciones

edafoclimáticas (Madrid). La cantidad de macronutrientes (NPK) liberados de la hojarasca respecto a las extracciones totales ha sido diferente en los dos ensayos.

La descomposición de la hojarasca de chopo, además de retornar nutrientes que necesita el chopo para su crecimiento, fija C y contribuye a mejorar las características del suelo aumentando la materia orgánica y con ello los beneficios que esta conlleva.

## ABSTRACT

In this work, the production of poplar biomass (*Populus* spp) in short rotation conditions and at high density is studied for energy use throughout several vegetative periods and in two different pedoclimatic Spanish areas. In addition, it aims to provide an insight into nutrient dynamics through poplar litterfall and their potential effects on soil characteristics.

The survival rate, the growth, the sprouting capacity, as well as the production of woody aerial (stems + branches) and foliar biomass are evaluated. Allometric models are obtained in order to estimate the production of woody biomass by non-destructive methods. Carbon sequestration is quantified, and the moment at which the mineralization and the absorption of nutrients reach an equilibrium is defined.

In a first field trial performed in Soria, the decomposition of litterfall was studied during 32 months, in a I-214 clone poplar plantation and at a density of 25 000 trees ha<sup>-1</sup>. In a similar approach, a second field trial was performed, this time in two Spanish areas with different pedoclimatic characteristics (Soria and Madrid). Two clones (I-214 and AF2) at a density of 33 333 trees ha<sup>-1</sup> were tested. The study lasted for 32 months in both locations, and it was extended to 48 months in Madrid.

Among the most relevant results, it can be pointed out that, under the tested conditions (high density and short rotation coppice), AF2 clone provided higher yields than I-214 clone. The potential allometric models, considering AB130 as the independent variable, are the best suited to estimate the dry woody biomass per plant, with the exception of the establishment year in Soria, when the independent variable AB10, was found to be the most adequate. Foliar to woody biomass ratio decreases with plant growth and age. The annual decomposition rate remains stable in the same location, regardless of the period considered and the inter-annual weather conditions. In the warmer area considered (Madrid) and along the 32-month period, higher percentages of S and Mg and lower percentages of P and N were released. In the coldest area (Soria), higher percentages of C and Mg and lower percentages of Mn and N were released. In this same period of time, the decomposition of litterfall provided between 1.4 and 4.0 Mg C ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, being higher in the area characterized with better pedoclimatic conditions (Madrid), where more biomass was produced. The amount of

macronutrients (NPK) released from litterfall with regard to total extractions were found different in both field trials.

The decomposition of poplar litterfall returns nutrients to the soil, which are very much needed for tree growth, it fixes C, and it contributes to the improvement of the characteristics of the soil, increasing the organic matter, with all its related benefits.

# **INTRODUCCIÓN**



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 *Interés del tema.*

El conocimiento y desarrollo de los recursos de biomasa como fuente de energía renovable es necesario dado el aumento de la demanda de energía y la necesidad de reducir la dependencia de los recursos fósiles, evitando, en lo posible, el calentamiento del planeta, además de contribuir al desarrollo rural mediante la generación de empleo.

La Unión Europea, se ha propuesto que un 20% de la energía consumida en el año 2020 provenga de fuentes renovables (Directiva 2009/28/CE) y, la biomasa, puede jugar un papel fundamental para conseguir este objetivo dados los importantes beneficios económicos, sociales y medioambientales que lleva asociados su utilización sustituyendo combustibles fósiles.

En España, el 80% de la energía consumida proviene del exterior. El Plan de Acción Nacional de Energías Renovables 2011-2020 (IDAE 2011), señala medidas específicas para el fomento del uso de la energía procedente de la biomasa.

Además de la existencia de biomasa residual, un importante potencial de biomasa en España se encuentra en los cultivos realizados específicamente para la producción de energía, denominados “cultivos energéticos”, tanto herbáceos como leñosos, como se pone de manifiesto en la recientemente publicada aplicación informática BIORAISE-CE.

A nivel internacional, los cultivos energéticos leñosos en turno corto y alta densidad presentan gran potencial siendo necesario, además, conseguir sostenibilidad económica, energética y medioambiental, buscando especies capaces de desarrollarse en zonas de baja competitividad agrícola, con escasez de nutrientes y con aporte de pocos insumos. La especie leñosa más estudiada hasta el momento para su uso energético en corta rotación ha sido el chopo, especie de hoja caduca con importante retorno de nutrientes al suelo a través de la hojarasca.

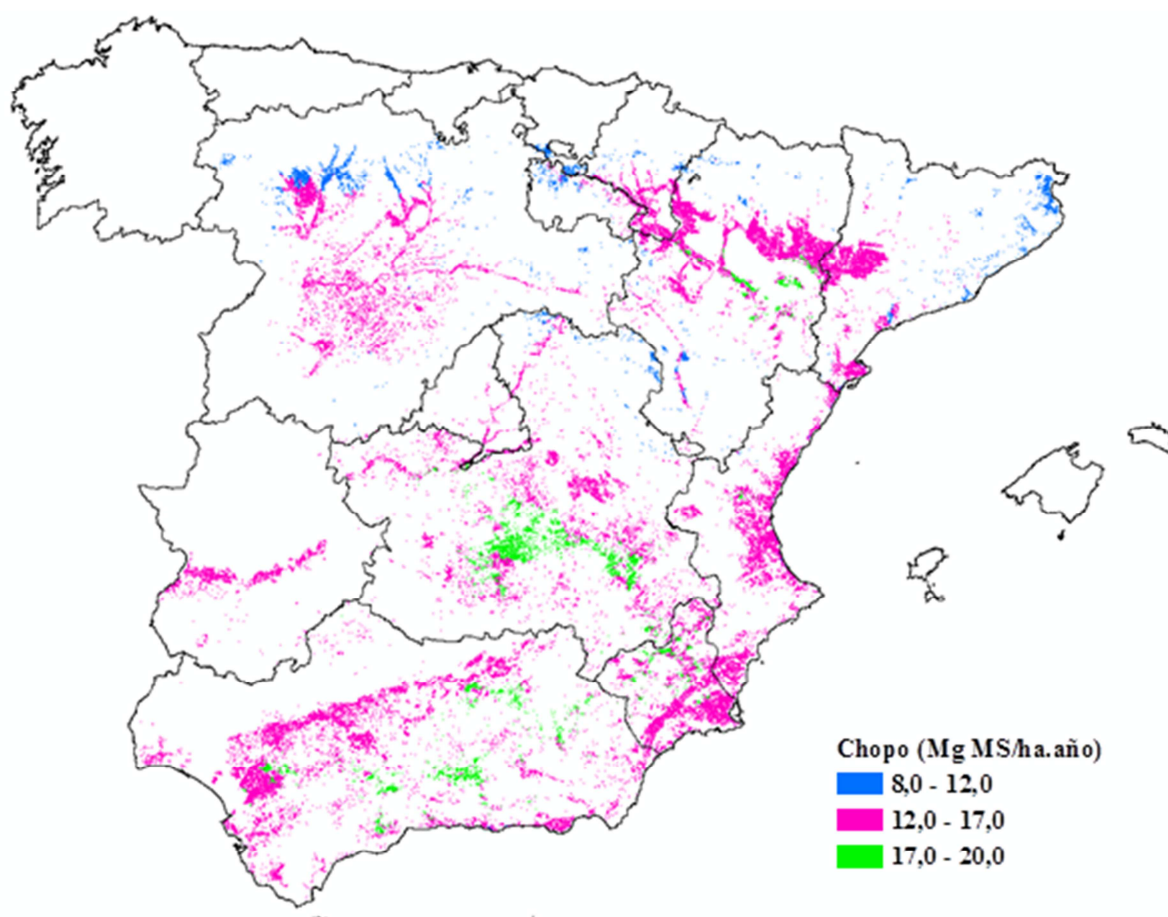
En este contexto, el conocimiento de la producción de biomasa aérea de chopo (*Populus* spp.) cultivado en alta densidad y turno corto y, la dinámica de nutrientes a través de la descomposición de la hojarasca foliar caída es un tema importante a tener en cuenta.

Autores como Schlesinger y Hasey (1981), Aranda et al. (1990), Gallardo y Merino (1993), Moro et al. (1996), Moro y Domingo (2000) y Berg (2000) han estudiado con detalle la dinámica de la descomposición de la hojarasca de plantas leñosas, tanto en climas templados, como en el mediterráneo. Sin embargo, sólo unos pocos estudios se han centrado en la descomposición de la hojarasca de chopo y sus cambios químicos (Berthelot et al. 2000; Pérez-Corona et al. 2006; Meiresonne et al. 2007; Jonczak et al. 2010; Zhao et al. 2013), y ninguno de ellos se ha realizado en las condiciones selvícolas y edafoclimáticas de este estudio.

## *1.2 El género *Populus* spp.*

La producción de biomasa a partir de cultivos leñosos en turno corto consiste en plantaciones formadas por especies de crecimiento rápido, las cuales se caracterizan por las prácticas intensivas de cultivo y un período de rotación que va desde 2 a 10 años (Makeschin 1999; Wetih 2004). Estas plantaciones son una de las alternativas disponibles para conseguir un suministro energético más sostenible, ya que la energía procedente de fuentes renovables está siendo cada vez más demandada con el fin de sustituir los combustibles fósiles (Rytter 2012). En España, constituye una buena alternativa para el cumplimiento de los objetivos incluidos en el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020 (IDAE 2011).

El chopo se encuentra entre las especies de rápido crecimiento más conocidas. Aunque su principal destino es la industria de la madera, es una especie muy interesante para ser utilizada como combustible y producir energía eléctrica y/o calor (Meiresonne et al. 2007). En Europa, las plantaciones de chopo cubren 803.796 ha, de las cuales sólo el 2% se dedican a cultivos energéticos. Menos del 3% de la superficie total española cubierta por plantaciones de chopo (119.600 ha) está destinada a la producción de biomasa leñosa (FAO 2012). En España, según la base de datos BIORAISE-CE, se podría dedicar, al cultivo de chopo un total 3.483.881 ha, del total de superficie de regadío (3.613.771 ha) según SIOSE (2005). Esta superficie (Figura 1.1) se desglosa en varios rangos de producción potencial: 8-12, 12-17 y 17-20 Mg MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, con una ocupación de cada rango del 7,5, 83,6 y 8,9%, respectivamente.



**Figura 1.1:** Superficie potencial según BIORAISE-CE para cultivar chopo en España en función de rangos de producción ( $\text{Mg MS ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ )

El establecimiento de plantaciones de cultivos leñosos de corta rotación para satisfacer la demanda de madera y la producción de bioenergía requiere la recuperación de tierras marginales, de baja rentabilidad agrícola. El chopo no es una especie muy exigente en términos de necesidades de nutrientes, por lo tanto, se puede producir en zonas de regadío relativamente pobres para la producción de alimentos. Sin embargo, no hay duda de que los suelos fértiles favorecen el desarrollo del chopo. Además, este uso es una manera de contribuir a la restauración de los suelos degradados, y también al control de la erosión (Sierra et al. 2013).

El género *Populus* pertenece a la familia de las Salicáceas cuyas principales características se resumen en los siguientes puntos:

- Plantas arbóreas o arbustivas leñosas, propias de las regiones templadas y frías, casi exclusivamente del Hemisferio Norte, que se propagan esencialmente por vía vegetativa.

- Plantas generalmente dioicas; las flores masculinas tienen de dos a treinta estambres y se agrupan en “amentos”, las femeninas poseen un ovario bicarpelar que encierra numerosos óvulos. El fruto es una cápsula unilocular bivalva o trivalva, con semillas pequeñas y numerosas, provistas de un “penacho algodonoso” que favorece la diseminación.

El género *Populus* se caracteriza además por tener:

- ✓ Sistema radicular, que es generalmente superficial y rastrero.
- ✓ Yemas recubiertas por numerosas escamas imbricadas.
- ✓ Hojas alternas de peciolo largo, generalmente comprimido lateralmente y limbo ensanchado lobulado o finamente aserrado. Gran heteromorfismo foliar (posee formas muy variadas incluso dentro de un mismo pie).
- ✓ Plantas caducifolias, salvo el *P. nigra* “Thaysiana” que puede llegar a comportarse como de hoja perenne en América del Sur.
- ✓ Árboles dioicos e inflorescencias en amentos solitarios, procedentes de yemas laterales y generalmente precoces, apareciendo antes que las hojas.
- ✓ Flores masculinas protegidas por una bráctea laciniada o lobulada sobre la que se insertan de 4-30 estambres libres sostenidos por un tenue filamento con antenas rojas o amarillentas.
- ✓ Flores femeninas con estilo corto y estigmas bífidos carnosos.
- ✓ Hibridación frecuente entre especies y clones diferentes, para lo que presenta extraordinaria aptitud.
- ✓ Floración muy temprana (febrero-marzo).
- ✓ Fecundación anemógama.
- ✓ Fruto capsular, polispermo, con una cavidad y 2-4 valvas que al abrirse dejan en libertad numerosas pequeñas semillas (unos 2 mm), de consistencia blanda, envueltas en una especie de borra sedosa que fácilmente sueltan los pies femeninos y transporta el viento fácilmente (proceso de diseminación natural), por lo que se deprecia como árbol ornamental.

El chopo presenta unas particularidades que le hacen adecuado para utilizarlo en turno corto y alta densidad como cultivo energético y que coinciden, en gran medida, con las propuestas por la Comisión Internacional del Álamo (IPC) de la FAO, sobre el tipo ideal de material susceptible de utilización para el fin propuesto, como son:

- Crecimiento juvenil rápido
- Elevada y constante producción de brotes
- Inmunidad o al menos resistencia frente a enfermedades foliares
- Buena cicatrización de los cortes de explotación anual
- Poco deterioro del tocón
- Respuesta a la mejora de las condiciones de crecimiento
- Bajo nivel de ataques de insectos plaga
- Capacidad de crecer en plantaciones densas
- Capacidad de utilización de todo el periodo vegetativo
- Abundante follaje
- Alto contenido en energía

El género *Populus* consta de 29 especies divididas en 6 secciones con una amplia distribución, según la IPC. En la Tabla 1.1, se puede observar las diferentes secciones y especies.

En España, hay tres especies autóctonas de *Populus*: *P. alba* y *P. tremula* (Sección Leuce, Subsecciones Albidae y Trepidae, respectivamente), *P. nigra* (Sección Aigeiros), y en cuanto a la presencia de *P. euphratica* (Sección Turanga), no parece haber duda de su origen antrópico (Ciria 2009).

La gran predisposición del género *Populus* a las hibridaciones naturales, ha hecho surgir a lo largo de la historia una serie de formas intermedias de gran importancia en la populicultura. Los híbridos naturales más importantes en el mundo y su denominación, se indican en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.1:** Secciones en las que se agrupa el género *Populus* (Ciria 2009)

| Secciones           | Especies                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Observaciones              |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| TURANGA Bge         | <i>P. euphratica</i> Oliv                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | .                          |
| LEUCOIDES Spach     | <i>P. ciliata</i> Wall.<br><i>P. heterophylla</i> L.<br><i>P. lasiocarpa</i> Oliv<br><i>P. wilsonii</i> Schneid                                                                                                                                                                                                                                        |                            |
| LEUCE Duby          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                            |
| Subsección ALBIDAE  | <i>P. alba</i> L.<br><i>P. monticola</i> T.Bra.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Especie autóctona española |
| Subsección TREPIDAE | <i>P. adenopoda</i> Maxim<br><i>P. davidiana</i> Schne.<br><i>P. grandidentata</i> Michx.<br><i>P. sieboldii</i> Miq<br><i>P. tremula</i> L.<br><i>P. tremuloides</i> Mich                                                                                                                                                                             | Especie autóctona española |
| TACAMAHACA Spach    | <i>P. angustifolia</i> Jam<br><i>P. balsamifera</i> L.<br><i>P. cathayana</i> Rehd<br><i>P. koreana</i> Rehd.<br><i>P. laurifolia</i> Ledeb.<br><i>P. maximowiczii</i> H.<br><i>P. simonii</i> Carr<br><i>P. suaveolens</i> Fisch<br><i>P. szechuanica</i> Sch.<br><i>P. yunnanensis</i> Dode<br><i>P. trichocarpa</i> Torr<br><i>P. tristis</i> Fisch |                            |
| AIGEIOS Duby        | <i>P. deltoides</i> Bartr.<br><i>P. fremontii</i> Wats.<br><i>P. nigra</i> L.                                                                                                                                                                                                                                                                          | Especie autóctona española |
| ABASO Ecken         | <i>P. mexicana</i> Wesm.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                            |

**Tabla 1.2:** Híbridos naturales del género *Populus* (Padró y Orensanz 1987)

| Parentales (*)                                  | Denominación                                                                                   |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>P. alba</i> x <i>P. grandidentata</i>        | <i>P. x rouleauiana</i> Boivin                                                                 |
| <i>P. alba</i> x <i>P. tremula</i>              | <i>P. x canescens</i> Sm.                                                                      |
| <i>P. alba</i> x <i>P. tremuloides</i>          | <i>P. x heimbürgeri</i> Boivin                                                                 |
| <i>P. angustifolia</i> x <i>P. deltoides</i>    | <i>P. x acuminata</i> Rydb. ( <i>P. x andrewsii</i> Sarg.)                                     |
| <i>P. angustifolia</i> x <i>P. tremuloides</i>  | <i>P. x sennii</i> Boivin                                                                      |
| <i>P. balsamifera</i> x <i>P. deltoides</i>     | <i>P. x jackii</i> Sarg.                                                                       |
| <i>P. deltoides</i> x <i>P. nigra</i>           | <i>P. x euramericana</i> (Dode) Guinier<br>( <i>P. x canadensis</i> Moench)                    |
| <i>P. deltoides</i> x <i>P. tremuloides</i>     | <i>P. x bernardii</i> Boivin                                                                   |
| <i>P. deltoides</i> x <i>P. trichocarpa</i>     | <i>P. x generosa</i> Henry                                                                     |
| <i>P. trichocarpa</i> x <i>P. deltoides</i>     | ( <i>P. x interamericana</i> Brockh)                                                           |
| <i>P. fremontii</i> x <i>P. trichocarpa</i>     | <i>P. x parryi</i> Sarg.                                                                       |
| <i>P. grandidentata</i> x <i>P. tremuloides</i> | <i>P. x smithii</i> Boivin                                                                     |
| <i>P. laurifolia</i> x <i>P. nigra</i>          | <i>P. x berolinensis</i> Dippel ( <i>P. petrowskyana</i> Schr., <i>P. rasumowskyana</i> Schr.) |

(\*) En la denominación de los híbridos, el parental materno siempre figura en primer lugar, en tanto que el paterno aparece a continuación.

Un híbrido importante en nuestro país es el *P. x euramericana* procedente del cruce de *P. deltoides* x *P. nigra* que, junto con los híbridos *P x interamericana*, han demostrado buenas aptitudes en plantaciones en turno corto en España (Ciria 2009).

### 1.3 Reabsorción de nutrientes.

La retranslocación o reabsorción de nutrientes de las hojas viejas es una de las principales dinámicas de nutrientes en las especies arbóreas (Piatek y Lee Allen 2000). Este proceso anual consiste en el movimiento y transferencia de nutrientes de las hojas viejas hacia otras partes de la planta (por ejemplo, madera). Es un importante proceso en la dinámica de los nutrientes en la mayoría de los ecosistemas, especialmente en los ecosistemas caducifolios (Duchesne et al. 2001). La reabsorción ha sido caracterizada como una de las más importantes estrategias usadas por los árboles para conservar los nutrientes, en la cual, influye la competencia, la absorción de nutrientes y la productividad. La reabsorción de nutrientes completa consume mucho tiempo y la reabsorción potencial máxima de nutrientes es rara, si acaso, es alcanzada en ambientes naturales (Killingbeck 1996). En un amplio rango de especies perennes se puede llegar a reciclar alrededor del 50% del contenido máximo de nitrógeno y fósforo foliar (Aerts 1996). En un estudio comparativo realizado por Aerts (1996), apenas encontró

diferencias significativas entre la eficiencia media de reabsorción de las especies perennifolias (47%) y las especies caducifolias (54%), solamente observó que fue ligeramente menor en las primeras. Por otro lado, una característica de las plantas mediterráneas es que tienen una mayor velocidad de retranslocación para así lograr una mayor eficiencia del uso de los nutrientes (Fioretto et al. 2003; Sardans y Peñuelas 2005). En otros estudios se encontró que las plantas que crecen en habitas fértiles son muy eficientes en la reabsorción (Chapin y Kedrowski 1983; Lajtha 1987; Nambiar y Fife 1987).

Como consecuencia de modificaciones en la fenología de la hoja y en las velocidades de caída, puede haber fuertes variaciones de año a año en los contenidos mínimos de nutrientes en la hojarasca y en la fracción de nutrientes reabsorbidos (Lusk et al. 2003). Además, las distintas especies arbóreas difieren significativamente en la senescencia y en la dinámica de caída de la hoja (Koike 1995; Wilson et al. 2000). Sin embargo, la interacción de la reabsorción del nutriente de la hoja con la caída de la misma se ha considerado en muy pocos casos (Killingbeck et al. 1990; Chapin and Moilanen 1991; Del Arco et al. 1991; Escudero et al. 1992). Los nutrientes asociados con diferentes compartimentos de la hoja son movilizados en grados distintos. Tal variación puede resultar de la diferencia entre especies en cuanto a la estructura y química de la hoja. En particular, hay una gran fracción de nitrógeno en la hoja que se une a las paredes celulares (Cassab 1998), lo cual es parcialmente retranslocable. La velocidad de reabsorción de un nutriente desde las hojas senescentes puede también variar con la disponibilidad de nutrientes. Esto implica que, además de los patrones de caída de las hojas, la química de las mismas puede modificar aún más las pérdidas de nutrientes en función del tiempo (Niinemets y Tamm 2005).

#### *1.4 Producción de hojarasca*

La productividad de los ecosistemas terrestres, y en especial de los agroecosistemas, está limitada por la disponibilidad de los principales nutrientes que hay en el suelo y, por lo tanto, un rápido y vigoroso crecimiento de las plantas tiene que ser respaldado por un suministro de nutrientes (Campbell y Sage 2006). La disponibilidad de nutrientes para la planta está determinada por una amplia serie de factores, tales como las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, incluyendo la infección de micorrizas, la disponibilidad de agua, las especies vegetales, y las propiedades físicas y

químicas de las raíces de las plantas (Chapin 1991). La producción de la hojarasca, particularmente en los árboles, es una fuente importante de materia orgánica y energía al suelo. Un equilibrio entre la deposición de hojarasca y su descomposición regula la acumulación de materia orgánica dentro de un ecosistema (Singh et al. 2004). Por lo tanto, es fundamental entender la cantidad y el patrón de la caída de la hojarasca, en los ecosistemas arbóreos, para así poder estimar la renovación de nutrientes, los flujos y reservas de C y N en los diferentes ecosistemas. La acumulación de hojarasca en la capa superior del suelo depende de varios factores, tales como, las especies vegetales, el clima, los tipos de uso del suelo, la población de descomponedores y sus actividades (Fernandes et al. 1997).

En estudios anteriores sobre la hojarasca se ha puesto énfasis principalmente en la cantidad, composición (Chandler 1943; Viro 1955) y distribución (Kittredge 1948; Pedersen y Hansen 1999). Más recientemente, los estudios han pasado a evaluar la función ecológica de la hojarasca en el ciclo de nutrientes (Bringmark 1977; Waring y Schlesinger 1985; Stevens et al. 1989; Haase 1999; Gordon et al. 2000; Zimmermann et al. 2002) y sus interacciones con factores bióticos y abióticos (Prescott et al. 2000a; Cárcamo et al. 2000; Trofymow et al. 2002; Prescott et al. 2004). Este cambio es importante para entender los patrones de producción de hojarasca a lo largo de las etapas de crecimiento de las zonas boscosas. El patrón mensual de producción de la hojarasca es principalmente controlado por las características de la comunidad y los factores ambientales (Huebschmann et al. 1999; Sundarapandian y Swamy 1999; Kavvadias et al. 2001; Pedersen y Hansen 1999).

Los chopos son árboles de hoja caduca y, por lo tanto, una parte de los minerales extraídos por las raíces regresa cada año al suelo a través de la hojarasca. Dado que este proceso se inicia temprano, la distribución anual de hojarasca juega un papel fundamental. La producción y calidad de la hojarasca están reguladas por la edad, la gestión de los árboles, y la densidad de población, entre otros factores. Las plantaciones de chopo se caracterizan no sólo por una alta producción de biomasa, sino también por una alta calidad de la hojarasca (Meiresonne et al. 2007). Las hojas contienen una cantidad importante de nutrientes, alrededor del 60% de los nutrientes extraídos por la biomasa total producida (Ciria et al. 2008). El retorno anual de materia orgánica y bioelementos al suelo, en forma de hojas, es el proceso más importante de reciclaje de nutrientes en los ecosistemas forestales (Martín et al. 1995). La dinámica de nutrientes

en la hojarasca es un proceso incompleto; sólo puede indicar una liberación potencial para el sistema porque tanto la acumulación como la inmovilización también tienen lugar en el suelo (Adams y Angradi 1996). La dinámica de descomposición de la hojarasca de especies forestales influye en el contenido de nutrientes del suelo (Santa Regina et al. 1986). En los sistemas agroforestales, estos residuos vegetales son fuentes de nutrientes y materia orgánica cuando se descomponen, y contribuyen al mantenimiento de la fertilidad del suelo disminuyendo los requerimientos de fertilización (Zeng et al. 2010). Además de la fertilización, la descomposición de la hojarasca, posterior mineralización, y liberación de los nutrientes son los procesos que guían la sostenibilidad y la productividad de las plantaciones de rápido crecimiento en suelos pobres, las cuales se están desarrollando para bioenergía cada vez más en todo el mundo (Ngao et al. 2009). Por lo tanto, la hojarasca arbórea actúa como un sistema de entrada-salida de nutrientes. La velocidad a la que la hojarasca arbórea cae y, posteriormente, se descompone, contribuyen a la regulación de los ciclos de nutrientes así como a la fertilidad del suelo y a la productividad primaria a largo plazo en el ecosistemas forestales (Yang et al. 2004). Además, la hojarasca en la superficie del suelo, tiene una función protectora del mismo, intercepta y almacena una cierta cantidad de precipitación y, por consiguiente, reduce la escorrentía y la erosión del suelo.

### *1.5 Descomposición de hojarasca*

Debido a que la mineralización de la hojarasca a través de la descomposición es crucial en el ciclo de los nutrientes, los procesos que la regulan merecen una especial atención para conocer la dinámica de los mismos y ayudar a comprender los factores que la controlan.

La descomposición de la hojarasca constituye la vía de entrada principal de los nutrientes en el suelo y es uno de los puntos clave del reciclado de la materia orgánica y bioelementos (Vitousek et al. 1994; Aerts y De Caluwe 1997). La descomposición de la hojarasca implica dos procesos concurrentes (Coûteaux et al. 1995): (1) la simultánea mineralización y humificación de la lignina, celulosa, y otros compuestos por una sucesión de microorganismos; y (2) la lixiviación hacia las profundidades del suelo de compuestos solubles en los que el C y N son progresivamente mineralizados o inmovilizados. Una serie de factores, abióticos y bióticos, alteran la dinámica de descomposición de la hojarasca. Por tanto, las tasas de descomposición y renovación de

los nutrientes podrían estar relacionados con las condiciones meteorológicas, las diferencias entre microclimas (Fioretto et al. 2001), la humedad del suelo, la calidad de la hojarasca y, en particular, las concentraciones de N, lignina y polifenoles (Sariyildiz y Anderson 2003), la composición cualitativa y cuantitativa de las comunidades de descomponedores (Knoepp et al. 2000) y, las diferencias entre las especies arbóreas y el tipo de tejido etc. Todos estos factores crean ambientes únicos con respecto a los mayores componentes químicos y a la composición de nutrientes.

La importancia de estos nutrientes (v.g. N, P, K, Ca, Mg, Mn, S) en la regulación de la descomposición varía entre los tipos de hojarasca, diferentes climas y especies (Berg y McClaugherty 2008). Las diferencias en las tasas de descomposición de la hojarasca se pueden encontrar entre especies arbóreas o incluso entre la misma especie dentro de una región. Estas diferencias en las tasas de descomposición afectan a su vez a la velocidad con que los bioelementos de la hojarasca vuelven a estar disponibles para las plantas. De la velocidad y eficiencia con que la planta vuelva a capturarlos, dependerá que estos puedan perderse por lavado o lixiviación, o que sean temporalmente fijados en otros componentes del ecosistema como la biota del suelo (Schlesinger 2000; Ribeiro et al. 2002). Si la descomposición es rápida los nutrientes son liberados rápidamente y pueden perderse por lixiviación edáfica o por volatilización (Palma et al. 1998; Schlesinger 2000). Por el contrario, si la descomposición es muy lenta, la cantidad de nutrientes disponible para las plantas puede ser insuficiente y limitar su crecimiento y desarrollo (Jordan 1985; Swift y Anderson 1989; Bubb et al. 1998; Montagnini y Jordan 2002).

### *1.6 Dinámica de los nutrientes.*

La cantidad de nutrientes transportados al suelo por la hojarasca anual a través de su descomposición es un factor importante para la producción de las zonas arbóreas (Swift et al. 1979; Attiwill y Leeper 1987; Guo y Sims 1999; Villela y Proctor 1999; Wardle 2002). El producto de la descomposición de hojarasca caída facilita en el suelo la formación de materia orgánica y el retorno de nutrientes (Fioretto et al. 2003; Xuluc-Tolosa et al 2003). Más de la mitad de los nutrientes absorbidos por las plantas vuelven al suelo a través de varias formas, entre las cuales la descomposición de la hojarasca aporta la mayor parte (Cole 1986). La hojarasca, por lo general, contiene menos nutrientes en comparación con las plantas vivas (Toky y Ramakrishnana 1983;

Sundarapandian y Swamy 1999). Entre los componentes de la hojarasca, la fracción foliar contiene relativamente las más altas concentraciones de bioelementos y además es la principal fuente de nutrientes que retornan al suelo (Meentemeyer et al. 1982; Anderson y Swift 1983; Liu et al. 2000).

El patrón general de la dinámica de los nutrientes durante la descomposición consta de tres fases: lixiviación, acumulación y liberación (Swift et al. 1979; Berg y Staaf 1981). Estas fases varían en función de la movilidad de los nutrientes y estos pueden estar limitados para la comunidad de organismos descomponedores (Swift et al. 1979; Vitousek et al. 1994; Hasegawa y Takeda 1996). Por otra parte, el patrón general también puede ser modificado dentro de la dinámica de un nutriente, dependiendo de las condiciones ambientales del sitio (Enoki y Kawaguchi 2000; Hobbie y Vitousek 2000; Osono y Takeda 2001), la biota del suelo (Tian et al. 1992; Yamashita y Takeda 1998), y la calidad de sustrato (Berg y Staaf 1980; Berg y McClaugherty 1989; Aerts y De Caluwe 1997; Hobbie 2000), o combinaciones de estos factores.

La producción de hojarasca y la liberación de sus bioelementos son controlados por una amplia variedad de propiedades químicas, tales como la concentración de N, la relación C/N, la concentración de P, la relación C/P, la concentración de los compuestos fenólicos, la relación de N o P con los compuestos fenólicos, la concentración de lignina y la relación lignina/N (Coulson y Butterfield 1978; Meentemeyer 1978; Schlesinger y Hasey 1981; Melillo et al. 1982; Berg et al. 1984; Taylor et al. 1989; Van Vuuren et al. 1993; Vitousek et al. 1994; Aerts y De Caluwe 1997; Shaw y Harte, a y b, 2001).

Según Prescott et al. (2000b) tanto la relación C/N como la relación lignina/N son buenos predictores para evaluar las tasas de descomposición de la hojarasca y la liberación de nutrientes. En general, las hojarascas con relaciones de C/N altas se descomponen más rápidamente que otras con bajas (Alexander 1980; Adams y Atwill 1982). Sin embargo, por encima de ciertos valores (C/N: 75-100) la relación lignina/N puede ser un indicador más adecuado de la susceptibilidad de la hojarasca a ser degradada (Heal et al. 1997).

Varios artículos informaron que la descomposición de la hojarasca es influida por la calidad de la hojarasca (Bernhard-Reversat 1993; Zhang et al. 2008) y, para estudiar esta calidad, varios autores (Melillo et al. 1982; Taylor et al. 1989; Berg et al. 1996; Murphy et al. 1998) han utilizado variables como la concentración de lignina y el ratio lignina/N debido a su influencia sobre la actividad microbiana y la velocidad de

descomposición de la hojarasca. Por lo general, las hojas de los árboles caducifolios tienen altas concentraciones de nutrientes (mayor contenido de N) y menores concentraciones de lignina que las hojas de los árboles perennes, descomponiéndose más rápidamente las hojas caducas que las perennes (Swan et al. 2009; Zhang et al. 2008).

### *1.7 Secuestro del carbono*

En 2005, entró en vigor el Protocolo de Kioto, único instrumento internacional jurídico para mitigar el cambio climático, centrándose en reducir o limitar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En la actualidad, para seguir reduciendo las emisiones de GEI, en 2012, se estableció un segundo periodo de compromiso del Protocolo de Kioto de 8 años (2013-2020), conocido como la Enmienda de Doha. El objetivo, para este periodo, es reducir las emisiones de GEI inventariados, por lo menos, un 18 % con respecto a los niveles de 1990. En el 10º aniversario de la entrada en vigor del Protocolo, en febrero de 2015, diecinueve Estados habían ratificado ya la enmienda.

El conocimiento de la distribución de las fuentes y de los sumideros de C, además de sus cambios a través del tiempo, es fundamental para la comprensión de los mecanismos de control del ciclo terrestre global del C y la sostenibilidad de los sumideros (Chen et al. 2003). Por ello, este conocimiento es también esencial para la formulación de políticas sobre el cambio climático (Houghton 1999; Cao et al. 2003) como por ejemplo la comentada anteriormente Enmienda de Doha.

El establecimiento de plantaciones arbóreas es importante ya que las plantas reducen el CO<sub>2</sub> de la atmósfera a través del proceso natural de la fotosíntesis y almacenan C en sus hojas, ramas, tallos, cortezas y raíces (Suryawanshi et al. 2014). Los ecosistemas forestales juegan un papel importante, en el ciclo global del C, secuestrando una cantidad sustancial de CO<sub>2</sub> de la atmósfera (Vashum y Jay Kumar 2012). Casi aproximadamente el 70% de todo el C activamente intercambiado con la atmósfera se lleva a cabo en los ecosistemas boscosos (Waring y Schlesinger 1985). La expansión de las áreas boscosas podría presentar una excelente oportunidad para incrementar el sumidero de C terrestre y, por lo tanto, ralentizar el incremento en la atmósfera de la concentración de CO<sub>2</sub> (Schroeder 1994). Por eso, las plantaciones con fines energéticos con cultivos de corta rotación, como por ejemplo el chopo, podrían ser una buena oportunidad para mitigar el CO<sub>2</sub>.

La hojarasca foliar añade materia orgánica al suelo (MOS) y contribuye a aumentar el secuestro de C terrestre, además es una estrategia para mitigar las emisiones de GEI respecto a un sistema agrícola convencional (Sanderman et al. 2009). La hojarasca foliar es la vía más importante por la que los nutrientes retornan al sistema fomentando la productividad del suelo. Según Sanaullah et al. (2010) el secuestro potencial de C al contrastarlo con distintos tipos de hojarasca es muy diferente.

## **OBJETIVOS**



## **2 OBJETIVOS**

El objetivo general de este estudio es conocer la producción de biomasa aérea de chopo (*Populus* spp.) cultivado en alta densidad y turno corto en dos zonas edafoclimáticas diferentes, así como conocer la dinámica de nutrientes a través de la descomposición de la hojarasca foliar caída.

Como objetivos específicos se proponen:

- Evaluar la supervivencia, el crecimiento y la producción de biomasa con diferentes clones, densidades y condiciones edafoclimáticas, así como la capacidad de rebrote.
- Obtener modelos alométricos para estimar la producción de biomasa de chopo por métodos no destructivos, partiendo de datos dendométricos.
- Evaluar la producción de biomasa foliar y obtener un ratio medio de la biomasa foliar frente a biomasa leñosa (tallos +ramas).
- Conocer la dinámica de descomposición de los bioelementos (C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S) de hojarasca foliar, así como el comportamiento de la lignina en el proceso de descomposición y, sus posibles efectos sobre las características del suelo.
- Cuantificar el secuestro de C en la biomasa leñosa aérea.
- Definir el momento en el que tanto los procesos de mineralización como los de absorción alcanzan un equilibrio.



## **MATERIAL Y MÉTODOS**



### 3 MATERIAL Y MÉTODOS

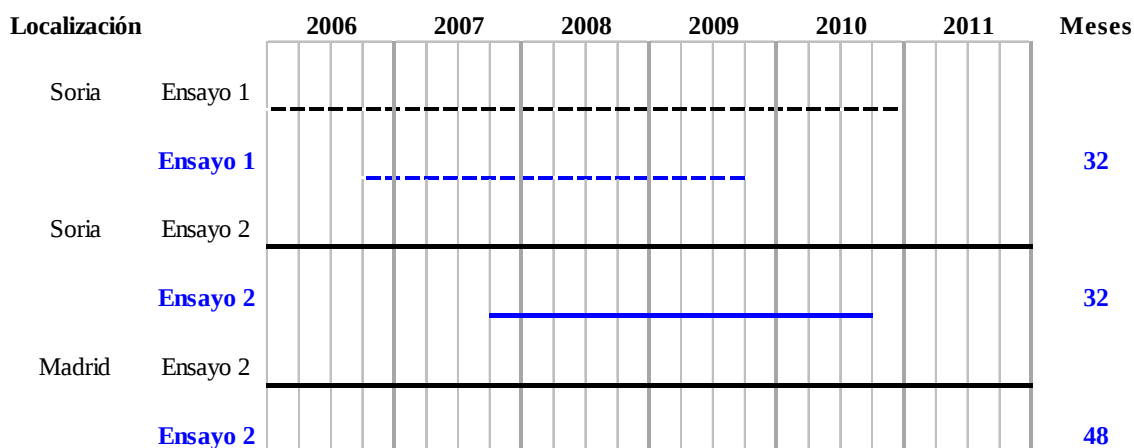
#### 3.1 Localización y descripción de la zona experimental

Las investigaciones se llevaron a cabo en España, en la provincia de Soria, situada en el este de la comunidad autónoma de Castilla y León y, en la Vega del Henares, perteneciente a la comunidad autónoma de Madrid. Los ensayos se realizaron, en parcelas experimentales con una superficie cada una de 0,25 ha, dos en Soria y uno en Madrid (Figura 3.1). De esta forma de aquí en adelante se referenciarán como ensayo 1 (en Soria), ensayo 2 (en Soria) y ensayo 2 (en Madrid), con una duración de entre 32 y 48 meses (Figura 3.2).



**Figura 3.1:** Localización de las parcelas objeto de estudio en Soria (ensayo 1 y 2) y en Madrid (ensayo 2)

Las parcelas experimentales de Soria están ubicadas en una zona que tradicionalmente se utilizó para cultivos agrícolas hasta los años 80. Después, quedó cubierta por matorral (*Cistus laurifolius* L.) hasta 2005, momento en el que las operaciones de acondicionamiento del suelo (limpieza de matorral y nivelación) comenzaron para posteriormente proceder a realizar una plantación de chopo en turno corto. Esta zona se considera tradicionalmente una tierra de secano en una región semiárida (Danti y Revenga 1961). La parcela experimental de Madrid se encuentra ubicada en un área que principalmente se dedicaba a cultivos leñosos.



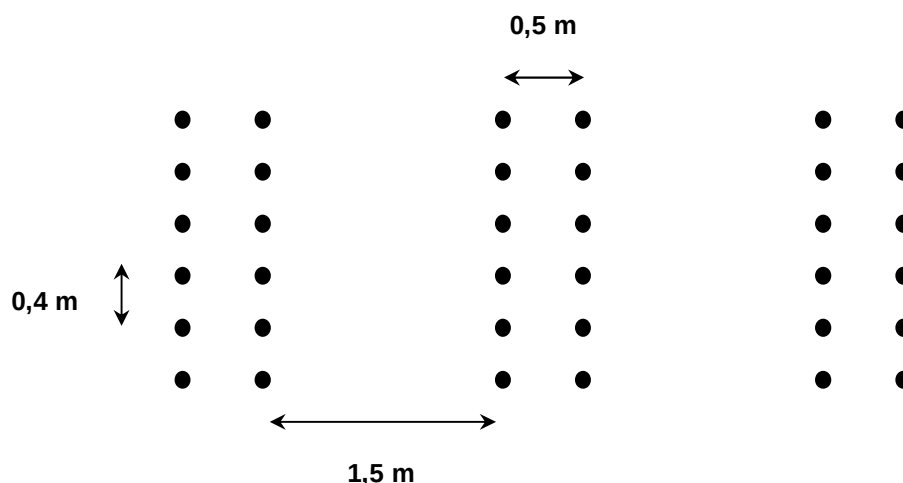
**Figura 3.2:** Cronograma de ensayos de producción (color **negro**) y descomposición de hojarasca foliar (color **azul**)

### 3.1.1 Ensayo 1

Los chopos fueron plantados en condiciones de corta rotación y alta densidad (25.000 árboles  $\text{ha}^{-1}$ ). El diseño de plantación fue en hileras dobles (Figura 3.3) en marco rectangular (0,40  $\text{m}^2$  árbol $^{-1}$ ). La plantación se realizó manualmente en abril de 2006, utilizando estaquillas de unos 25 cm de longitud y de 8 a 20 mm de diámetro.

Se realizaron las prácticas de manejo recomendadas (Sixto et al. 2010), tales como preparación de suelo (subsolado y pase de cultivador), abonado de fondo, plantación, control de malas hierbas inmediatamente posterior a la plantación mediante aplicación de herbicida (Oxifluorfen a dosis 2,5 l  $\text{ha}^{-1}$ ) y riego.

Para garantizar la implantación y facilitar el rebrote se aplicó una dosis de 48-90-90 UF  $\text{ha}^{-1}$  del fertilizante N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O antes de plantar, dada la pobreza del suelo. El sistema de riego fue por goteo durante los meses de verano (desde mediados de junio hasta mediados de septiembre) de hasta 265 mm anuales. La biomasa se cosechó en diciembre de 2006 (fecha que marca el inicio del estudio de descomposición de la hojarasca) y diciembre de 2009, estableciendo así un ciclo de rotación de 3 años.

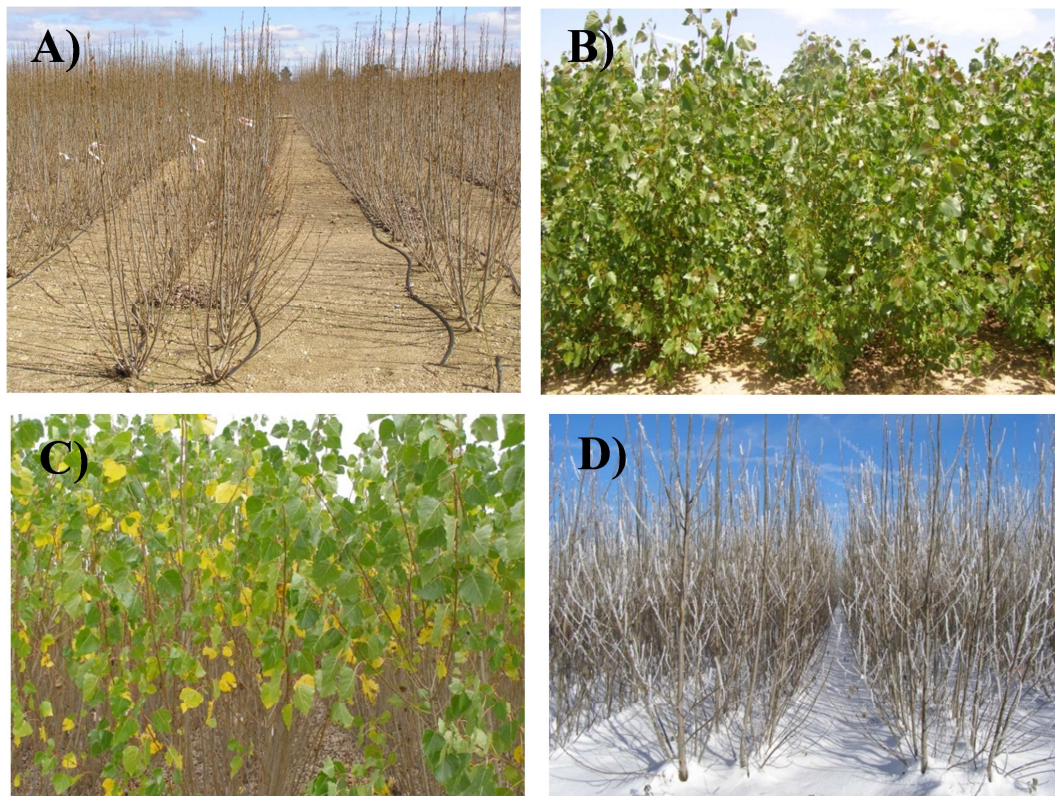


**Figura 3.3:** Esquema de la plantación del ensayo 1

El clon de *Populus* utilizado fue I-214 (*P. x euramericana* (Dode) Guinier → *P. deltoides* x *P. nigra*) cuyas principales características (García et al. 2001), son las siguientes:

- Híbrido: *Populus deltoides* x *Populus nigra*
- Origen: Italia.
- Sexo: femenino.
- Apariencia: copa bastante amplia. Poca dominancia apical. Fuste: ligeramente tortuoso. Corteza fina y lisa. Ramificación: verticilada. Ramas gruesas.
- Fenología: foliación precoz. Defoliación a medio plazo. Buen aprovechamiento del periodo vegetativo.
- Propagación vegetativa: excelente.
- Crecimiento: muy rápido.
- Requerimientos ecológicos: prefiere suelo fértil y ligero, no excesivamente turboso y gravoso. Sensible al fototropismo. Prefiere clima cálido. Relativamente sensible a heladas precoces. Sensible al viento: rotura de copas.
- Adversidades: resiste *Melampsora allí-populina* Kleb., *Dothichiza populea* Sacc. y Briard., *Xanthomonas spp.*, *Venturia populina* (Vinill.) Fabr. Sensible a *Marssonina brunnea* (Ell. & Ev.) Magnus. y Virus del mosaico.

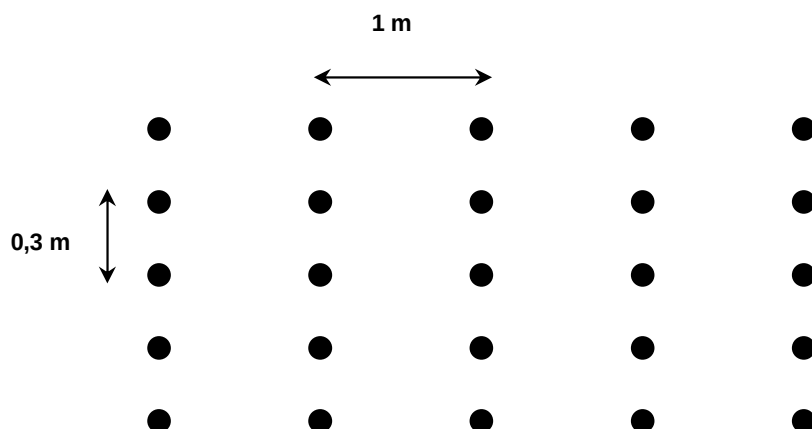
Un aspecto de la plantación en distintas épocas del año se muestra en la Foto 3.1.



**Foto 3.1:** Plantación de chopos en corta rotación a densidad de 25.000 plantas ha<sup>-1</sup> en hileras dobles. A: Inicio periodo vegetativo, B: Periodo vegetativo, C: Fin periodo vegetativo, D: Parada vegetativa

### 3.1.2 Ensayo 2

Se ha realizado en Soria y en Madrid (Figura 3.2), la densidad de plantación fue de 33.333 árboles ha<sup>-1</sup> y el diseño de plantación, en las dos localizaciones, fue de filas individuales con un espaciamiento entre árboles de 1 m x 0,30 m (Figura 3.4). La plantación se estableció en la primavera de 2006 mediante estaquillas con una longitud de 25 cm y de 8 a 20 mm de diámetro. Se aplicó riego por goteo, desde mediados de junio hasta mediados de septiembre, de hasta 410 y 590 mm año<sup>-1</sup> (valor medio) en Soria y Madrid, respectivamente. Antes de la plantación, se aportó una dosis de fertilización de 48-90-90 UF ha<sup>-1</sup> N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O. La biomasa fue cosechada en diciembre de 2006, 2008 y 2011, iniciándose el estudio de descomposición de la hojarasca foliar en diciembre de 2007 (Figura 3.2).

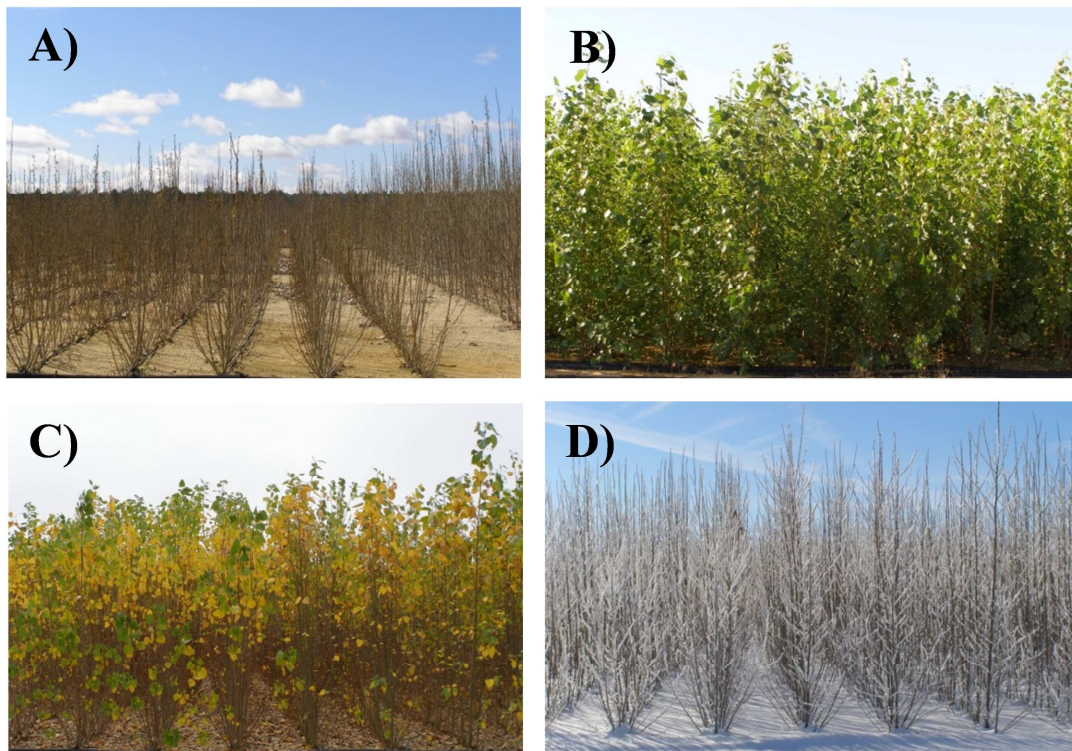


**Figura 3.4:** Esquema de la plantación del ensayo 2

Los clones utilizados fueron I-214 y AF2 (*P. x euramericana* (Dode) Guinier → *P. deltoides* x *P. nigra*). Se describen las principales características del clon AF2, dado que las del clon I-214 se han descrito en párrafos anteriores.

- Híbrido: *Populus deltoides* x *Populus nigra*
- Origen: Italia.
- Sexo: masculino.
- Apariencia: fuste recto y cilíndrico, con corteza lisa, marcada dominancia apical.
- Fenología: foliación y defoliación más tardía que el I-214.
- Propagación vegetativa: excelente.
- Crecimiento: bueno.
- Requerimientos ecológicos: prefiere suelos fértiles, arenosos o arcillosos, con una buena disponibilidad hídrica.
- Adversidades: resiste bien a *Melampsora allí-populina* Kleb., *Marssonina brunnea* (Ell. & Ev.) Magnus., *Dothichiza populea* Sacc. y Briard., *Venturia populina* (Vinill.) Fabr. y a *Phloemyzus passerinii* Sign. Tiene una tolerancia muy alta a la adversidad del Virus del mosaico.

Un aspecto de la plantación en distintas épocas del año se muestra en la Foto 3.2.

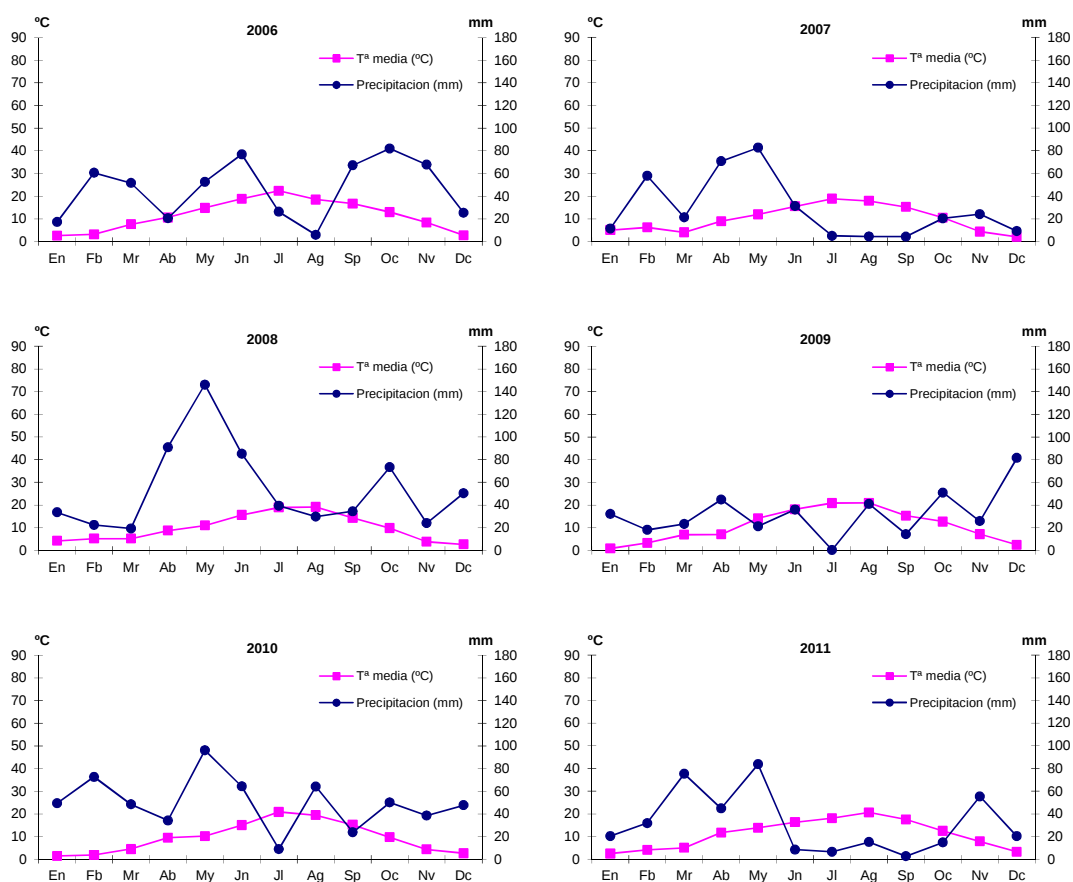


**Foto 3.2:** Plantación de chopos en corta rotación a densidad de 33.333 plantas ha<sup>-1</sup> en filas individuales. A: Inicio periodo vegetativo, B: Periodo vegetativo, C: Fin periodo vegetativo, D: Parada vegetativa

Los ensayos de Soria están situados a 41°36' N y 2°30' O y tienen un clima mediterráneo continentalizado. Este clima es similar al mediterráneo típico en el ámbito de las precipitaciones pero con temperaturas más extremas, lo cual es propio del clima continental, debido a la lejanía del mar. Además, debido a la gran altitud a la que se encuentran la zona experimental de Soria (1.100 m sobre el nivel del mar), las temperaturas registradas son inferiores a las que se presentan en otras zonas con clima mediterráneo continental. De acuerdo a Kottek et al. (2006), Soria, se puede clasificar como tipo Cfb; un clima templado cálido (mesotérmico), con veranos bastante cálidos (AEMET 2011; Peel et al. 2007), con temperaturas máximas que en ocasiones superan los 30°C, mientras que los inviernos son bastante fríos, siendo frecuente que las temperaturas bajen de los 0°C, aunque la temperatura media anual es 11°C. Las precipitaciones siguen un patrón parecido al del clima mediterráneo típico con máximos durante el otoño y la primavera, siendo la precipitación media anual de esta zona de unos 512 mm año<sup>-1</sup> (valor medio del período de referencia: 1981-2010, AEMET 2012).

En mayo de 2008 se registró el número máximo histórico de los días de lluvia mensual en Soria (23). El período libre de heladas, por lo general, dura cuatro meses (entre junio y septiembre), con una media anual de 83 días de helada, y una media anual de días de nieve de 21 (valor promedio 1981-2010).

Durante el estudio, en Soria, se produjo un periodo extremadamente seco en 2007 (Figura 3.5) con una precipitación media anual de 342 mm año<sup>-1</sup>. La precipitación total máxima registrada fue en 2008 (649 mm año<sup>-1</sup>).

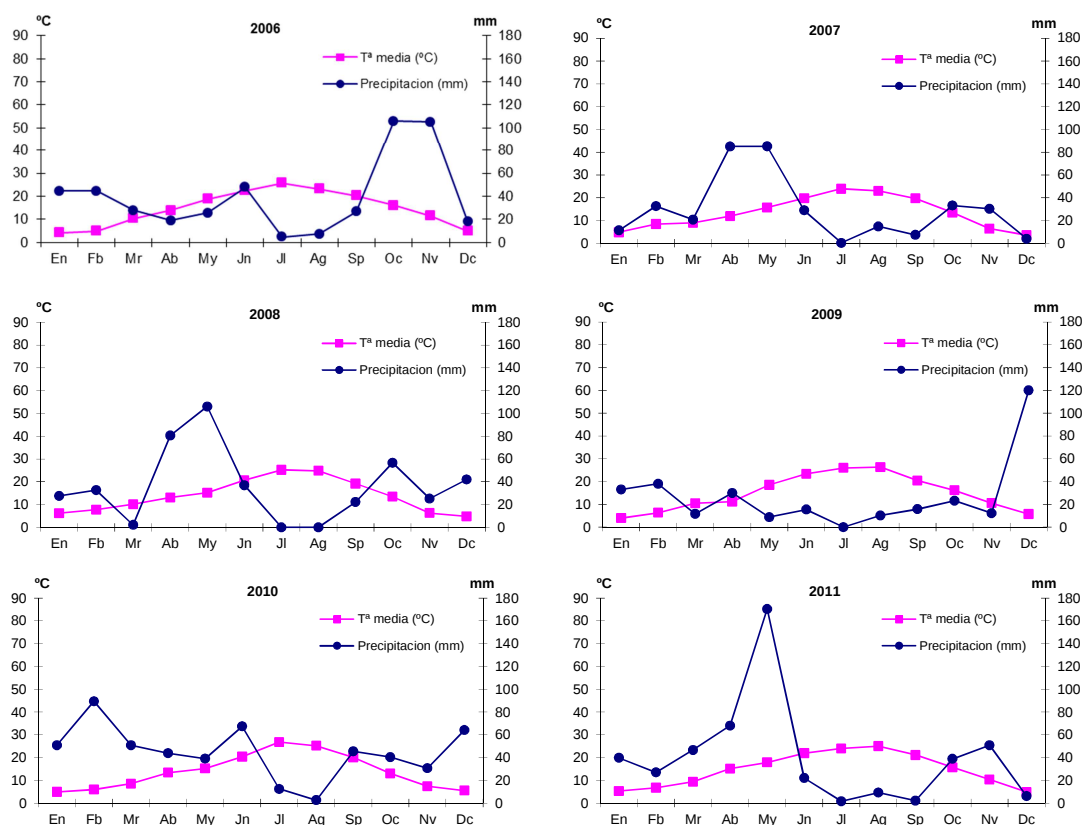


**Figura 3.5:** Diagramas ombrotérmicos de la zona de Soria (ensayo 1 y ensayo 2)

La parcela experimental ubicada en La Vega del Henares (Madrid), está situada a 40 ° 28 ' N y 3 ° 22' O, a una altitud de unos 595 m sobre el nivel del mar y con un clima mediterráneo continental y, según Kottek et al. (2006), esta área se puede clasificar como tipo Csa; un clima suave y seco (mesotérmico), con veranos cálidos (AEMET 2011; Peel et al. 2007). La zona de ensayo tiene un clima mediterráneo templado continental, con veranos secos e inviernos húmedos. La precipitación mensual varía a lo

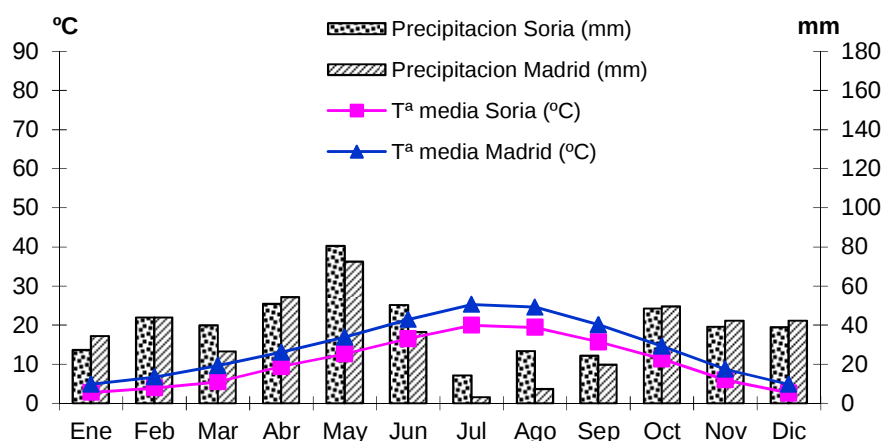
largo del año y de un año a otro, siendo la media anual de  $421 \text{ mm año}^{-1}$  y la temperatura media anual es de  $15^{\circ}\text{C}$  (valor medio del período de referencia 1981-2010, AEMET 2012). El período libre de heladas puede llegar a durar hasta seis meses (mayo - octubre), con una media anual de días de helada de 16, y una media anual de días de nieve de 3,6 (valor medio del período 1981-2010, AEMET 2012).

Durante el presente estudio, el año 2009 fue extremadamente seco (Figura 3.6), con una precipitación anual de  $318 \text{ mm año}^{-1}$ , y la máxima anual fue de 537 mm en 2010.



**Figura 3.6:** Diagramas ombrotérmicos de la zona de Madrid (ensayo 2)

A efectos de comparar los datos meteorológicos registrados en las dos localizaciones durante el periodo considerado (2006-2011), se muestra un diagrama ombrotérmico con la temperatura y precipitación media mensual (Figura 3.7).



**Figura 3.7:** Temperatura media mensual (°C) y precipitación media mensual (mm) registrada durante los años 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011 en Soria y Madrid

Apreciándose que la precipitación media mensual acumulada, en el periodo 2006-2011, fue mayor en Soria que Madrid (Figura 3.7), durante los meses de mayor actividad vegetativa (de marzo a septiembre). La temperatura media mensual en todos de los meses fue mayor en Madrid que en Soria, alcanzándose diferencias de hasta 6°C en los meses de verano.

Se señalan las condiciones meteorológicas más representativas de las parcelas experimentales durante el período de descomposición estudiado y se presentan los valores medios de cada intervalo de muestreo (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1:** Condiciones meteorológicas durante el período estudiado en ambas localizaciones

| Intervalos de muestreo | Soria       |              |                             |             | Madrid      |              |                             |             |
|------------------------|-------------|--------------|-----------------------------|-------------|-------------|--------------|-----------------------------|-------------|
|                        | TM<br>(°C)  | P<br>(mm)    | RS<br>(Wh.m <sup>-2</sup> ) | HR<br>(%)   | TM<br>(°C)  | P<br>(mm)    | RS<br>(Wh.m <sup>-2</sup> ) | HR<br>(%)   |
| Dic-2006               | 2,7         | 25,3         | 39.907                      | 79,7        | 4,9         | 17,8         | n.d.                        | 81,1        |
| Ene-Abr 2007           | 6,0         | 161,2        | 292.248                     | 76,6        | 8,6         | 149,8        | n.d.                        | 74,6        |
| May-Ago 2007           | 16,0        | 123,3        | 754.632                     | 59,8        | 20,6        | 129,4        | n.d.                        | 51,1        |
| Sep-Dic 2007           | 8,0         | 57,8         | 387.600                     | 67,6        | 10,8        | 85,6         | n.d.                        | 68,3        |
| Dic-2007               | 2,0         | 9,1          | 51.120                      | 81,2        | 3,6         | 4,0          | n.d.                        | 84,4        |
| <b>Anual (2007)</b>    | <b>10,0</b> | <b>342,3</b> | <b>1.434.480</b>            | <b>68,0</b> | <b>13,3</b> | <b>364,8</b> |                             | <b>64,7</b> |
|                        |             |              |                             |             |             |              | n.d.                        |             |
| Ene-Abr 2008           | 5,8         | 166,1        | 404.208                     | 75,0        | 9,3         | 142,8        | n.d.                        | 73,8        |
| May-Ago 2008           | 16,2        | 300,4        | 738.840                     | 62,9        | 21,5        | 142,9        | n.d.                        | 52,0        |
| Sep-Dic 2008           | 7,6         | 182,1        | 337.272                     | 74,3        | 10,9        | 146,1        | n.d.                        | 70,5        |
| <b>Anual (2008)</b>    | <b>9,9</b>  | <b>648,6</b> | <b>1.480.320</b>            | <b>70,7</b> | <b>13,9</b> | <b>431,8</b> | n.d.                        | <b>65,4</b> |
| Ene-Abr 2009           | 4,5         | 118,4        | 417.030                     | 71,2        | 8,0         | 112,6        | 347.715                     | 72,4        |
| May-Ago 2009           | 18,5        | 98,7         | 835.902                     | 51,0        | 23,6        | 34,4         | 663.533                     | 37,5        |
| Sep-Dic 2009           | 9,4         | 172,7        | 343.211                     | 72,1        | 13,2        | 171,2        | 275.393                     | 68,4        |
| Ene09-Ago09            | 11,5        | 217,1        | 1.252.933                   | 61,1        | 15,8        | 147,0        | 1.011.248                   | 54,9        |
| <b>Anual (2009)</b>    | <b>10,8</b> | <b>389,8</b> | <b>1.596.144</b>            | <b>64,8</b> | <b>14,9</b> | <b>318,2</b> | <b>1.286.640</b>            | <b>59,4</b> |
| Ene-Abr 2010           | 4,3         | 204,8        | 365.990                     | 76,1        | 8,2         | 234,8        | 389.806                     | 71,3        |
| May-Ago 2010           | 16,4        | 233,6        | 785.884                     | 59,7        | 21,9        | 121,4        | 818.342                     | 35,6        |
| Sep-Dic 2010           | 8,0         | 160,1        | 356.130                     | 68,2        | 11,5        | 180,6        | 351.549                     | 67,8        |
| Ene10-Ago10            | 10,4        | 438,4        | 1.151.874                   | 67,9        | 15,1        | 356,2        | 1.208.148                   | 53,4        |
| <b>Anual (2010)</b>    | <b>9,6</b>  | <b>598,5</b> | <b>1.508.004</b>            | <b>68,0</b> | <b>13,9</b> | <b>536,8</b> | <b>1.559.697</b>            | <b>58,2</b> |
| Ene-Abr 2011           | 5,9         | 172,3        | 394.042                     | 74,0        | 9,1         | 181,4        | 384.367                     | 70,2        |
| May-Ago 2011           | 17,2        | 114,1        | 827.827                     | 57,7        | 22,2        | 203,2        | 780.365                     | 32,7        |
| Sep-Dic 2011           | 10,3        | 93,2         | 407.337                     | 67,7        | 13,0        | 98,0         | 342.372                     | 58,4        |
| Ene11-Ago11            | 11,5        | 286,4        | 1.221.870                   | 65,8        | 15,7        | 384,6        | 1.164.732                   | 51,4        |
| <b>Anual (2011)</b>    | <b>11,1</b> | <b>379,6</b> | <b>1.629.207</b>            | <b>66,5</b> | <b>14,8</b> | <b>482,6</b> | <b>1.164.732</b>            | <b>53,8</b> |

TM: Temperatura media, P: Precipitación, RS: Radiación solar, HR: Humedad relativa, n.d: no disponible.

### 3.3 *Productividad de biomasa: muestreos*

#### 3.3.1 *Biomasa leñosa*

En los dos ensayos llevados a cabo, la brotación se consideró que se alcanzó cuando el 75% de las plantas habían brotado y se controló el momento del cerrado de yemas para, con ambos datos, determinar la duración del periodo vegetativo.

Se contabilizó el número de plantas muertas cada año para estimar el porcentaje de supervivencia. Además, se contabilizó el número de brotes por cepa y el número de brotes existentes según sea el brote menor o mayor a 130 cm de altura.

En el año de implantación (2006) se realizó una corta total de la parcela a efectos de activar el número de brotes.

Los valores de producción se refieren siempre a materia seca. La biomasa de las raíces no se registró. Según Lodhiyal y Lodhiyal (1997b), se estimó que las raíces representan alrededor del 20% de la biomasa aérea (tallo + ramas).

##### 3.3.1.1 *Ensayo 1*

La productividad se evaluó al final de cada período de crecimiento, a través de un muestreo destructivo; se cortaron al azar 75 árboles por año distribuidos en 3 repeticiones, durante el periodo 2006-2010 (Figura 3.2), calculando la humedad de la biomasa recién recolectada.

Además del peso seco por planta, en los 75 árboles seleccionados, se midieron la altura total, y el diámetro a 10 y 130 cm de altura, salvo en el 2009 que, debido a la dificultad en la toma del diámetro basal a 10 cm de altura, solo se tomó a 130 cm. En 2008 las medidas se limitaron a la altura dominante.

##### 3.3.1.2 *Ensayo 2*

Para evaluar la producción de biomasa seca por planta, a partir del año de implantación, se estableció un primer ciclo de corta de dos años y un segundo ciclo de tres años, realizando muestreos destructivos, cortando 81 árboles por clon distribuidos en 3 repeticiones, para estimar la producción de biomasa del año 2006, 2008 y 2011. En

Soria, en los años intermedios (2007, 2009 y 2010), se realizaron estimaciones de productividad también, con muestreos destructivos anuales, cortando un total de 9 árboles por clon.

Al final del periodo vegetativo de 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010 se midieron la altura total, y el diámetro a 130 y a 10 cm de altura (menos en el año 2008) y se obtuvo el peso seco por planta. En el año 2011, solo se midió el diámetro basal a 10 cm de altura.

En ambos ensayos (ensayo 1 y ensayo 2) se calculó el área basimétrica ( $\text{mm}^2 \text{ planta}^{-1}$ ) de cada cepa, considerado esta como variable independiente para obtener ecuaciones de regresión a fin de poder estimar la producción de biomasa por métodos no destructivos.

Un modelo de regresión se obtuvo al final de cada período vegetativo del año 2006, 2007 y 2009 para el ensayo 1 mientras que, para el ensayo 2 se obtuvo un modelo para el año de implantación y al final del primer ciclo de corta (2 años). El modelo de regresión final fue validado utilizando valores reales de producción, para así determinar el grado de semejanza entre el modelo de regresión y la realidad que pretende representar.

### 3.3.2 *Biomasa foliar*

La capacidad de reabsorción se determinó solamente en la zona experimental de Soria dentro del ensayo 2. Este parámetro puede definirse como el nivel mínimo al cual el contenido de nutrientes podría reducirse en las hojas antes de la abscisión (Killingbeck 1996). Para estimar la capacidad de reabsorción, unas hojas fueron cogidas antes de la abscisión (a principios de noviembre) y, otras hojas, se cogieron después de su caída (últimos días de noviembre).

Se realizó un método destructivo consistente en la corta y defoliación del árbol antes de la abscisión a fin de determinar la reabsorción de bioelementos.

La cantidad de hojas caídas se evaluó, aplicando alguna de las metodologías no destructivas utilizadas entre otros, por Aponte et al. (2013) e Incerti et al. (2011), la cual consiste en la utilización de trampas para recoger las hojas caídas a lo largo de un

periodo de tiempo, y la metodología seguida por Osono y Takeda (2004), que consistió en recolectar las hojas recién caídas al suelo.

De forma más detallada las diferentes metodologías llevadas a cabo para cuantificar la cantidad de hojas caídas han sido:

1- Con trampas permanentes a lo largo del año.

Consistió en recoger, las hojas caídas de los árboles, mensualmente en un total de 36 trampas distribuidas al azar en cada una de las 3 repeticiones de la plantación con el fin de estimar la cantidad de hojarasca foliar caída durante el período vegetativo. Cada trampa consiste en una caja de plástico de 0,25 m<sup>2</sup> y una bolsa sintética con una luz de malla de 1 mm. La bolsa se unió a la caja y se elevó unos 5 cm del suelo de la misma. La trampa en su conjunto (caja perforada y bolsa permeable), así como la posición de la bolsa fue diseñada para permitir el rápido drenaje del agua de lluvia y mantener las hojas en buen estado (Foto 3.3). En el ensayo 1 y 2, en Soria, se realizó este muestreo durante 5 años, 2006-2010 para el clon I-214 y 2007-2011 para el clon AF2 (Foto 3.4), respectivamente, con el fin de registrar datos de árboles de distinta edad. Además, también para el clon I-214, en el ensayo 2, se registró la cantidad de hojas a lo largo de un solo año (2008).



**Foto 3.3:** Trampas para recogida de hojas



**Foto 3.4:** Trampa colocada en el ensayo 2

## 2- Muestreo sobre las hojas caídas al suelo

Consistió en recolectar, mensualmente, las hojas que han caído en  $1\text{ m}^2$ . La zona de muestreo se delimitó mediante estaquillas y cuerdas, definiendo así rectángulos con una superficie de  $1\text{ m}^2$ . Este método se realizó únicamente para el definido como ensayo 2 en Soria y para el clon I-214.

## 3- Defoliación del árbol, inmediatamente antes de la caída de las hojas

El muestreo consistió en seleccionar aleatoriamente 81 árboles, cortarlos y separar madera y hojas justo antes de su caída (a principios de noviembre) para asignar el peso a las diferentes partes del árbol que componen la biomasa aérea (hojas, ramas y tallos). Este método se realizó únicamente para el definido como ensayo 2, en ambas localizaciones y clones estudiados.

En todos los casos, posteriormente a la recogida de las hojas, estas se llevaban al laboratorio, para proceder a su limpieza con cepillos, secado ( $60^\circ\text{C}$ ), y pesaje para determinar el peso seco de la hojarasca foliar recogida ( $\text{g m}^{-2}$ ).

Con la producción foliar y la leñosa coincidentes en el tiempo se obtuvo la relación biomasa foliar frente a biomasa leñosa (tallos + ramas), con el fin de poder estimar la producción de biomasa foliar anual en función de la biomasa leñosa obtenida (Tabla 3.2).

**Tabla 3.2:** Cronograma de evaluación de ratio (Hojas/(ramas + tallos) por distintos procedimientos

| Método                                                                  | Localización | Año  | Ensayo 1         |                                                                            | Ensayo 2         |                                                                            |                  |                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------|------|------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|                                                                         |              |      | Clon I-214       |                                                                            | Clon I-214       |                                                                            | Clon AF-2        |                                                                            |
|                                                                         |              |      | Ratio<br>H/(T+R) | Cantidad de<br>hojas caídas<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | Ratio<br>H/(T+R) | Cantidad de<br>hojas caídas<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | Ratio<br>H/(T+R) | Cantidad de<br>hojas caídas<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) |
| 1. Con trampas permanentes a lo largo del año                           | Soria        | 2006 |                  |                                                                            |                  |                                                                            |                  |                                                                            |
|                                                                         |              | 2007 |                  |                                                                            |                  |                                                                            |                  |                                                                            |
|                                                                         |              | 2008 |                  |                                                                            |                  |                                                                            |                  |                                                                            |
|                                                                         |              | 2009 |                  |                                                                            |                  |                                                                            |                  |                                                                            |
|                                                                         |              | 2010 |                  |                                                                            |                  |                                                                            |                  |                                                                            |
|                                                                         |              | 2011 |                  |                                                                            |                  |                                                                            |                  |                                                                            |
| 2. Muestreo sobre las hojas caídas al suelo                             | Soria        | 2008 |                  |                                                                            |                  |                                                                            |                  |                                                                            |
| 3. Defoliación del árbol, inmediatamente antes de la caída de las hojas | Soria        | 2006 |                  |                                                                            |                  |                                                                            |                  |                                                                            |
|                                                                         | Madrid       |      |                  |                                                                            |                  |                                                                            |                  |                                                                            |

### 3.4 *Descomposición hojarasca foliar*

Para el estudio de la descomposición de la hojarasca foliar y los patrones de la dinámica de nutrientes en la descomposición de la misma se utilizó el método de las bolsas de hojarasca (Van Wesemael 1993), el cual permite la evaluación de la descomposición de las hojas mediante la estimación de su pérdida de peso. La caída de la hojarasca foliar comenzó a mediados de julio, y duro hasta finales de noviembre. Las hojas se recogen y se distribuyen en bolsas de nylon (18 cm x 18 cm), de 4 mm de luz de malla, las cuales se sujetan al suelo con horquillas de acero (Foto 3.5). El tamaño de malla de las bolsas se consideró lo suficientemente pequeño para evitar grandes pérdidas de las hojas más pequeñas, pero lo suficientemente grande para permitir la actividad microbiana aeróbica y la libre entrada de animales pequeños del suelo, tratando así de evitar interferir en la actividad de la mesofauna. En el ensayo 1, a finales de diciembre de 2006, se introdujeron 7,2 g MS de hojas en cada bolsa, un total de 54 bolsas se colocaron en la plantación, distribuidas en 3 repeticiones, hasta su recogida periódica (Tabla 3.3). Aunque el ensayo 1 fue programado para 3 años, sólo 32 meses se pudieron monitorizar, desde diciembre 2006 hasta agosto 2009, debido a que la mayoría de las bolsas se desintegraron antes de la última fecha de muestreo programada. En el ensayo 2, a finales de diciembre de 2007, en cada bolsa se introdujeron aproximadamente 14,2 g MS de hojas, en concreto un total de 72 bolsas se colocaron, en Soria y en Madrid, distribuidas en 3 repeticiones, y se dejaron dentro de la plantación hasta que se recolectaron. Aunque el ensayo 2 fue programado para 4 años, en Soria sólo 32 meses se pudieron monitorizar (diciembre 2007 - agosto 2010), debido a que las bolsas de hojarasca foliar utilizadas para el resto de muestreos (36, 40, 44 y 48 meses) se encontraron completamente rotas antes de la fecha final de muestreo programada.



**Foto 3.5:** Bolsas de hojarasca, de 4 mm de luz de malla, colocadas en los ensayos

En todos los casos, en cada fecha de muestreo (cada 4 meses), 6 bolsas de hojarasca se retiraban al azar (2 de cada repetición). Los residuos, procedentes tanto del suelo como de restos vegetales, fueron cuidadosamente separados de la hojarasca de la muestra recogida, mediante el uso de cepillos y pinceles, antes de pesar.

Muestras control se recogieron al comienzo del experimento, y se secaron, se molieron ( $<2$  mm) y se conservaron a  $5^{\circ}\text{C}$ . Dos muestras control se analizaron de forma simultánea con la hojarasca recolectada en el campo con el fin de verificar que la composición química de las hojas permanece constante cuando se seca, almacena, y conserva a  $5^{\circ}\text{C}$  durante los meses de duración del estudio de descomposición. Las variaciones que se encontraron en la composición química de las muestras de control fueron inferiores al 5%.

**Tabla 3.3:** Cronograma de actividades realizadas en cada ensayo

| Localización | Año      | 2006 |   |    |        | 2007 |     |     |     | 2008 |     |     |     | 2009 |     |     |      | 2010 |    |    |    | 2011 |    |    |    |
|--------------|----------|------|---|----|--------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|----|----|----|------|----|----|----|
|              | Meses    |      |   |    | 0      |      | 4   | 8   | 12  |      | 16  | 20  | 24  |      | 28  | 32  | 36   |      |    |    |    |      |    |    |    |
|              | Días     |      |   |    | 0      |      | 121 | 243 | 365 |      | 486 | 608 | 730 |      | 851 | 973 | 1095 |      |    |    |    |      |    |    |    |
| Soria        | Ensayo 1 | --   | P | -- | C<br>B | --   | M   | M   | M   | --   | M   | M   | M   | --   | M   | M   | C    | --   | -- | -- | -- | --   | -- | -- | -- |

| Localización | Año      | 2006 |   |    |   | 2007 |    |    |   | 2008 |     |     |        | 2009 |     |     |     | 2010 |     |     |      | 2011 |      |      |      |
|--------------|----------|------|---|----|---|------|----|----|---|------|-----|-----|--------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|------|
|              | Meses    |      |   |    |   |      |    |    | 0 |      | 4   | 8   | 12     |      | 16  | 20  | 24  |      | 28  | 32  | 36   |      | 40   | 44   | 48   |
|              | Días     |      |   |    |   |      |    |    | 0 |      | 121 | 243 | 365    |      | 486 | 608 | 730 |      | 851 | 973 | 1095 |      | 1216 | 1338 | 1460 |
| Soria        | Ensayo 2 | --   | P | -- | C | --   | -- | -- | B | --   | M   | M   | C<br>M | --   | M   | M   | M   | --   | M   | M   | M    | --   | --   | --   | --   |
| Madrid       | Ensayo 2 | --   | P | -- | C | --   | -- | -- | B | --   | M   | M   | C<br>M | --   | M   | M   | M   | --   | M   | M   | M    | --   | M    | M    | M    |

P = Plantación, C = Cortas totales, B = Colocación de bolsas con las hojas, M= Muestreo; El color gris marca cuando se llevaron a cabo analíticas de laboratorio

### 3.5 Muestreo de la biomasa

El muestreo de la biomasa leñosa, para su caracterización, se realizó partiendo de 3 plantas completas (tallos + ramas) elegidas al azar de cada repetición. Cada una de ellas se troceó, se secó en estufa a 105°C hasta pesada constante de acuerdo a la norma UNE-EN14774-2, se molió a menos de 2 mm y se homogeneizó. A partir de aquí se coge la cantidad necesaria para determinar los contenidos de C, N, P, K. Estas determinaciones se realizaron sobre la producción de cada año en Soria, en los dos ensayos llevados a cabo y, en Madrid se realizaron sobre las cortas finales de cada ciclo (2008 y 2011).

La materia seca de la hojarasca foliar de las bolsas recogidas en el campo, previa limpieza de impurezas, se secó hasta pesada constante a 60°C o a 105°C según requerimientos de las determinaciones, y se molió a 1mm en un mortero de ágata para su posterior análisis.

En ambos ensayos los contenidos de C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S se determinaron, sobre las hojas recolectadas al inicio del experimento y después de 8, 20, y 32 meses (Tabla 3.3). También, en la zona experimental de Madrid, dentro del ensayo 2, se analizaron estos elementos después de 44 y 48 meses de exposición en el campo, puesto que ahí el ensayo duro más tiempo que en la localidad de Soria, donde tan solo se pudo llevar a cabo analíticas hasta los 32 meses.

Además, en el ensayo 2, se determinó el contenido de lignina de la hojarasca foliar, para ambas localizaciones, al inicio del experimento, y después de 121, 243, 608 y 973 días y, en la localidad de Madrid, también se determinó a los 1095 y 1216 días.

### 3.6 Muestreo del suelo

En el ensayo 1, el suelo se muestreó antes de la plantación y al final del estudio de descomposición de hojarasca foliar (32 meses). En cada muestreo, se tomaron seis muestras medias de suelo en un radio de 50 cm de distancia, a 3 profundidades diferentes: 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm (Foto 3.6).

Durante el ensayo 2, se muestreo el suelo fuera de la plantación donde no había influencia de hojarasca foliar (suelo testigo), al inicio y final del estudio. Se tomaron seis muestras medias de suelo a diferente profundidad (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm). En paralelo, el suelo de la zona de estudio de descomposición de hojarasca foliar se muestreo al inicio y final del ensayo, tomando seis muestras medias de suelo y en cada

una se tomó una muestra a la profundidad de 0-20 cm. Se eligió esta profundidad dado que se considera adecuada para medir el C del suelo y otros factores (Harrison et al. 2011; Zhang et al. 2011; McGuire et al. 2012; Salehi et al. 2013).



**Foto 3.6:** Calicata realizada para la toma de muestras de suelo a distintas profundidades

Previo a los análisis de suelo las muestras se secaron hasta peso constante en un horno a 40°C, se tamizaron (tamaño de malla de 2 mm) y las piedras se separaron (fracción mayor de 2 mm). La fracción por debajo de 2 mm se utilizó para la determinación de las propiedades del suelo.

### 3.7 Métodos de análisis de la biomasa

Los contenidos de C y N total se determinaron mediante combustión catalítica y detección por infrarrojos (C) y, detección por conductividad térmica (N), usando un analizador elemental (TruSpec, LECO) y de acuerdo a la norma internacional UNE-EN ISO 16948:2015 “Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno” (anterior EN 15104).

El contenido total de S se determinó mediante cromatografía iónica, previa combustión de la muestra en una bomba calorimétrica y lixiviación de los gases de combustión con una disolución acuosa receptora, de acuerdo a la norma internacional UNE-EN ISO 16994:2015 “Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro” (anterior EN 15289).

La determinación de P, K, Ca, Mg y Mn se llevó a cabo mediante digestión ácida en un horno microondas y análisis por espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), utilizando un espectrómetro Thermo Jarrell Ash,

modelo IRIS AP y siguiendo la norma internacional UNE-EN ISO 16967:2015 “Biocombustibles sólidos. Determinación de elementos mayoritarios. Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na y Ti” (anterior EN 15290).

La exactitud de los resultados de C, N, S, P, K, Ca, Mg y Mn se comprobó utilizando diferentes materiales de referencia certificados de origen vegetal, encontrándose los valores experimentales en el rango de concentraciones certificado. Los materiales de referencia certificados utilizados han sido los siguientes: ramas y hojas de arbustos (DC73348 y DC73349) del China National Analysis Center for Iron and Steel, hojas de árboles frutales (502-055) y alfalfa (502-273) de Leco Instruments, hojas de melocotonero (SRM 1547), de manzano (SRM 1515) y de tomatera (SRM 1573a) del National Institute of Standards and Technology (NIST), acículas de abeto (CRM 101) del Community Bureau of Reference (BCR) y paja de centeno (ERM-CD281) del European Reference Materials.

La repetibilidad y reproducibilidad de los métodos analíticos utilizados se ha estimado utilizando muestras representativas de material vegetal y se ha expresado para cada muestra y elemento mediante sus típicos parámetros descriptivos (desviaciones estándar y coeficientes de variación), de acuerdo a la norma internacional ISO 5725-2:1994 “Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method” y mediante las incertidumbres (combinada y expandida) asociadas en cada caso, siguiendo los criterios establecidos en las guías internacionales “Guide to the expression of uncertainty in measurement” (ISO 1993) y “Quantifying uncertainty in analytical measurement” (EURACHEM 2000). La desviación estándar relativa o coeficiente de variación de la repetibilidad ha sido inferior al 5% en todos los casos. Tanto el coeficiente de variación de la reproducibilidad, como la incertidumbre expandida relativa en función del contenido medio del elemento en cada material, para el factor de cobertura apropiado en función de los grados de libertad en cada caso y a un nivel de confianza del 95% ha sido inferior a un 10% (15% en el caso del S).

La determinación de lignina se ha hecho, mediante hidrólisis ácida con ácido sulfúrico al 72%, siguiendo la Norma UNE 57100:1986 “Pastas para papel. Determinación del contenido de lignina insoluble en ácido”.

### 3.8 Métodos de análisis del suelo

Se realizó el análisis de tamaño de partículas utilizando la técnica de la pipeta de Robinson (Gee y Bauder 1986) para determinar el porcentaje de arcilla, limo y arena. Con esta técnica lo que se busca es medir la concentración de partículas dispersas del suelo por unidad de volumen de la suspensión. La determinación de la densidad aparente se llevó a cabo a través del método del cilindro, el cual consiste en introducir un cilindro metálico en el suelo y luego enrasarlo una vez extraído y, determinar la masa de suelo seco que quedó en su interior (Blake y Hartge 1986; Campbell y Henshall 1991).

El pH se determinó por un método potenciométrico (1: 2,5, suelo: agua); el C orgánico se analizó (método de Walkley-Black) por oxidación con dicromato de potasio en medio sulfúrico (Jackson 1976), y el contenido total de nitrógeno ( $N_t$ ) se analizó mediante un microKjeldhal Bouat-Afora. En Soria, tanto en el ensayo 1 como en el ensayo 2, el fósforo disponible ( $P_d$ ) se determinó a través del método de Bray y Kurt (1945). En Madrid, el P se determinó empleando el método de Olsen y Watanabe (Olsen et al. 1954). Para ambos métodos se usó un espectrofotómetro UV-visible (Spectronic-Genesys-Unicam). Las concentraciones de potasio intercambiable y soluble ( $K_d$ ), se realizan por extracción con acetato de amonio neutro (1 N), determinado por espectrometría de absorción atómica (Varian AA-1475).

### 3.9 Cálculos y análisis de datos

Un modelo exponencial negativo con una asíntota se utilizó para estimar la constante de descomposición anual (K), y se expresó como  $\text{año}^{-1}$  (Harmon et al. 2009):

$$M_t = M_0 * e^{-kt} + S_0 \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde  $M_t$  es la masa residual (%) en el tiempo t (años),  $M_0$  es la masa inicial del material sometido a pérdida (%),  $S_0$  es la asíntota (%), y k es la constante de descomposición. La suma de  $M_0$  y  $S_0$  es el 100%, y estimando uno de ellos se puede obtener el otro (Harmon et al. 2009).

Los contenidos de C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S de la hojarasca foliar se han referido al peso seco de la que quedaba en las bolsas en cada muestreo. La materia seca remanente se expresó como un porcentaje de la cantidad de hojarasca foliar respecto al momento inicial (Van Wesemael 1993). La liberación de nutrientes se expresó como el

valor relativo ponderado (Guo y Sims 1999). La evolución de la descomposición de la materia orgánica y los distintos bioelementos (C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S) se expresó en valores absolutos, indicando sus pérdidas o ganancias ( $\pm\Delta$ ) como un porcentaje con respecto a la cantidad inicial (referido siempre 1 g MS) (Santa Regina et al. 1986).

Se calculó la liberación gradual de nutrientes a través de la hojarasca foliar acumulada en el suelo. Cada año, las hojas acumuladas a lo largo de varios años se registran, por lo tanto la cantidad de nutrientes liberados de la hojarasca foliar, en un año determinado, es el sumatorio de la parte proporcional que no fue liberada en años anteriores. Además, se calculó un índice medio que relaciona la producción de hojas con la de biomasa aérea leñosa, el cual servirá para estimar la cantidad anual de hojas caídas que iniciaran su proceso de descomposición.

Por otro lado, tan solo en el ensayo 2 y para la localización de Soria, se calculó el porcentaje de eficiencia de reabsorción (RE) determinando la diferencia entre la concentración máxima de un nutriente (N, P y K) en las hojas verdes y aquella encontrada en la hojarasca foliar caída (Henderson y Jose 2012). También se calculó la eficiencia de uso del nutriente a nivel de la hoja (LNUE) utilizando el contenido de nutrientes nivel de hoja y tasas de reabsorción de la hojarasca foliar (Henderson y Jose 2012).

A través del software Statgraphics Plus 5.0 se realizaron diferentes análisis de varianza (ANOVA) para detectar diferencias significativas entre las variables aquí estudiadas. La homogeneidad de varianza y normalidad se probaron antes de analizar los datos con ANOVA. También se calcularon modelos de regresión utilizando el mismo software.



## **RESULTADOS**



## 4 RESULTADOS

### 4.1 Producción de biomasa

#### 4.1.1 Biomasa leñosa

##### 4.1.1.1 Ensayo 1

##### 4.1.1.1.1 Periodo vegetativo de la plantación

La duración del periodo vegetativo, en Soria, para el clon I-214 a lo largo de 2006, 2007, 2008 y 2009, se muestra en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Duración del periodo vegetativo para el clon I-214 en Soria

| Clon  | 2006    |       |      | 2007    |       |      | 2008    |       |      | 2009    |       |      |
|-------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|
|       | Inicial | Final | Días | Inicial | Final | Días | Inicial | Final | Días | Inicial | Final | Días |
| I-214 | 18/04   | 20/09 | 155  | 20/04   | 28/09 | 161  | 24/04   | 10/09 | 139  | 03/04   | 15/09 | 165  |

##### 4.1.1.1.2 Supervivencia

En la Tabla 4.2 se muestra el porcentaje de supervivencia de la plantación de I-214 a lo largo de los años comprendidos entre el 2006 y 2009.

**Tabla 4.2:** Porcentaje de supervivencia de los años 2006 a 2009 para el clon I-214

| Año  | Supervivencia (%)            |
|------|------------------------------|
| 2006 | 85,4 $\pm$ 3,6 <sup>a</sup>  |
| 2007 | 81,3 $\pm$ 27,2 <sup>a</sup> |
| 2008 | 83,3 $\pm$ 9,5 <sup>a</sup>  |
| 2009 | 81,3 $\pm$ 6,3 <sup>a</sup>  |

Los valores medios en columna con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre años para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 75$ ).

#### 4.1.1.1.3 Número de brotes, diámetros y altura

En la Tabla 4.3 se muestra la edad de la plantación, así como una comparativa entre el número de brotes por planta, el diámetro basal a 10 y normal a 130 cm de altura y la altura dominante a lo largo de 2006, 2007, 2008 y 2009 para el clon I-214. La edad de la plantación se indica en función de la edad de la raíz (R) y la del tallo (T) en años.

**Tabla 4.3:** Número medio de brotes por planta, diámetro medio por brote a 10 y 130 cm de altura y altura media dominante para el clon I-214

| Año  | Edad de plantación (años) | Nº de brotes/cepa       | D <sub>10</sub> medio (mm/brote) | D <sub>130</sub> medio (mm/brote) | H <sub>dom</sub> (cm)     |
|------|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 2006 | R1T1                      | 1,3 ± 0,7 <sup>a</sup>  | 17,7 ± 5,1 <sup>a</sup>          | 9,0 ± 3,2 <sup>a</sup>            | 180,6 ± 38,2 <sup>a</sup> |
| 2007 | R2T1                      | 8,2 ± 2,6 <sup>b</sup>  | 11,0 ± 2,9 <sup>b</sup>          | 7,2 ± 1,6 <sup>b</sup>            | 197,5 ± 25,7 <sup>a</sup> |
| 2008 | R3T2                      | 7,1 ± 2,0 <sup>c</sup>  | -                                | -                                 | 437,8 ± 74,4 <sup>b</sup> |
| 2009 | R4T3                      | 7,4 ± 2,6 <sup>bc</sup> | -                                | 16,7 ± 4,1 <sup>c</sup>           | 458,7 ± 67,7 <sup>b</sup> |

R: raíz, T: tallo, D<sub>10</sub>: diámetro basal por brote a 10 cm de altura, D<sub>130</sub>: diámetro normal por brote a 130 cm de altura, H<sub>dom</sub>: altura dominante. Diferentes letras en cada columna indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% (P < 0,05, n = 75).

#### 4.1.1.1.4 Producciones

Las producciones acumuladas de biomasa leñosa obtenidas en Soria para el clon I-214 en una plantación con densidad de 25.000 plantas ha<sup>-1</sup> se indican en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4:** Producciones medias acumuladas de biomasa leñosa (Mg MS ha<sup>-1</sup>) obtenidas para el clon I-214 en el ensayo 1

| Año  | Edad de plantación (años) | Producción (Mg MS ha <sup>-1</sup> ) |
|------|---------------------------|--------------------------------------|
| 2006 | R1T1                      | 2,6 ± 1,3 <sup>a</sup>               |
| 2007 | R2T1                      | 7,5 ± 1,9 <sup>b</sup>               |
| 2008 | R3T2                      | 18,3 ± 8,3 <sup>c</sup>              |
| 2009 | R4T3                      | 22,7 ± 12,1 <sup>c</sup>             |

R: raíz, T: tallo

#### *4.1.1.2 Ensayo 2*

##### *4.1.1.2.1 Periodo vegetativo de la plantación*

La duración del periodo vegetativo, para Soria y Madrid, para los clones I-214 y AF2 a lo largo de 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011 se muestra en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5:** Duración del periodo vegetativo para los clones I-214 y AF2 en Soria y Madrid

| Localización | Clon  | 2006    |       |      | 2007    |       |      | 2008    |       |      | 2009    |       |      | 2010    |       |      | 2011    |       |      |
|--------------|-------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|
|              |       | Inicial | Final | Días | Inicial | Final | Días | Inicial | Final | Días | Inicial | Final | Días | Inicial | Final | Días | Inicial | Final | Días |
| Soria        | I-214 | 18/04   | 20/09 | 155  | 20/04   | 28/09 | 161  | 24/04   | 10/09 | 139  | 03/04   | 15/09 | 165  | 21/04   | 17/09 | 149  | 07/04   | 16/09 | 162  |
|              | AF2   | 18/04   | 20/09 | 155  | 20/04   | 28/09 | 161  | 03/05   | 10/09 | 130  | 04/05   | 30/09 | 149  | 04/05   | 17/09 | 136  | 14/04   | 16/09 | 155  |
| Madrid       | I-214 | 10/04   | n.d.  | n.d. | 28/03   | n.d.  | n.d. | 30/03   | n.d.  | n.d. | n.d.    | n.d.  | n.d. | n.d.    | n.d.  | n.d. | n.d.    | n.d.  | n.d. |
|              | AF2   | 25/04   | n.d.  | n.d. | 01/04   | n.d.  | n.d. | 15/04   | n.d.  | n.d. | n.d.    | n.d.  | n.d. | n.d.    | n.d.  | n.d. | n.d.    | n.d.  | n.d. |

n.d: no disponible.

#### 4.1.1.2.2 Supervivencia

En la Tabla 4.6 y 4.7 se muestra el porcentaje de supervivencia para Soria y Madrid respectivamente a lo largo de 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011 del clon AF2 e I-214.

**Tabla 4.6:** Comparativa del porcentaje de supervivencia entre los años dentro de un mismo clon para Soria

| Año  | Supervivencia (%)        |                         |
|------|--------------------------|-------------------------|
|      | AF2                      | I-214                   |
| 2006 | 95,1 ± 11,3 <sup>a</sup> | 98,8 ± 3,7 <sup>a</sup> |
| 2007 | 87,7 ± 17,1 <sup>a</sup> | 98,8 ± 3,7 <sup>a</sup> |
| 2008 | 93,8 ± 11,3 <sup>a</sup> | 98,8 ± 3,7 <sup>a</sup> |
| 2009 | 95,1 ± 11,3 <sup>a</sup> | 98,8 ± 3,7 <sup>a</sup> |
| 2010 | 93,8 ± 11,3 <sup>a</sup> | 98,8 ± 3,7 <sup>a</sup> |
| 2011 | 95,1 ± 11,3 <sup>a</sup> | 97,5 ± 4,9 <sup>a</sup> |

Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre años para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 81$ ).

**Tabla 4.7:** Comparativa del porcentaje de supervivencia entre los años dentro de un mismo clon para Madrid

| Año  | Supervivencia (%)        |                          |
|------|--------------------------|--------------------------|
|      | AF2                      | I-214                    |
| 2006 | 96,3 ± 5,6 <sup>a</sup>  | 100,0 ± 0,0 <sup>a</sup> |
| 2007 | 94,4 ± 8,4 <sup>a</sup>  | 93,8 ± 14,8 <sup>a</sup> |
| 2008 | 94,4 ± 8,4 <sup>a</sup>  | 93,8 ± 14,8 <sup>a</sup> |
| 2009 | 81,5 ± 9,6 <sup>b</sup>  | 46,0 ± 26,0 <sup>b</sup> |
| 2010 | 79,0 ± 8,7 <sup>b</sup>  | 44,4 ± 30,6 <sup>b</sup> |
| 2011 | 76,5 ± 11,7 <sup>b</sup> | 44,4 ± 32,4 <sup>b</sup> |

Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre años para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 81$ ).

#### *4.1.1.2.4 Número de brotes, diámetros y altura*

En la Tabla 4.8 y 4.9 se muestra la edad de plantación, así como una comparativa entre el número de brotes por planta, el diámetro basal a 10 y normal a 130 cm de altura y la altura dominante a lo largo de 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011 para cada clon en Soria y Madrid, respectivamente.

**Tabla 4.8:** Número medio de brotes por planta, diámetro medio por brote a 10 y 130 cm de altura y altura media dominante para la localización de Soria

| Año  | Edad de<br>plantación<br><br>(años) | Nº de brotes/cepa        | D <sub>10</sub>          | D <sub>130</sub>        | H <sub>dom</sub>          | Nº de brotes/cepa      | D <sub>10</sub>          | D <sub>130</sub>        | H <sub>dom</sub>          |
|------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
|      |                                     |                          | (mm/brote)               | (mm/brote)              | (cm)                      |                        | (mm/brote)               | (mm/brote)              | (cm)                      |
| AF2  |                                     |                          |                          |                         |                           | I-214                  |                          |                         |                           |
| 2006 | R1T1                                | 1,0 ± 0,0 <sup>a</sup>   | 16,9 ± 5,8 <sup>ab</sup> | 9,3 ± 3,4 <sup>ab</sup> | 159,3 ± 55,6 <sup>a</sup> | 1,0 ± 0,0 <sup>a</sup> | 17,1 ± 3,9 <sup>a</sup>  | 7,0 ± 2,9 <sup>a</sup>  | 167,0 ± 36,4 <sup>a</sup> |
| 2007 | R2T1                                | 3,7 ± 1,5 <sup>bc</sup>  | 13,9 ± 4,0 <sup>c</sup>  | 8,0 ± 2,8 <sup>a</sup>  | 205,5 ± 53,0 <sup>b</sup> | 4,8± 1,8 <sup>bc</sup> | 12,8 ± 3,5 <sup>bc</sup> | 7,2 ± 2,2 <sup>a</sup>  | 225,0 ± 37,9 <sup>b</sup> |
| 2008 | R3T2                                | 2,8 ± 1,5 <sup>d</sup>   | -                        | 16,1 ± 6,5 <sup>c</sup> | 337,0 ± 88,0 <sup>c</sup> | 4,0± 1,7 <sup>d</sup>  | -                        | 12,8 ± 4,1 <sup>b</sup> | 336,1 ± 62,9 <sup>c</sup> |
| 2009 | R4T1                                | 4,3± 2,5 <sup>c</sup>    | 12,9 ± 4,6 <sup>c</sup>  | 8,0 ± 3,3 <sup>ab</sup> | 196,8 ± 72,8 <sup>b</sup> | 7,6± 2,9 <sup>e</sup>  | 9,4 ± 2,7 <sup>d</sup>   | 5,1 ± 1,6 <sup>c</sup>  | 164,6 ± 69,5 <sup>a</sup> |
| 2010 | R5T2                                | 3,6 ± 2,0 <sup>bcd</sup> | 14,8 ± 6,5 <sup>ac</sup> | 10,6 ± 3,9 <sup>b</sup> | 263,2 ± 77,7 <sup>d</sup> | 5,7± 2,6 <sup>c</sup>  | 11,2 ± 3,8 <sup>bd</sup> | 8,3 ± 3,5 <sup>a</sup>  | 221,4 ± 71,8 <sup>b</sup> |
| 2011 | R6T3                                | 3,5± 2,1 <sup>b</sup>    | 18,8 ± 8,5 <sup>b</sup>  | -                       | -                         | 4,7 ± 2,1 <sup>b</sup> | 13,8 ± 4,1 <sup>c</sup>  | -                       | -                         |

R: raíz, T: tallo, D<sub>10</sub>: diámetro basal por brote a 10 cm de altura, D<sub>130</sub>: diámetro normal por brote a 130 cm de altura, H<sub>dom</sub>: altura dominante. Diferentes letras en cada columna indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% (P < 0,05, n = 81).

**Tabla 4.9:** Número medio de brotes por planta, diámetro medio por brote a 10 y 130 cm de altura y altura media dominante para la localización de Madrid

| Año    | Edad de<br>plantación | Nº de brotes/cepa       | D <sub>10</sub>          | D <sub>130</sub>         | H <sub>dom</sub>            | Nº de brotes/cepa        | D <sub>10</sub>         | D <sub>130</sub>        | H <sub>dom</sub>            |
|--------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
|        |                       |                         | (mm/brote)               | (mm/brote)               | (cm)                        |                          | (mm/brote)              | (mm/brote)              | (cm)                        |
| (años) |                       | AF2                     |                          |                          |                             | I-214                    |                         |                         |                             |
| 2006   | R1T1                  | 1,0 ± 0,0 <sup>a</sup>  | 22,0 ± 9,0 <sup>a</sup>  | 14,7 ± 7,1 <sup>ab</sup> | 249,7 ± 104,4 <sup>a</sup>  | 1,0 ± 0,0 <sup>a</sup>   | 21,0 ± 5,3 <sup>a</sup> | 12,7 ± 4,7 <sup>a</sup> | 256,3 ± 68,5 <sup>ab</sup>  |
| 2007   | R2T1                  | 3,9 ± 1,8 <sup>a</sup>  | 16,4 ± 7,8 <sup>b</sup>  | 13,7 ± 4,0 <sup>ab</sup> | 311,6 ± 127,5 <sup>ab</sup> | 6,6 ± 2,8 <sup>b</sup>   | 10,1 ± 3,3 <sup>b</sup> | 7,8 ± 3,5 <sup>b</sup>  | 236,2 ± 69,1 <sup>a</sup>   |
| 2008   | R3T2                  | 6,3 ± 2,9 <sup>b</sup>  | -                        | 20,1 ± 9,0 <sup>c</sup>  | 543,9 ± 228,8 <sup>c</sup>  | 8,1 ± 3,5 <sup>b</sup>   | -                       | 11,8 ± 8,5 <sup>a</sup> | 326,3 ± 187,4 <sup>bc</sup> |
| 2009   | R4T1                  | 11,8 ± 6,7 <sup>c</sup> | 10,8 ± 3,7 <sup>c</sup>  | 11,9 ± 3,3 <sup>a</sup>  | 377,3 ± 85,5 <sup>b</sup>   | 14,2 ± 6,9 <sup>cd</sup> | 8,5 ± 1,9 <sup>b</sup>  | 5,4 ± 1,9 <sup>b</sup>  | 220,7 ± 47,4 <sup>a</sup>   |
| 2010   | R5T2                  | 11,7 ± 6,3 <sup>c</sup> | 13,8 ± 3,7 <sup>bc</sup> | 16,4 ± 5,5 <sup>b</sup>  | 582,8 ± 174,9 <sup>c</sup>  | 15,3 ± 7,1 <sup>d</sup>  | 9,8 ± 2,2 <sup>b</sup>  | 8,5 ± 3,9 <sup>ab</sup> | 369,8 ± 136,2 <sup>c</sup>  |
| 2011   | R6T3                  | 10,4 ± 5,6 <sup>c</sup> | 15,8 ± 6,2 <sup>b</sup>  | -                        | -                           | 12,2 ± 4,3 <sup>c</sup>  | 12,1 ± 2,7 <sup>c</sup> | -                       | -                           |

R: raíz, T: tallo, D<sub>10</sub>: diámetro basal por brote a 10 cm de altura, D<sub>130</sub>: diámetro normal por brote a 130 cm de altura, H<sub>dom</sub>: altura dominante. Diferentes letras en cada columna indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% (P < 0,05, n = 81).

## 4.1.1.2.5 Producciones

En la Tabla 4.10 se muestran las producciones acumuladas de biomasa leñosa obtenidas en Soria y Madrid para los clones AF2 e I-214 en una plantación con densidad 33.333 plantas ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 4.10:** Producciones medias acumuladas de biomasa leñosa (Mg MS ha<sup>-1</sup>) obtenidas para el clon AF2 e I-214 en el ensayo 2

| Año  | Edad de<br>plantación<br>(años) | Producción<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> ) |            |             |             |
|------|---------------------------------|-----------------------------------------|------------|-------------|-------------|
|      |                                 | Soria                                   |            | Madrid      |             |
|      |                                 | AF2                                     | I-214      | AF2         | I-214       |
| 2006 | R1T1                            | 2,9 ± 2,1                               | 2,6 ± 1,4  | 6,3 ± 7,6   | 4,8 ± 3,9   |
| 2008 | R3T2                            | 9,7 ± 9,3                               | 13,2 ± 7,0 | 30,9 ± 70,6 | 17,9 ± 28,2 |
| 2011 | R6T3                            | 15,5 ± 17,9                             | 9,4 ± 10,0 | 42,3 ± 13,6 | 12,9 ± 8,3  |

R: raíz, T: tallo

## 4.1.2 Biomasa foliar

La cantidad media de hojas caídas del género *Populus* evaluada a través de diferentes métodos en diferentes densidades y la relación media de la biomasa foliar frente a biomasa leñosa (tallos +ramas) se muestran en la Tabla 4.11.

**Tabla 4.11:** Cantidad de hojas caídas (Mg MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y ratio biomasa foliar (H) frente a biomasa leñosa (Tallos + Ramas) obtenido por diferentes métodos

| Método                                                                  | Localización | Año  | Ensayo 1      |                                                                      | Ensayo 2      |                                                                      |               |                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------|------|---------------|----------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------|
|                                                                         |              |      | Clon I-214    |                                                                      | Clon I-214    |                                                                      | Clon AF-2     |                                                                      |
|                                                                         |              |      | Ratio H/(T+R) | Cantidad de hojas caídas (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | Ratio H/(T+R) | Cantidad de hojas caídas (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | Ratio H/(T+R) | Cantidad de hojas caídas (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) |
| 1. Con trampas permanentes a lo largo del año                           | Soria        | 2006 | 0,61          | 1,61                                                                 |               |                                                                      |               |                                                                      |
|                                                                         |              | 2007 | 0,62          | 4,67                                                                 | n.d.          | n.d.                                                                 | 0,59          | 2,30                                                                 |
|                                                                         |              | 2008 | 0,56          | 10,29                                                                | 0,79          | 7,21                                                                 | 0,52          | 3,04                                                                 |
|                                                                         |              | 2009 | 0,50          | 11,35                                                                | n.d.          | n.d.                                                                 | 0,50          | 2,17                                                                 |
|                                                                         |              | 2010 | 0,58          | 2,67                                                                 | n.d.          | n.d.                                                                 | 0,44          | 3,07                                                                 |
|                                                                         |              | 2011 |               |                                                                      | n.d.          | n.d.                                                                 | 0,42          | 1,76                                                                 |
| 2. Muestreo sobre las hojas caídas al suelo                             | Soria        | 2008 | n.d.          | n.d.                                                                 | 0,37          | 3,38                                                                 | n.d.          | n.d.                                                                 |
| 3. Defoliación del árbol, inmediatamente antes de la caída de las hojas | Soria        | 2006 | n.d.          | n.d.                                                                 | 0,71          | 1,50                                                                 | 0,74          | 2,02                                                                 |
|                                                                         | Madrid       |      | n.d.          | n.d.                                                                 | 1,00          | 2,18                                                                 | 0,93          | 2,51                                                                 |

n.d.: no disponible.

Para la localización de Soria, dentro del ensayo 2, antes de la abscisión de las hojas se determinó la reabsorción y se calculó la eficiencia de reabsorción y de uso de N, P y K a nivel de la hoja (Tabla 4.12).

**Tabla 4.12:** Media del porcentaje de eficiencia de reabsorción (RE%) y eficiencia de uso del nutriente a nivel de la hoja (LNUE g MS g<sup>-1</sup> de nutriente) para N, P y K en la localización de Soria

|                                                                                                     | <b>N</b> | <b>P</b> | <b>K</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| <b>Hoja verde</b> (g g <sup>-1</sup> )                                                              | 0,019    | 0,002    | 0,013    |
| <b>Hojarasca foliar</b> (g g <sup>-1</sup> )                                                        | 0,006    | 0,001    | 0,006    |
| <b>Eficiencia de reabsorción (RE) (%)</b>                                                           | 66,6     | 36,1     | 51,0     |
| <b>Eficiencia de uso del nutriente a nivel de la hoja (LNUE) (g MS g<sup>-1</sup> de nutriente)</b> | 464,2    | 1388,1   | 319,7    |

## 4.2 Descomposición de hojarasca foliar

### 4.2.1.1 Ensayo 1

La Tabla 4.13 muestra la evolución de la materia seca y del contenido de cada bioelemento en la hojarasca foliar. Además, en la Tabla 4.14 se presenta la distribución de lo que se va liberando de la hojarasca en las bolsitas, a lo largo de los 32 meses estudiados, en cuanto a materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S.

**Tabla 4.13:** Evolución del contenido absoluto de cada bioelemento en la hojarasca foliar. Todos los datos han sido referidos a 1 g MS ( $\text{g bioelemento g}^{-1} \text{hojas}$ )

| Tiempo<br>(días)                         | Masa<br>remanente<br>( $\text{g g}^{-1}$ ) | C                     | N                   | P               | K                  | Ca               | Mg              | Mn              | S                  |
|------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|--------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| .....( $10^{-3} \text{ g g}^{-1}$ )..... |                                            |                       |                     |                 |                    |                  |                 |                 |                    |
| 0                                        | $1,00 \pm 0,0^a$                           | $446,9 \pm 13,6^a$    | $22,5 \pm 1,6^a$    | $1,9 \pm 0,2^a$ | $4,7 \pm 0,5^a$    | $24,3 \pm 1,8^a$ | $2,4 \pm 0,2^a$ | $1,4 \pm 0,1^a$ | $2,2 \pm 0,2^a$    |
| 243                                      | $0,74 \pm 0,1^b$                           | $325,3 \pm 36,7^b$    | $20,7 \pm 1,7^{ab}$ | $1,2 \pm 0,2^b$ | $3,9 \pm 0,8^b$    | $22,0 \pm 3,8^a$ | $1,7 \pm 0,2^b$ | $1,9 \pm 0,2^b$ | $2,0 \pm 0,2^{ab}$ |
| 608                                      | $0,57 \pm 0,1^c$                           | $270,8 \pm 60,8^c$    | $16,7 \pm 3,3^c$    | $1,3 \pm 0,2^b$ | $5,6 \pm 0,7^c$    | $21,0 \pm 7,3^a$ | $1,5 \pm 0,1^b$ | $2,3 \pm 0,4^c$ | $1,8 \pm 0,4^b$    |
| 973                                      | $0,53 \pm 0,2^c$                           | $303,7 \pm 27,4^{bc}$ | $18,4 \pm 2,8^{bc}$ | $1,1 \pm 0,1^b$ | $4,6 \pm 0,5^{ab}$ | $21,3 \pm 3,4^a$ | $1,7 \pm 0,1^b$ | $2,5 \pm 0,6^c$ | $1,8 \pm 0,2^b$    |
| $\pm\Delta$ (%)                          | -47                                        | -32                   | -18                 | -42             | -2                 | -12              | -29             | 79              | -18                |

Los valores medios en columnas con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 6$ ).

**Tabla 4.14:** Materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S liberado de la hojarasca foliar (expresado como un porcentaje referido al contenido inicial en las hojas recién caídas)

|                         | Tiempo (días)            |                           |                          |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                         | 243                      | 608                       | 973                      |
| <b>Materia seca (%)</b> | 25,7 ± 14,4 <sup>b</sup> | 42,8 ± 13,2 <sup>c</sup>  | 47,2 ± 20,5 <sup>c</sup> |
| <b>C (%)</b>            | 46,8 ± 6,8 <sup>b</sup>  | 65,6 ± 10,2 <sup>c</sup>  | 64,0 ± 15,1 <sup>c</sup> |
| <b>N (%)</b>            | 32,1 ± 12,3 <sup>b</sup> | 57,6 ± 13,4 <sup>c</sup>  | 55,6 ± 21,6 <sup>c</sup> |
| <b>P (%)</b>            | 52,3 ± 14,6 <sup>b</sup> | 62,0 ± 12,9 <sup>bc</sup> | 68,7 ± 14,4 <sup>c</sup> |
| <b>K (%)</b>            | 37,1 ± 22,6 <sup>b</sup> | 31,7 ± 20,3 <sup>b</sup>  | 46,6 ± 24,9 <sup>b</sup> |
| <b>Ca (%)</b>           | 34,3 ± 7,4 <sup>b</sup>  | 51,5 ± 16,8 <sup>c</sup>  | 53,8 ± 20,3 <sup>c</sup> |
| <b>Mg (%)</b>           | 48,7 ± 7,3 <sup>b</sup>  | 64,2 ± 8,4 <sup>c</sup>   | 62,1 ± 15,2 <sup>c</sup> |
| <b>Mn (%)</b>           | -2,5 ± 20,4 <sup>a</sup> | 3,2 ± 27,4 <sup>a</sup>   | 8,9 ± 34,5 <sup>a</sup>  |
| <b>S (%)</b>            | 32,5 ± 12,6 <sup>b</sup> | 54,3 ± 13,9 <sup>c</sup>  | 55,5 ± 20,3 <sup>c</sup> |

Los valores medios en filas con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 6$ ).

#### 4.2.1.2 Ensayo 2

Las Tablas 4.15 y 4.16 muestra la evolución de la materia seca y del contenido de cada bioelemento en la hojarasca foliar para ambas localizaciones aquí estudiadas a lo largo de 32 meses de exposición en el campo, mientras que la Tabla 4.17 muestra los mismos datos que las dos anteriores pero a lo largo de 48 meses de exposición en el campo y tan solo para la localización de Madrid. En la Tabla 4.18 se muestra lo que se va perdiendo en la hojarasca de las bolsitas, durante el periodo estudiado, para ambas localizaciones, en cuanto a materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S. En las Tablas 4.19 y 4.20 se presenta la distribución de lo que va quedando en las bolsitas de hojarasca, a lo largo de 32 meses y 48 meses, para Soria y Madrid respectivamente, en cuanto a materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S.

**Tabla 4.15:** Evolución del contenido absoluto de cada bioelemento en la hojarasca foliar en Soria. Todos los datos han sido referidos a 1 g MS (g bioelemento g<sup>-1</sup> hojas)

| Tiempo<br>(días)                                | Masa<br>remanente<br>(g g <sup>-1</sup> ) | C                         | N                       | P                       | K                       | Ca                       | Mg                     | Mn                      | S                      |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| .....(10 <sup>-3</sup> g g <sup>-1</sup> )..... |                                           |                           |                         |                         |                         |                          |                        |                         |                        |
| 0                                               | 1,00 ± 0,0 <sup>a</sup>                   | 438,8 ± 5,3 <sup>a</sup>  | 6,5 ± 0,3 <sup>a</sup>  | 1,1 ± 0,1 <sup>a</sup>  | 6,4 ± 0,2 <sup>a</sup>  | 22,1 ± 1,0 <sup>a</sup>  | 2,2 ± 0,1 <sup>a</sup> | 0,7 ± 0,05 <sup>a</sup> | 1,5 ± 0,2 <sup>a</sup> |
| 243                                             | 0,77 ± 0,1 <sup>b</sup>                   | 356,5 ± 35,0 <sup>b</sup> | 10,3 ± 0,7 <sup>b</sup> | 1,0 ± 0,2 <sup>ab</sup> | 3,8 ± 1,4 <sup>b</sup>  | 28,7 ± 2,6 <sup>b</sup>  | 1,8 ± 0,2 <sup>b</sup> | 0,8 ± 0,2 <sup>a</sup>  | 1,4 ± 0,2 <sup>a</sup> |
| 608                                             | 0,58 ± 0,1 <sup>c</sup>                   | 272,8 ± 26,0 <sup>c</sup> | 10,2 ± 0,7 <sup>b</sup> | 0,9 ± 0,1 <sup>b</sup>  | 5,2 ± 2,7 <sup>ab</sup> | 20,7 ± 5,0 <sup>ac</sup> | 1,4 ± 0,3 <sup>c</sup> | 0,7 ± 0,3 <sup>a</sup>  | 1,0 ± 0,1 <sup>b</sup> |
| 973                                             | 0,21 ± 0,04 <sup>d</sup>                  | 242,3 ± 27,2 <sup>d</sup> | 11,4 ± 0,8 <sup>c</sup> | 1,2 ± 0,2 <sup>a</sup>  | 5,4 ± 0,6 <sup>ab</sup> | 17,0 ± 2,6 <sup>c</sup>  | 1,5 ± 0,1 <sup>c</sup> | 1,3 ± 0,1 <sup>b</sup>  | 1,4 ± 0,1 <sup>a</sup> |
| ±Δ (%)                                          | -79                                       | -45                       | 76                      | 3                       | -15                     | -23                      | -33                    | 77                      | -11                    |

Los valores medios en columnas con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% (P < 0,05, n = 6).

**Tabla 4.16:** Evolución del contenido absoluto de cada bioelemento en la hojarasca foliar en Madrid a lo largo de 32 meses. Todos los datos han sido referidos a 1 g MS ( $\text{g bioelemento g}^{-1} \text{hojas}$ )

| Tiempo<br>(días)                         | Masa<br>remanente<br>( $\text{g g}^{-1}$ ) | C                     | N                | P               | K                  | Ca                   | Mg               | Mn                 | S               |
|------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|--------------------|----------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| .....( $10^{-3} \text{ g g}^{-1}$ )..... |                                            |                       |                  |                 |                    |                      |                  |                    |                 |
| 0                                        | $1,00 \pm 0,0^a$                           | $387,5 \pm 6,8^a$     | $9,0 \pm 0,3^a$  | $0,7 \pm 0,1^a$ | $7,6 \pm 1,1^a$    | $39,3 \pm 8,1^{ab}$  | $10,4 \pm 1,0^a$ | $0,3 \pm 0,1^{ab}$ | $4,4 \pm 0,3^a$ |
| 243                                      | $0,67 \pm 0,1^b$                           | $347,7 \pm 21,6^b$    | $14,2 \pm 2,1^b$ | $1,0 \pm 0,1^b$ | $4,6 \pm 1,4^b$    | $54,7 \pm 12,5^c$    | $6,1 \pm 0,6^b$  | $0,4 \pm 0,2^a$    | $2,3 \pm 0,4^b$ |
| 608                                      | $0,31 \pm 0,04^c$                          | $324,5 \pm 22,7^{bc}$ | $15,4 \pm 1,2^b$ | $1,2 \pm 0,1^b$ | $6,1 \pm 1,4^{ab}$ | $48,0 \pm 10,7^{bc}$ | $5,0 \pm 0,9^c$  | $0,3 \pm 0,1^{ab}$ | $2,1 \pm 0,4^b$ |
| 973                                      | $0,20 \pm 0,12^d$                          | $298,5 \pm 64,1^c$    | $16,0 \pm 2,4^b$ | $1,2 \pm 0,1^b$ | $6,7 \pm 2,1^a$    | $39,0 \pm 8,3^{ab}$  | $3,7 \pm 1,0^d$  | $0,3 \pm 0,1^{ab}$ | $2,1 \pm 0,3^b$ |
| $\pm\Delta$ (%)                          | -80                                        | -23                   | 77               | 69              | -11                | -1                   | -64              | 7                  | -53             |

Los valores medios en columnas con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 6$ ).

**Tabla 4.17:** Evolución del contenido absoluto de cada bioelemento en la hojarasca foliar en Madrid a lo largo de 48 meses. Todos los datos han sido referidos a 1 g MS ( $\text{g bioelemento g}^{-1} \text{hojas}$ )

| Tiempo<br>(días)                         | Masa<br>remanente<br>( $\text{g g}^{-1}$ ) | C                     | N                | P               | K                  | Ca                   | Mg                 | Mn                 | S                  |
|------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| .....( $10^{-3} \text{ g g}^{-1}$ )..... |                                            |                       |                  |                 |                    |                      |                    |                    |                    |
| 0                                        | $1,00 \pm 0,0^a$                           | $387,5 \pm 6,8^a$     | $9,0 \pm 0,3^a$  | $0,7 \pm 0,1^a$ | $7,6 \pm 1,1^a$    | $39,3 \pm 8,1^{ab}$  | $10,4 \pm 1,0^a$   | $0,3 \pm 0,1^{ab}$ | $4,4 \pm 0,3^a$    |
| 243                                      | $0,67 \pm 0,1^b$                           | $347,7 \pm 21,6^b$    | $14,2 \pm 2,1^b$ | $1,0 \pm 0,1^b$ | $4,6 \pm 1,4^b$    | $54,7 \pm 12,5^c$    | $6,1 \pm 0,6^b$    | $0,4 \pm 0,2^a$    | $2,3 \pm 0,4^b$    |
| 608                                      | $0,31 \pm 0,04^c$                          | $324,5 \pm 22,7^{bc}$ | $15,4 \pm 1,2^b$ | $1,2 \pm 0,1^b$ | $6,1 \pm 1,4^{ab}$ | $48,0 \pm 10,7^{bc}$ | $5,0 \pm 0,9^c$    | $0,3 \pm 0,1^{ab}$ | $2,1 \pm 0,4^b$    |
| 973                                      | $0,20 \pm 0,12^d$                          | $298,5 \pm 64,1^c$    | $16,0 \pm 2,4^b$ | $1,2 \pm 0,1^b$ | $6,7 \pm 2,1^a$    | $39,0 \pm 8,3^{ab}$  | $3,7 \pm 1,0^d$    | $0,3 \pm 0,1^{ab}$ | $2,1 \pm 0,3^b$    |
| 1338                                     | $0,04 \pm 0,01^e$                          | $287,2 \pm 47,7^c$    | $15,3 \pm 2,9^b$ | $1,2 \pm 0,5^b$ | $6,9 \pm 1,5^a$    | $29,3 \pm 6,8^a$     | $5,9 \pm 0,9^{bc}$ | $0,2 \pm 0,1^b$    | $3,2 \pm 1,5^c$    |
| 1460                                     | $0,04 \pm 0,02^e$                          | $293,2 \pm 43,6^c$    | $15,8 \pm 2,9^b$ | $1,6 \pm 0,2^c$ | $7,2 \pm 1,6^a$    | $31,0 \pm 6,6^a$     | $6,4 \pm 1,1^b$    | $0,2 \pm 0,1^{ab}$ | $3,6 \pm 0,5^{ac}$ |
| $\pm\Delta$ (%)                          | -96                                        | -24                   | 75               | 131             | -5                 | -21                  | -38                | -14                | -19                |

Los valores medios en columnas con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 6$ )

**Tabla 4.18:** Materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S liberado de la hojarasca foliar en Soria y Madrid (expresado como un porcentaje referido al contenido inicial en las hojas recién caídas)

| Tiempo<br>(días) | Localización | Materia<br>seca          | C                       | N                         | P                         | K                          | Ca                        | Mg                       | Mn                        | S                        |
|------------------|--------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| ..... (%).....   |              |                          |                         |                           |                           |                            |                           |                          |                           |                          |
| 243              | Soria        | 22,5 ± 12,4 <sup>a</sup> | 38,3 ± 5,9 <sup>a</sup> | -21,4 ± 19,3 <sup>b</sup> | 28,0 ± 24,0 <sup>b</sup>  | 52,1 ± 21,2 <sup>a</sup>   | -0,40 ± 21,0 <sup>a</sup> | 38,3 ± 8,3 <sup>b</sup>  | 19,7 ± 6,5 <sup>ab</sup>  | 30,7 ± 10,8 <sup>b</sup> |
|                  | Madrid       | 32,7 ± 11,0 <sup>a</sup> | 39,9 ± 6,5 <sup>a</sup> | -3,4 ± 3,7 <sup>a</sup>   | -4,0 ± 15,2 <sup>a</sup>  | 55,8 ± 21,2 <sup>abc</sup> | 8,6 ± 15,2 <sup>a</sup>   | 60,4 ± 6,7 <sup>a</sup>  | 3,2 ± 33,9 <sup>a</sup>   | 65,8 ± 4,1 <sup>a</sup>  |
| 608              | Soria        | 40,5 ± 11,1 <sup>c</sup> | 63,8 ± 6,5 <sup>c</sup> | 8,3 ± 16,8 <sup>a</sup>   | 52,1 ± 8,6 <sup>cd</sup>  | 53,0 ± 23,5 <sup>ab</sup>  | 45,9 ± 14,8 <sup>b</sup>  | 64,6 ± 7,5 <sup>a</sup>  | 39,6 ± 24,1 <sup>bd</sup> | 62,8 ± 7,3 <sup>a</sup>  |
|                  | Madrid       | 69,3 ± 3,8 <sup>b</sup>  | 74,3 ± 3,1 <sup>b</sup> | 48,2 ± 5,2 <sup>c</sup>   | 44,6 ± 6,0 <sup>bc</sup>  | 74,5 ± 5,1 <sup>bcd</sup>  | 62,5 ± 10,3 <sup>b</sup>  | 85,2 ± 3,7 <sup>c</sup>  | 63,2 ± 11,7 <sup>c</sup>  | 85,8 ± 3,2 <sup>cd</sup> |
| 973              | Soria        | 78,4 ± 3,7 <sup>d</sup>  | 87,9 ± 2,9 <sup>d</sup> | 61,4 ± 9,4 <sup>cd</sup>  | 77,0 ± 5,2 <sup>e</sup>   | 81,2 ± 4,7 <sup>cd</sup>   | 83,3 ± 2,9 <sup>c</sup>   | 85,4 ± 2,6 <sup>c</sup>  | 61,1 ± 7,5 <sup>cd</sup>  | 80,6 ± 2,7 <sup>c</sup>  |
|                  | Madrid       | 79,6 ± 11,7 <sup>d</sup> | 85,7 ± 5,1 <sup>d</sup> | 64,9 ± 17,1 <sup>d</sup>  | 64,0 ± 18,1 <sup>de</sup> | 78,6 ± 18,8 <sup>d</sup>   | 80,8 ± 8,5 <sup>c</sup>   | 92,5 ± 4,4 <sup>cd</sup> | 77,9 ± 13,2 <sup>c</sup>  | 90,3 ± 5,3 <sup>d</sup>  |
| 1338             | Madrid       | 95,8 ± 1,2 <sup>e</sup>  | 96,9 ± 0,8 <sup>e</sup> | 93,0 ± 1,6 <sup>e</sup>   | 92,2 ± 3,1 <sup>f</sup>   | 95,9 ± 1,7 <sup>e</sup>    | 96,9 ± 0,8 <sup>d</sup>   | 97,5 ± 0,9 <sup>d</sup>  | 96,7 ± 0,3 <sup>e</sup>   | 97,1 ± 1,2 <sup>e</sup>  |
| 1460             | Madrid       | 96,4 ± 2,0 <sup>e</sup>  | 97,2 ± 1,9 <sup>e</sup> | 93,4 ± 4,7 <sup>e</sup>   | 91,0 ± 4,1 <sup>f</sup>   | 96,6 ± 1,0 <sup>de</sup>   | 97,0 ± 1,6 <sup>d</sup>   | 97,7 ± 1,2 <sup>d</sup>  | 96,9 ± 1,7 <sup>e</sup>   | 97,2 ± 0,9 <sup>e</sup>  |

Los valores medios en columnas con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% (P < 0,05, n = 6).

**Tabla 4.19:** Materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S remanente en la hojarasca foliar en Soria (expresado como un porcentaje referido al contenido inicial en las hojas recién caídas)

| Tiempo<br>(días) | Materia<br>seca          | C                        | N                         | P                        | K                        | Ca                        | Mg                       | Mn                       | S                         |
|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| ..... (%).       |                          |                          |                           |                          |                          |                           |                          |                          |                           |
| 0                | 100,0 ± 0,9 <sup>a</sup> | 100,0 ± 1,5 <sup>a</sup> | 100,0 ± 5,7 <sup>a</sup>  | 100,0 ± 6,9 <sup>a</sup> | 100,0 ± 4,2 <sup>a</sup> | 100,0 ± 4,7 <sup>a</sup>  | 100,0 ± 7,5 <sup>a</sup> | 100,0 ± 7,8 <sup>a</sup> | 100,0 ± 10,1 <sup>a</sup> |
| 243              | 77,5 ± 12,4 <sup>b</sup> | 61,7 ± 5,9 <sup>b</sup>  | 121,4 ± 19,3 <sup>b</sup> | 72,0 ± 24,0 <sup>b</sup> | 47,9 ± 21,2 <sup>b</sup> | 100,4 ± 21,0 <sup>a</sup> | 61,7 ± 8,3 <sup>b</sup>  | 80,3 ± 6,5 <sup>b</sup>  | 69,3 ± 10,8 <sup>b</sup>  |
| 608              | 59,5 ± 11,1 <sup>c</sup> | 36,2 ± 6,5 <sup>c</sup>  | 91,7 ± 16,8 <sup>a</sup>  | 47,9 ± 8,6 <sup>c</sup>  | 47,0 ± 23,5 <sup>b</sup> | 54,1 ± 14,8 <sup>b</sup>  | 35,4 ± 7,5 <sup>c</sup>  | 60,4 ± 24,1 <sup>c</sup> | 37,2 ± 7,3 <sup>c</sup>   |
| 973              | 21,6 ± 3,7 <sup>d</sup>  | 12,1 ± 2,9 <sup>d</sup>  | 38,6 ± 9,4 <sup>c</sup>   | 23,0 ± 5,2 <sup>d</sup>  | 18,8 ± 4,7 <sup>c</sup>  | 16,7 ± 2,9 <sup>c</sup>   | 14,6 ± 2,6 <sup>d</sup>  | 38,9 ± 7,5 <sup>d</sup>  | 19,4 ± 2,7 <sup>d</sup>   |

Los valores medios en columnas con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 6$ ).

**Tabla 4.20:** Materia seca, C, N, P, K, Ca, Mg, Mn y S remanente en la hojarasca foliar en Madrid (expresado como un porcentaje referido al contenido inicial en las hojas recién caídas)

| Tiempo<br>(días) | Materia<br>seca          | C                        | N                        | P                         | K                         | Ca                        | Mg                       | Mn                        | S                        |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| ..... (%).....   |                          |                          |                          |                           |                           |                           |                          |                           |                          |
| 0                | 100,0 ± 0,0 <sup>a</sup> | 100,0 ± 1,8 <sup>a</sup> | 100,0 ± 3,8 <sup>a</sup> | 100,0 ± 15,9 <sup>a</sup> | 100,0 ± 14,8 <sup>a</sup> | 100,0 ± 20,7 <sup>a</sup> | 100,0 ± 9,5 <sup>a</sup> | 100,0 ± 34,5 <sup>a</sup> | 100,0 ± 7,0 <sup>a</sup> |
| 243              | 67,3 ± 11,0 <sup>b</sup> | 60,1 ± 6,5 <sup>b</sup>  | 103,4 ± 3,7 <sup>a</sup> | 104,0 ± 15,2 <sup>a</sup> | 44,2 ± 21,2 <sup>b</sup>  | 91,4 ± 15,2 <sup>a</sup>  | 39,6 ± 6,7 <sup>b</sup>  | 96,8 ± 33,9 <sup>a</sup>  | 34,2 ± 4,1 <sup>b</sup>  |
| 608              | 30,7 ± 3,8 <sup>c</sup>  | 25,7 ± 3,1 <sup>c</sup>  | 51,8 ± 5,2 <sup>b</sup>  | 55,4 ± 6,0 <sup>b</sup>   | 25,5 ± 5,1 <sup>c</sup>   | 37,5 ± 10,3 <sup>b</sup>  | 14,8 ± 3,7 <sup>c</sup>  | 36,8 ± 11,7 <sup>b</sup>  | 14,2 ± 3,2 <sup>c</sup>  |
| 973              | 20,4 ± 11,7 <sup>d</sup> | 14,3 ± 5,1 <sup>d</sup>  | 35,1 ± 17,1 <sup>c</sup> | 36,0 ± 18,8 <sup>c</sup>  | 21,4 ± 18,8 <sup>cd</sup> | 19,2 ± 8,5 <sup>c</sup>   | 7,5 ± 4,4 <sup>d</sup>   | 22,1 ± 13,2 <sup>bc</sup> | 9,7 ± 5,3 <sup>d</sup>   |
| 1338             | 4,2 ± 1,2 <sup>e</sup>   | 3,1 ± 0,8 <sup>e</sup>   | 7,0 ± 1,6 <sup>d</sup>   | 7,8 ± 3,1 <sup>d</sup>    | 4,1 ± 1,7 <sup>e</sup>    | 3,1 ± 0,8 <sup>d</sup>    | 2,5 ± 0,9 <sup>d</sup>   | 3,3 ± 0,3 <sup>c</sup>    | 2,9 ± 1,2 <sup>e</sup>   |
| 1460             | 3,6 ± 2,0 <sup>e</sup>   | 2,8 ± 1,9 <sup>e</sup>   | 6,6 ± 4,7 <sup>d</sup>   | 9,0 ± 4,1 <sup>d</sup>    | 3,4 ± 1,0 <sup>de</sup>   | 3,0 ± 1,6 <sup>d</sup>    | 2,3 ± 1,2 <sup>d</sup>   | 3,1 ± 1,7 <sup>c</sup>    | 2,8 ± 0,9 <sup>e</sup>   |

Los valores medios en columnas con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 6$ ).

En la Tabla 4.21 se muestra el porcentaje de lignina, nitrógeno y la relación lignina/nitrógeno a lo largo de 973 y 1216 días para Soria y Madrid, respectivamente.

**Tabla 4.21:** Contenido de lignina (%) en la localización de Soria y Madrid

| Localización | Tiempo<br>(días) | Lignina<br>(%) | N<br>(%) | Lignina/N |
|--------------|------------------|----------------|----------|-----------|
| Soria        | 0                | 22,66          | 0,65     | 34,90     |
|              | 121              | 25,27          | 0,95     | 26,56     |
|              | 243              | 41,77          | 1,03     | 40,68     |
|              | 608              | 43,08          | 1,02     | 42,17     |
|              | 973              | 45,05          | 1,14     | 39,63     |
| Madrid       | 0                | 18,18          | 0,91     | 20,07     |
|              | 121              | 28,44          | 1,10     | 25,81     |
|              | 243              | 35,66          | 1,42     | 25,11     |
|              | 608              | 43,91          | 1,54     | 28,55     |
|              | 973              | 42,63          | 1,60     | 26,62     |
|              | 1095             | 61,92          | 1,40     | 44,39     |
|              | 1216             | 66,87          | 1,20     | 55,84     |

#### 4.4 Suelo

##### 4.4.1 Ensayo 1

En la Tabla 4.22 se muestran las características físicas del suelo justo antes de la plantación y, en la Tabla 4.23 se muestran las principales características del suelo antes de la plantación y 32 meses después de estar expuesto a la caída de la hojarasca.

**Tabla 4.22:** Características físicas del suelo antes de la plantación en Soria

| Parámetros                               | Profundidad    |       |       |
|------------------------------------------|----------------|-------|-------|
|                                          | 0-20           | 20-40 | 40-60 |
|                                          | .....(cm)..... |       |       |
| Arcilla (%)                              | 8,2            | 8,6   | 13    |
| Limos (%)                                | 5,6            | 6,6   | 5,4   |
| Arena (%)                                | 86             | 85    | 82    |
| Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) | 1,37           | 1,44  | 1,88  |
| Gravas (%)                               | 34             | 39    | 39    |

**Tabla 4.23:** Característica del suelo antes de la plantación (inicial) y después del ensayo de descomposición de la hojarasca (final) a tres profundidades diferentes

| Muestreo                              | Inicial**                | Final***                 | Inicial**                | Final***                 | Inicial**                | Final***                 |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Profundidad (cm)                      | 0-20                     |                          | 20-40                    |                          | 40-60                    |                          |
| pH                                    | 6,8 ± 0,2 <sup>aa</sup>  | 6,3 ± 0,2 <sup>ab</sup>  | 6,5 ± 0,2 <sup>ba</sup>  | 6,1 ± 0,2 <sup>bb</sup>  | 6,4 ± 0,5 <sup>ca</sup>  | 6,1 ± 0,5 <sup>cb</sup>  |
| N <sub>t</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 320 ± 0,01 <sup>aa</sup> | 675 ± 0,02 <sup>ab</sup> | 200 ± 0,01 <sup>ba</sup> | 610 ± 0,03 <sup>bb</sup> | 180 ± 0,01 <sup>ca</sup> | 654 ± 0,04 <sup>cb</sup> |
| P <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 14 ± 1,7 <sup>aa</sup>   | 43 ± 2,3 <sup>ab</sup>   | 12 ± 3,9 <sup>ba</sup>   | 33 ± 5,7 <sup>bb</sup>   | 36 ± 5,0 <sup>ca</sup>   | 24 ± 3,3 <sup>cb</sup>   |
| K <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 61 ± 12,2 <sup>aa</sup>  | 92 ± 18,4 <sup>ab</sup>  | 66 ± 14,8 <sup>ba</sup>  | 65 ± 14,6 <sup>bb</sup>  | 65 ± 18,7 <sup>ca</sup>  | 61 ± 17,5 <sup>cb</sup>  |
| C orgánico (Mg ha <sup>-1</sup> )     | 15 ± 0,2 <sup>aa</sup>   | 16 ± 0,2 <sup>ab</sup>   | 12 ± 0,1 <sup>ba</sup>   | 17 ± 0,1 <sup>bb</sup>   | 7 ± 0,01 <sup>ca</sup>   | 18 ± 0,03 <sup>cb</sup>  |
| MOS (Mg ha <sup>-1</sup> )            | 26 ± 0,3 <sup>aa</sup>   | 28 ± 0,3 <sup>ab</sup>   | 22 ± 0,2 <sup>ba</sup>   | 30 ± 0,3 <sup>bb</sup>   | 12 ± 0,01 <sup>ca</sup>  | 32 ± 0,03 <sup>cb</sup>  |
| Ratio C/N                             | 12 ± 3,3 <sup>aa</sup>   | 9,4 ± 2,6 <sup>ab</sup>  | 12 ± 3,7 <sup>aa</sup>   | 10 ± 3,1 <sup>bb</sup>   | 8,7 ± 0,7 <sup>ba</sup>  | 7,7 ± 0,6 <sup>cb</sup>  |

Los valores medios en filas con diferentes letras de color **negro** indican diferencias estadísticamente significativas entre los muestreos **iniciales**. Los valores medios en filas con diferentes letras de color **azul** indican diferencias estadísticamente significativas entre los muestreos **finales**. Los valores medios en filas con diferentes letras de color **rojo** indican diferencias estadísticamente significativas entre los muestreos **iniciales y finales dentro de cada profundidad** para un nivel de confianza del 95% (P < 0,05, n = 6). N<sub>t</sub>: nitrógeno total del suelo, P<sub>d</sub>: fósforo disponible en el suelo, K<sub>d</sub>: potasio disponible en el suelo, MOS: materia orgánica del suelo, \*\*Inicial: corresponde al suelo antes de la plantación, \*\*\*Final: corresponde al final del ensayo de descomposición de hojarasca

#### 4.4.2 Ensayo 2

Las características físicas del suelo antes de la plantación en Soria correspondientes a este ensayo, coinciden con las indicadas en el ensayo 1 (Tabla 4.22). Para la localización de Madrid estos valores se indican en la Tabla 4.24.

En la Tabla 4.25, se muestran las principales características del suelo testigo antes de la plantación y al final del estudio de descomposición de hojarasca, en Soria y en Madrid, a tres profundidades diferentes para poder ver el efecto de la descomposición de la hojarasca en el suelo. Ambas situaciones no han tenido acumulación de hojas. También se indican para ambas zonas (Tabla 4.26) las características del mismo en la zona de acumulación de la hojarasca al inicio y al final del ensayo de descomposición, en los primeros 20 cm de suelo.

**Tabla 4.24:** Características físicas del suelo antes de la plantación en Madrid

| Parámetros                               | Profundidad    |       |       |
|------------------------------------------|----------------|-------|-------|
|                                          | 0-20           | 20-40 | 40-60 |
|                                          | .....(cm)..... |       |       |
| Arcilla (%)                              | 13,4           | 12,7  | 20,4  |
| Limos (%)                                | 20,4           | 21,9  | 30,3  |
| Arena (%)                                | 66,3           | 65,4  | 49,3  |
| Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) | 1,34           | 1,42  | 1,42  |
| Gravas (%)                               | n.d.           | n.d.  | n.d.  |

n.d.: No disponible

**Tabla 4.25:** Características del suelo testigo antes de la plantación y al final del estudio de descomposición de hojarasca en Soria y en Madrid a tres profundidades diferentes

| Localización | Muestreo                              | Inicial**                 | Final***                  | Inicial**                | Final***                 | Inicial**                | Final***                 |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|              | Profundidad (cm)                      | 0-20                      |                           | 20-40                    |                          | 40-60                    |                          |
| Soria        | pH                                    | 6,8 ± 0,2 <sup>aa</sup>   | 6,3 ± 0,2 <sup>ab</sup>   | 6,5 ± 0,2 <sup>ba</sup>  | 5,7 ± 0,2 <sup>bb</sup>  | 6,4 ± 0,5 <sup>ca</sup>  | 5,2 ± 0,4 <sup>bb</sup>  |
|              | N <sub>t</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 320 ± 0,01 <sup>aa</sup>  | 468 ± 0,01 <sup>ab</sup>  | 200 ± 0,01 <sup>ba</sup> | 391 ± 0,01 <sup>ab</sup> | 180 ± 0,01 <sup>ca</sup> | 393 ± 0,01 <sup>ab</sup> |
|              | P <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 14 ± 1,7 <sup>aa</sup>    | 12 ± 1,5 <sup>ab</sup>    | 12 ± 3,9 <sup>ba</sup>   | 16 ± 5,2 <sup>ab</sup>   | 36 ± 5,0 <sup>ca</sup>   | 10 ± 5,8 <sup>ab</sup>   |
|              | K <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 61 ± 12,2 <sup>aa</sup>   | 49 ± 9,8 <sup>ab</sup>    | 66 ± 14,8 <sup>ba</sup>  | 35 ± 18,4 <sup>ab</sup>  | 65 ± 18,7 <sup>ca</sup>  | 32 ± 9,2 <sup>ab</sup>   |
|              | C orgánico (Mg ha <sup>-1</sup> )     | 15 ± 0,2 <sup>aa</sup>    | 10 ± 0,1 <sup>ab</sup>    | 12 ± 0,1 <sup>ba</sup>   | 6 ± 0,1 <sup>ab</sup>    | 7 ± 0,01 <sup>ca</sup>   | 5 ± 0,01 <sup>ab</sup>   |
|              | MOS (Mg ha <sup>-1</sup> )            | 26 ± 0,3 <sup>aa</sup>    | 18 ± 0,2 <sup>ab</sup>    | 22 ± 0,2 <sup>ba</sup>   | 10 ± 0,1 <sup>ab</sup>   | 12 ± 0,01 <sup>ca</sup>  | 9 ± 0,01 <sup>ab</sup>   |
|              | Ratio C/N                             | 12 ± 3,3 <sup>aa</sup>    | 8 ± 3,5 <sup>aa</sup>     | 12 ± 3,7 <sup>aa</sup>   | 6 ± 2,8 <sup>ab</sup>    | 8,7 ± 0,7 <sup>ba</sup>  | 4 ± 0,3 <sup>ab</sup>    |
| Madrid       | pH                                    | 8,4 ± 0,2 <sup>aa</sup>   | 8,3 ± 0,2 <sup>aa</sup>   | 8,3 ± 0,1 <sup>aa</sup>  | 8,5 ± 0,1 <sup>ba</sup>  | 8,3 ± 0,1 <sup>a</sup>   | -                        |
|              | N <sub>t</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 775 ± 176,8 <sup>aa</sup> | 899 ± 105,0 <sup>aa</sup> | 525 ± 35,4 <sup>aa</sup> | 667 ± 45,0 <sup>bb</sup> | 500 ± 141,4 <sup>a</sup> | -                        |
|              | P <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 11,5 ± 0,7 <sup>aa</sup>  | 14 ± 0,9 <sup>ab</sup>    | 8 ± 1,5 <sup>aa</sup>    | 9 ± 1,7 <sup>ba</sup>    | 7 ± 4,2 <sup>a</sup>     | -                        |
|              | K <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 325 ± 53,7 <sup>aa</sup>  | 257 ± 42,5 <sup>ab</sup>  | 216 ± 65,7 <sup>aa</sup> | 249 ± 75,7 <sup>ba</sup> | 207 ± 103,2 <sup>a</sup> | -                        |
|              | C orgánico (Mg ha <sup>-1</sup> )     | 20 ± 5,0 <sup>aa</sup>    | 21 ± 5,3 <sup>aa</sup>    | 12 ± 0,6 <sup>aa</sup>   | 13 ± 0,6 <sup>ba</sup>   | 12 ± 5,6 <sup>a</sup>    | -                        |
|              | MOS (Mg ha <sup>-1</sup> )            | 34 ± 0,5 <sup>aa</sup>    | 37 ± 0,5 <sup>aa</sup>    | 20 ± 0,1 <sup>aa</sup>   | 22 ± 0,2 <sup>ba</sup>   | 21 ± 0,3 <sup>a</sup>    | -                        |
|              | Ratio C/N                             | 9 ± 0,2 <sup>aa</sup>     | 8,9 ± 0,2 <sup>aa</sup>   | 8 ± 0,2 <sup>aa</sup>    | 6,9 ± 0,1 <sup>bb</sup>  | 8 ± 1,6 <sup>a</sup>     | -                        |

Los valores medios en filas con diferentes letras de color **negro** indican diferencias estadísticamente significativas entre los muestreos **iniciales**. Los valores medios en filas con diferentes letras de color **azul** indican diferencias estadísticamente significativas entre los muestreos **finales**. Los valores medios en filas con diferentes letras de color **rojo** indican diferencias estadísticamente significativas entre los muestreos **iniciales y finales dentro de cada profundidad** para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 6$ ). N<sub>t</sub>: nitrógeno total del suelo, P<sub>d</sub>: fósforo disponible en el suelo, K<sub>d</sub>: potasio disponible en el suelo, MOS: materia orgánica del suelo, n.d.: no disponible, \*\*Inicial: corresponde al suelo antes de la plantación, \*\*\*Final: corresponde al final del ensayo de descomposición de hojarasca

**Tabla 4.26:** Características del suelo al inicio y al final del ensayo de descomposición de hojarasca en Soria y en Madrid en los primeros 20 cm de suelo

| Localización | Muestreo                              | Inicial**               | Final***                |
|--------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|              | Profundidad (cm)                      | 0-20                    |                         |
| Soria        | pH                                    | 7,0 ± 0,3 <sup>a</sup>  | 6,8 ± 0,3 <sup>b</sup>  |
|              | N <sub>t</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 300 ± 0,02 <sup>a</sup> | 634 ± 0,05 <sup>b</sup> |
|              | P <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 30 ± 11,5 <sup>a</sup>  | 31 ± 11,8 <sup>a</sup>  |
|              | K <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 70 ± 31,4 <sup>a</sup>  | 111 ± 49,7 <sup>b</sup> |
|              | C orgánico (Mg ha <sup>-1</sup> )     | 8 ± 0,2 <sup>a</sup>    | 14 ± 0,3 <sup>b</sup>   |
|              | MOS (Mg ha <sup>-1</sup> )            | 14 ± 0,3 <sup>a</sup>   | 25 ± 0,6 <sup>b</sup>   |
|              | Ratio C/N                             | 10 ± 7,4 <sup>a</sup>   | 12 ± 8,4 <sup>a</sup>   |
| Madrid       | pH                                    | 8,4 ± 0,2 <sup>a</sup>  | 8,3 ± 0,2 <sup>b</sup>  |
|              | N <sub>t</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 775 ± 0,01 <sup>a</sup> | 717 ± 0,01 <sup>a</sup> |
|              | P <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 30 ± 4,1 <sup>a</sup>   | 13 ± 1,8 <sup>b</sup>   |
|              | K <sub>d</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) | 370 ± 42,1 <sup>a</sup> | 321 ± 36,5 <sup>b</sup> |
|              | C orgánico (Mg ha <sup>-1</sup> )     | 20 ± 0,05 <sup>a</sup>  | 22 ± 0,06 <sup>b</sup>  |
|              | MOS (Mg ha <sup>-1</sup> )            | 34 ± 0,1 <sup>a</sup>   | 38 ± 0,1 <sup>b</sup>   |
|              | Ratio C/N                             | 9 ± 2,8 <sup>a</sup>    | 10 ± 3,1 <sup>a</sup>   |

Los valores medios en filas con diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre el muestreo inicial y final dentro de la profundidad de 0-20 cm para un nivel de confianza del 95% ( $P < 0,05$ ,  $n = 6$ ). N<sub>t</sub>: nitrógeno total del suelo, P<sub>d</sub>: fósforo disponible en el suelo, K<sub>d</sub>: potasio disponible en el suelo, MOS: materia orgánica del suelo, \*\*Inicial: corresponde al inicio de la colocación de las bolsas de hojarasca, \*\*\*Final: corresponde al final del ensayo de descomposición de hojarasca. Ambos muestreos son en la zona donde se acumula la hojarasca.

## 4.5 Secuestro del carbono y balance de nutrientes

### 4.5.1 Ensayo 1

En la Tabla 4.27, se muestran los rendimientos de la biomasa área leñosa (tallos + ramas) y foliar, además del C secuestrado por la biomasa permanente y flujo de C a través de las hojas. Los rendimientos y la absorción total de NPK, a lo largo del periodo estudiado, por la biomasa área leñosa (tallos + ramas) y foliar, se indican en la Tabla 4.28, así como también se expone los porcentajes de NPK retornados al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar en relación con la absorción total de NPK por toda la biomasa aérea (leñosa + foliar) (Tabla 4.29).

**Tabla 4.27:** Biomasa permanente, hojarasca foliar, carbono secuestrado y flujo de carbono

| Parámetros                                                       | Unidades                                    |      |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------|
| Biomasa permanente 2006-2009<br>(tallos y ramas)                 | (Mg MS ha <sup>-1</sup> )                   | 25,3 |
| C secuestrado permanentemente por la biomasa                     | (Mg C ha <sup>-1</sup> )                    | 12,4 |
| Producción anual de hojas (2006)                                 | (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | 1,6  |
| Producción anual de hojas (2007)                                 | (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | 4,7  |
| Producción anual de hojas (2008)                                 | (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | 10,3 |
| Producción anual de hojas (2009)                                 | (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | 11,4 |
| Producción de C anual de la hoja                                 | (Mg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )  | 3,2  |
| Flujo de C anual por la descomposición de la<br>hojarasca foliar | (Mg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )  | 2,0  |

**Tabla 4.28:** Absorción total de N, P y K por la biomasa leñosa (tallos + ramas) y la biomasa foliar

| Tipo de biomasa                                                       | Año | Rendimientos<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | N     | P    | K    |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------|-------|------|------|
| .....(x 10 <sup>-3</sup> Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )..... |     |                                                             |       |      |      |
| Biomasa aérea leñosa<br>(tallos + ramas)                              | 0   | 2,6                                                         | 13,2  | 2,0  | 9,4  |
|                                                                       | 1   | 7,5                                                         | 38,1  | 5,7  | 27,1 |
|                                                                       | 2   | 10,9                                                        | 55,3  | 8,3  | 39,3 |
|                                                                       | 3   | 4,3                                                         | 22,8  | 3,3  | 15,5 |
|                                                                       | 4   | 4,6                                                         | 23,3  | 3,5  | 16,6 |
| Biomasa foliar                                                        | 0   | 1,6                                                         | 36,1  | 3,1  | 7,5  |
|                                                                       | 1   | 4,7                                                         | 105,9 | 9,2  | 22,1 |
|                                                                       | 2   | 10,3                                                        | 232,1 | 20,1 | 48,4 |
|                                                                       | 3   | 11,4                                                        | 256,9 | 22,2 | 53,6 |
|                                                                       | 4   | 2,6                                                         | 58,6  | 5,1  | 12,2 |

**Tabla 4.29:** Retornos de NPK al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar (expresado como %) en relación con la absorción total de NPK por la biomasa aérea total (leñosa + foliar)

| Año            | N     | P     | K     |
|----------------|-------|-------|-------|
| ..... (%)..... |       |       |       |
| 0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   |
| 1              | 8,2   | 11,2  | 5,9   |
| 2              | 15,0  | 17,9  | 8,9   |
| 3              | 40,4  | 52,1  | 30,3  |
| 4              | 212,5 | 217,0 | 103,1 |

#### 4.5.2 Ensayo 2

En la Tabla 4.30, para ambas localizaciones, se muestran los rendimientos de la biomasa área leñosa y foliar, el C secuestrado por la biomasa permanente y flujo de C a través de las hojas para el periodo 2007-2010. Además, se presentan estos mismos resultados para Madrid en el periodo que va desde 2007 hasta 2011. En la Tabla 4.31, se indican los rendimientos y la absorción total de NPK, a lo largo del periodo estudiado, por la biomasa área leñosa y foliar. También se exponen los porcentajes de NPK

retornados al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar en relación con la absorción total de NPK por toda la biomasa aérea (leñosa + foliar) (Tabla 4.32).

**Tabla 4.30:** Biomasa permanente, hojarasca foliar, carbono secuestrado y flujo de carbono

| Parámetros                                                    | Unidades                                    | Período 2007-2010 |        | Período 2007-2011 |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------|--------|-------------------|
|                                                               |                                             | Soria             | Madrid | Madrid            |
| Biomasa permanente (tallos y ramas)                           | (Mg MS ha <sup>-1</sup> )                   | 21,1              | 59,1   | 73,2              |
| C secuestrado permanentemente por la biomasa                  | (Mg C ha <sup>-1</sup> )                    | 10,2              | 28,6   | 35,4              |
| Producción anual de hojas (2007)                              | (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | 2,30              | 9,11   | 9,11              |
| Producción anual de hojas (2008)                              | (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | 5,07              | 16,07  | 16,07             |
| Producción anual de hojas (2009)                              | (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | 2,17              | 7,05   | 7,05              |
| Producción anual de hojas (2010)                              | (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | 4,98              | 12,41  | 12,41             |
| Producción anual de hojas (2011)                              | (Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | n.d.              | n.d.   | 17,76             |
| Producción de C anual de la hoja                              | (Mg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )  | 1,59              | 4,32   | 5,15              |
| Flujo de C anual por la descomposición de la hojarasca foliar | (Mg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )  | 1,40              | 4,04   | 5,00              |

n.d.: no disponible.

**Tabla 4.31:** Absorción total de N, P y K por la biomasa leñosa (tallos + ramas) y la biomasa foliar

| Tipo de biomasa                          | Año | Soria                                                       |                                                             |     |      | Madrid                                                      |                                                             |      |       |
|------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----|------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------|-------|
|                                          |     | Rendimientos<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | N                                                           | P   | K    | Rendimientos<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) | N                                                           | P    | K     |
|                                          |     |                                                             | (x 10 <sup>-3</sup> Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) |     |      |                                                             | (x 10 <sup>-3</sup> Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) |      |       |
| Biomasa aérea leñosa<br>(tallos + ramas) | 0   | 3,9                                                         | 13,3                                                        | 3,3 | 16,0 | 15,4                                                        | 52,5                                                        | 13,1 | 63,3  |
|                                          | 1   | 5,8                                                         | 19,9                                                        | 5,0 | 24,0 | 15,4                                                        | 52,5                                                        | 13,1 | 63,3  |
|                                          | 2   | 4,3                                                         | 21,7                                                        | 3,3 | 14,3 | 14,1                                                        | 70,5                                                        | 10,9 | 46,5  |
|                                          | 3   | 7,0                                                         | 34,9                                                        | 5,4 | 23,0 | 14,1                                                        | 70,5                                                        | 10,9 | 46,5  |
|                                          | 4   | 4,2                                                         | 20,9                                                        | 3,2 | 13,8 | 14,1                                                        | 70,5                                                        | 10,9 | 46,5  |
| Biomasa foliar                           | 0   | 2,3                                                         | 14,9                                                        | 2,6 | 14,7 | 9,1                                                         | 82,4                                                        | 6,3  | 68,9  |
|                                          | 1   | 5,1                                                         | 32,9                                                        | 5,6 | 32,3 | 16,1                                                        | 145,3                                                       | 11,1 | 121,5 |
|                                          | 2   | 2,2                                                         | 14,1                                                        | 2,4 | 13,8 | 7,0                                                         | 63,8                                                        | 4,9  | 53,3  |
|                                          | 3   | 5,0                                                         | 32,3                                                        | 5,5 | 31,7 | 12,4                                                        | 112,2                                                       | 8,6  | 93,8  |
|                                          | 4   | 6,5                                                         | 42,2                                                        | 7,2 | 41,5 | 18,6                                                        | 168,3                                                       | 12,9 | 140,7 |

**Tabla 4.32:** Retornos de NPK al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar (expresado como %) en relación con la absorción total de NPK por la biomasa aérea total (leñosa + foliar)

| Localización | Año | N             | P    | K    |
|--------------|-----|---------------|------|------|
|              |     | .....(%)..... |      |      |
| Soria        | 0   | 0,0           | 0,0  | 0,0  |
|              | 1   | 0,0           | 6,7  | 13,6 |
|              | 2   | 3,5           | 38,1 | 60,3 |
|              | 3   | 15,9          | 31,1 | 35,2 |
|              | 4   | 38,6          | 48,8 | 68,3 |
| Madrid       | 0   | 0,0           | 0,0  | 0,0  |
|              | 1   | 0,0           | 0,0  | 20,8 |
|              | 2   | 29,6          | 17,9 | 80,8 |
|              | 3   | 46,8          | 41,1 | 66,8 |
|              | 4   | 36,6          | 22,1 | 61,6 |



## **DISCUSIÓN**



## 5 DISCUSIÓN

### 5.1 Producción de biomasa

#### 5.1.1 Biomasa leñosa

##### 5.1.1.1 Ensayo 1

###### 5.1.1.1.1 Periodo vegetativo de la plantación

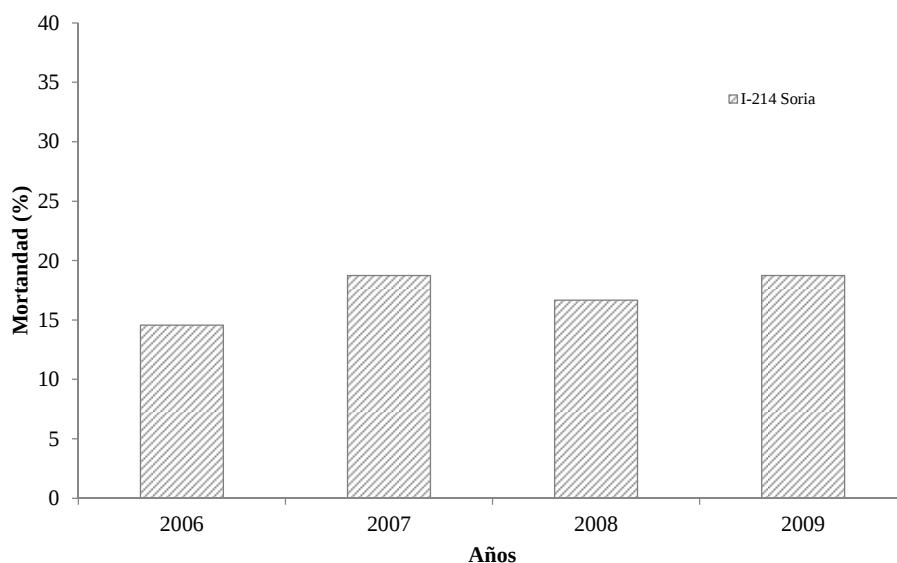
La duración del periodo vegetativo varía en función de las condiciones climatológicas de cada año y fue de 139 hasta 165 días para los años 2008 y 2009, respectivamente (Tabla 4.1). Esta diferencia estuvo marcada, principalmente por el momento de la brotación.

La fecha de inicio de la brotación, ha sido siempre posterior al 1 de abril con una diferencia máxima de 15 días entre los años considerados. La brotación más temprana fue en 2009 (03/04), este año hubo una temperatura media en el mes de marzo de casi 2°C mayor que la media de los años anteriores. El cerrado de yemas fue, en general, en la segunda quincena de septiembre.

La duración del periodo vegetativo aquí registrada es inferior a la detectada en chopo en otras zonas, incluso en la zona Este de la misma provincia se han llegado a registrar periodos superiores a los indicados en 1 mes (datos no publicados).

###### 5.1.1.1.2 Supervivencia

A lo largo del periodo estudiado no se detectó diferencia significativa en el porcentaje de mortandad (Figura 5.1), siendo la media de 17,2%. Según algunos autores la muerte de un árbol puede producirse por estar sometido a cambios bruscos de temperatura (Donozo 1981), a un periodo de sequía prolongado (Franklin et al. 1987), a los efectos mecánicos o fisiológicos del viento (Laurance et al. 2000), a la humedad del suelo (Donozo 1981) y a la competencia por recursos, tales como luz, nutrientes y agua (Bigler y Bugmann 2003). En el presente estudio, tal como indican los resultados, únicamente se produjo mortandad el año de implantación, registrándose una supervivencia del 85% (Tabla 4.2)



**Figura 5.1:** Evolución del porcentaje de mortandad a lo largo del periodo 2006-2009

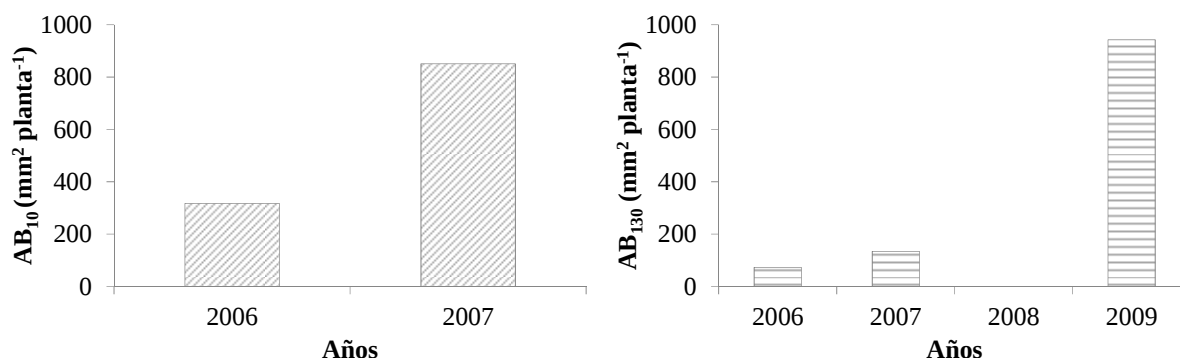
#### 5.1.1.1.3 Número de brotes, diámetros y altura

Durante el primer año, 2006, la mayor parte de los arboles presentaron un solo brote, aumentando estos después del recepe (corta a 1 año). El número de brotes por planta del clon I-214 tras el recepe (2007) aumentó significativamente más de 6 veces respecto al primer año. Posteriormente, en el año 2008 se produjo un descenso significativo del número de brotes, atribuido a la auto poda causada por la competencia entre plantas y manteniéndose en el rebrote de 2009 (Tabla 4.3).

Respecto a los diámetros existen diferencias significativas tanto entre los diámetros medios basales ( $D_{10}$ ) como entre los normales ( $D_{130}$ ), siendo inferiores cuando la edad de la raíz es mayor y el número de brotes aumenta.

No hubo diferencias significativas en cuanto a la altura dominante ( $H_{dom}$ ) entre los años 2006 y 2007, ni entre 2008 y 2009, pero si hubo entre los dos primeros con los dos últimos años del primer ciclo de rotación, apreciándose que la  $H_{dom}$  aumentó unas 2,5 veces respecto al año de implantación (Tabla 4.3).

El diámetro medio de cada brote no es indicativo del crecimiento si no va acompañado del número de brotes, por lo que se opta por el cálculo del área basimétrica (AB) para cada cepa (Figura 5.2).



**Figura 5.2:** Área basimétrica a 10 y 130 cm de altura a lo largo del periodo estudiado

El  $AB_{10}$  fue unas 2,7 veces superior para plantas R2T1 que para R1T1 y para el  $AB_{130}$  esta diferencia fue de 1,8 veces. Para plantas R4T3 el  $AB_{130}$  multiplicó por 13 el valor de  $AB_{130}$  de plantas al final del año de implantación (R1T1) y por 7 el de plantas R2T1.

#### 5.1.1.1.4 Producciones

En el primer ciclo de corta de tres años (Tabla 4.4), las máximas producciones se obtuvieron el año 2008 (10,9 Mg MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 18,3 Mg MS ha<sup>-1</sup>), esto se atribuyó a la precipitación registrada (Figura 3.5) durante un período en el cual la humedad es crítica para el crecimiento de la planta (mayo a agosto).

Las producciones obtenidas para el clon 1-214 para una densidad de 25.000 plantas ha<sup>-1</sup> fueron menores que las que reportaron para este mismo clon, con distinta densidad de plantación, autores como Facciotto et al. (2006) y Liberloo et al. (2006). En cambio, en una zona donde el suelo era de baja calidad como el de la zona aquí estudiada, obtuvieron producciones en línea con las obtenidas en Soria para el clon I-214 (Paris et al. 2011).

#### 5.1.1.1.5 Modelos de estimación de la producción

Para los periodos vegetativos 2006, 2007 y 2009 se obtuvieron varios modelos de regresión no lineal (Tabla 5.1) para poder estimar la producción de biomasa leñosa seca por planta, ya que según Oliveira et al. 2015 para cada rotación se debe desarrollar diferentes ecuaciones, dado que de otra forma, se podría subestimar la producción de

biomasa leñosa seca. Además, se buscó obtener modelos lo más simples posibles y de fácil manejo, según lo observado en bibliografía para estimar la producción de chopo se utilizan ecuaciones polinómicas de segundo grado (Riemenschneider et al 2001; Netzer et al. 2002) o potenciales, ya que según Pontailier et al. (1997) las ecuaciones potenciales proporcionan un mayor ajuste que una función lineal cuando se trata de un sistema de cultivo de chopo en corta rotación. La variable independiente considerada fue el área basal a 10 ( $AB_{10}$ ) o 130 ( $AB_{130}$ ) cm de altura y la variable dependiente la producción de biomasa leñosa seca en gramos por planta (BS).

Según el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ), para las ecuaciones modelizadas en cada periodo vegetativo estudiado se observó que, en el primer periodo vegetativo de la plantación, el mejor modelo de regresión no lineal para estimar la biomasa leñosa seca ( $g\ planta^{-1}$ ) es un modelo potencial en el que la variable independiente es  $AB_{10}$  (Tabla 5.1).

En el año 2007 y 2009, según el  $R^2$ , los modelos que mejor se ajustan para estimar la biomasa leñosa seca son también modelos potenciales, ya que en estos modelos fue donde se observó el valor del  $R^2$  mayor, siendo este 86,3% y 96,5%, respectivamente. Aunque para estos años, se apreció que los mejores resultados se obtuvieron cuando se utilizó el  $AB_{130}$  como variable independiente y no el  $AB_{10}$  como en el año 2006. Probablemente, que el  $AB_{130}$  sea la variable más adecuada en estos dos últimos años estudios se deba a la estructura de la planta (numerosos brotes de cepa con diferente altura y diámetro).

Todos los modelos seleccionados para cada corta efectuada, además de ser los que mayor  $R^2$  presentaron, también fueron los que menor error medio (ME) y error absoluto medio (MAE) mostraron, tanto para el modelo como para la validación del modelo. Por tanto, estos son los que más eficazmente describen la variable dependiente para estos años (modelos seleccionados sombreados en gris en la Tabla 5.1). Estas correlaciones están en línea con las de otros estudios (Di Matteo et al 2012) incluso con aquellos obtenidos para plantaciones de chopo de mayor edad que las aquí estudiadas (Truax et al. 2014).

**Tabla 5.1:** Modelos de regresión no lineal para estimar la producción de biomasa seca aérea (g planta<sup>-1</sup>) en el ensayo 1

| Año  | Modelo de regresión                                                                      | Modelo                     |       | Validación |       |       | AB media<br>(mm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> ) | CV<br>(%) |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|------------|-------|-------|-----------------------------------------------------|-----------|
|      |                                                                                          | R <sup>2</sup><br>ajustada | MAE   | ME         | MAE   | ME    |                                                     |           |
| 2006 | BS = 16,2444 + 0,250157*AB <sub>10</sub> + 0,000243526*(AB <sub>10</sub> ) <sup>2</sup>  | 88,7                       | 16,1  | -0,0002    | 16,8  | -3,6  | 316,6 ± 140,1                                       | 44,3      |
|      | BS = 0,3743*(AB <sub>10</sub> ) <sup>1,0053</sup>                                        | 89,0                       | 14,0  | -0,0006    | 15,7  | -13,6 |                                                     |           |
|      | BS = 66,8347 + 0,780059*AB <sub>130</sub> + 0,00177362*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup> | 57,1                       | 28,63 | 2,2063     | 29,9  | -1,0  | 66,9 ± 44,8                                         | 67,0      |
|      | BS = 17,397*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,4818</sup>                                       | 55,0                       | 30,20 | 6,1650     | 25,6  | -3,5  |                                                     |           |
| 2007 | BS = 67,7283 + 0,198054*AB <sub>10</sub> + 0,0000634113*(AB <sub>10</sub> ) <sup>2</sup> | 69,3                       | 47,7  | 8,1449     | 46,1  | 42,8  | 883,3 ± 336,7                                       | 38,1      |
|      | BS = 0,5474*(AB <sub>10</sub> ) <sup>0,9275</sup>                                        | 79,2                       | 36,7  | 4,5952     | 52,7  | 12,5  |                                                     |           |
|      | BS = 193,279-0,571688*AB <sub>130</sub> + 0,00770895*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>   | 79,9                       | 35,0  | 0,0012     | 94,8  | 1,0   | 145,6 ± 58,8                                        | 40,4      |
|      | BS = 12,623*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,6339</sup>                                       | 86,3                       | 33,2  | -0,0010    | 33,3  | -1,5  |                                                     |           |
| 2009 | BS = 218,42 + 0,451746*AB <sub>130</sub> + 0,000349907*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup> | 95,0                       | 90,5  | 13,5813    | 215,7 | 75,3  | 890,8 ± 504,9                                       | 56,7      |
|      | BA = 1,3261*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,9717</sup>                                       | 96,5                       | 87,1  | -0,0002    | 155,6 | 38,3  |                                                     |           |

BS: producción de biomasa aérea (g planta<sup>-1</sup>), AB<sub>10</sub>: área basal a 10 cm de altura (mm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), AB<sub>130</sub>: área basal a 130 cm de altura (mm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación ajustado, MAE: error medio absoluto, ME: error medio, AB media: área basal media ± desviación típica, CV: coeficiente de variación. Modelos sombreados en gris: seleccionados para estimar la producción de biomasa leñosa aérea.

Las estimaciones de producción acumulada, mediante las ecuaciones de regresión seleccionadas (Tabla 5.1), subestiman las producciones reales en un 1,0, 20,8 y 8,7% para los años 2006, 2007 y 2009, respectivamente (Tabla 5.2). La peor estimación resulta ser la del primer año de rebrote tras el recepe, lo que hace pensar que a mayor desarrollo de la planta rebrotada la estimación es más fiable.

**Tabla 5.2:** Producciones reales y estimadas en el ensayo 1

| Año  | Edad de<br>plantación<br>(años) | Producción<br>real<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> ) | Producción<br>estimada<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> ) | Δ<br>(%) |
|------|---------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------|
| 2006 | R1T1                            | 2,64                                            | 2,61                                                | -1,00    |
| 2007 | R2T1                            | 7,5                                             | 5,94                                                | -20,83   |
| 2009 | R4T3                            | 22,7                                            | 20,72                                               | -8,72    |

R: raíz, T: tallo, Δ: el porcentaje de diferencia asociado al uso de modelos para estimar la producción de biomasa leñosa aérea sobre la realidad

### 5.1.1.2 Ensayo 2

#### 5.1.1.2.1 Periodo vegetativo de la plantación

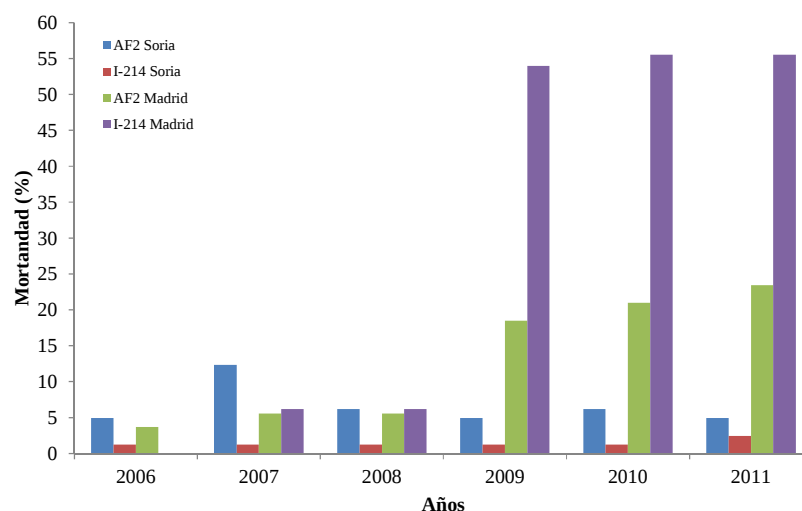
La duración del periodo vegetativo, en Soria, varía para cada año y clon (Tabla 4.5), siendo más corto en el clon AF2 (130-161 días) que en el clon I-214 (139-165). En general, la fecha de inicio de la brotación es más tardía en el AF2, llegando a retrasarse casi un mes en 2009, coincidiendo en las precipitaciones menores durante los tres primeros meses del año.

Diferencia semejante entre clones se apreció en Madrid al inicio de la brotación. Comparando el mismo clon entre localizaciones, la fecha de brotación se adelanta en Madrid, atribuido a las temperaturas de 2 a 3°C más altas, en los 3 primeros meses del año, que para el mismo periodo en Soria.

#### 5.1.1.2.2 Supervivencia

El porcentaje de supervivencia registrado en Soria no presenta diferencias estadísticamente significativas entre años para ninguno de los clones estudiados (Tabla 4.6), alcanzándose unas tasas de mortandad inferiores al 5% para ambos clones (Figura 5.3). En Madrid, las diferencias estadísticamente significativas encontradas (Tabla 4.7), para ambos clones, fueron a partir del cuarto año de cultivo (2º turno tras el recepe), llegando en este momento a un porcentaje de mortandad de un 19 y 54% para AF2 e I-214, respectivamente (Figura 5.3). Este porcentaje se mantuvo con pequeñas variaciones no significativas a lo largo de todo el ciclo.

La elevada tasa de mortandad, en Madrid, para el I-214 podría ser atribuida al aumento de la aridez (Benito-Garzón et al. 2013), coincidiendo con el primer año de rebrote del segundo ciclo.



**Figura 5.3:** Evolución del porcentaje de mortandad a lo largo del periodo estudiado

Según la tasa de supervivencia, a lo largo de 6 años, se podría indicar que el clon I-214 es más adecuado para Soria y el clon AF2 lo es para Madrid (Tabla 5.3).

**Tabla 5.3:** Comparativa del porcentaje de supervivencia entre los clones dentro de una misma localización

| Localización | Clon  | Supervivencia (%)        |
|--------------|-------|--------------------------|
| Soria        | AF2   | 93,4 <sup>a</sup> ± 12,1 |
|              | I-214 | 98,6 <sup>b</sup> ± 3,8  |
| Madrid       | AF2   | 86,8 <sup>a</sup> ± 11,9 |
|              | I-214 | 75,6 <sup>b</sup> ± 31,8 |

Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95% (nivel de significación <0,05, n = 27).

Independientemente de la localización no existen diferencias significativas entre la supervivencia de los dos clones (Tabla 5.4), en cambio sí existe diferencias entre localizaciones independientemente del clon.

**Tabla 5.4:** Comparativa de la supervivencia (%) de cada clon independiente de la localización y de cada localización independiente del clon

| <b>Clon</b> | <b>Supervivencia (%)</b> | <b>Localización</b> | <b>Supervivencia (%)</b> |
|-------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| AF2         | 90,1 <sup>a</sup> ± 12,4 | Soria               | 96,0 <sup>a</sup> ± 9,3  |
| I-214       | 88,1 <sup>a</sup> ± 24,4 | Madrid              | 81,6 <sup>b</sup> ± 23,9 |

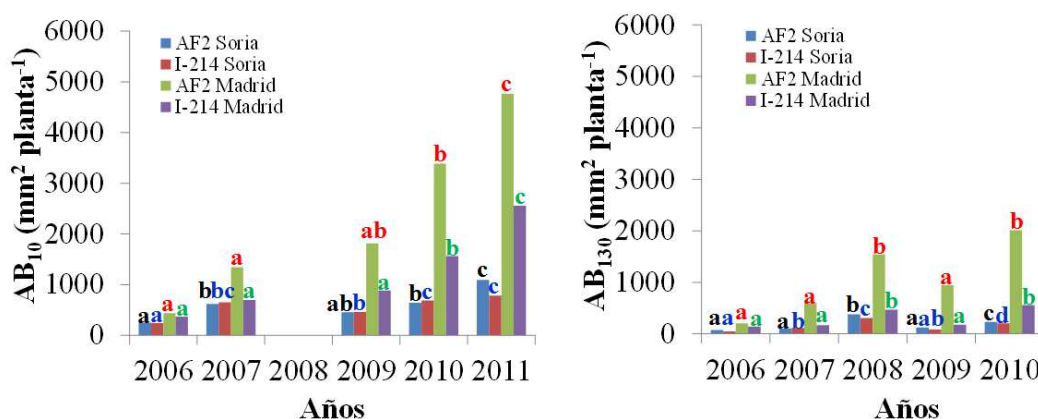
#### 5.1.1.2.3 Número de brotes, diámetros y altura

En Soria, se aprecia una disminución significativa del número de brotes por cepa desde el primer año de cada ciclo hasta el último, disminuyendo de media 25 y 19% en el primer y segundo ciclo, respectivamente para el clon AF2 y un 17 y 38% para el clon I-214 (Tabla 4.8). Estas diferencias también se pusieron de manifiesto en Madrid para la misma edad (Tabla 4.9). Sin embargo, en Madrid, el número de brotes por cepa del segundo ciclo casi se duplicó y se mantiene constante hasta el final del ciclo.

El rango del ensayo global (Soria-Madrid) del diámetro basal a 10 cm de altura ( $D_{10}$ ) por brote es de 8,5 a 16,4 mm y el del diámetro a 130 cm de altura ( $D_{130}$ ) por brote es de 5,1 a 20,1 mm, considerando ambos después del recepe.

En las dos localizaciones la altura fue mayor en el clon AF2 que en el I-214 a la edad de 2 años del tallo, resultados similares fueron encontrados para estos mismos clones en la provincia de León (Sixto et al. 2009a). La altura máxima, en Soria, fue similar para los dos clones (336,5 cm) y, la alcanzada en Madrid fue 583,8 y 369,8 cm para AF2 e I-214 respectivamente, 1,7 y 1,1 veces superior en Madrid que en Soria para ambos clones.

En los dos ciclos de corta, se alcanza una mayor altura media (valores > 400 cm) en el clon AF2 que en el clon I-214 (valores < 300 cm). El clon AF2, en las dos localizaciones estudiadas, tuvo un crecimiento más sobresaliente en cuanto a diámetro por brote. También el área basimétrica calculada fue mayor en el clon AF2 que en el clon I-214 (Figura 5.4), similar a los resultados citados por Hernández et al. (2013) y Sixto et al. (2009b).



**Figura 5.4:** Área basimétrica calculada con diámetros a 10 y 130 cm de altura a lo largo del periodo estudiado

El AB<sub>10</sub> alcanza valores mayores, para ambos clones, en la localización de Madrid que en la de Soria (Figura 5.4); además, es destacable que el clon AF2, en Madrid, alcanza el último año del 2º ciclo de corta un valor de 48 cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>, siendo este valor el doble que el alcanzado por el clon I-214 (26 cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>).

En cuanto al AB<sub>130</sub>, en Soria, los valores obtenidos son similares para los dos clones estudiados (Figura 5.4) mientras que para Madrid se aprecia, al igual que ocurre en el AB<sub>10</sub>, que el clon AF2 es el de mayor valor de AB<sub>130</sub> tiene (20 cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>).

#### 5.1.1.2.4 Producciones

Las producciones obtenidas, para ambos clones estudiados, son menores en Soria que en Madrid (Tabla 4.10). Valores similares, a los de Soria, se han obtenido en la provincia de León (Sixto et al. 2009a) para los mismos clones a la misma edad, un año de raíz y un año de tallo (R1T1). Por otro lado, en el estudio de Baraza (2013) en una plantación de AF2 e I-214 a una densidad de 13.333 plantas ha<sup>-1</sup> con tallos de 3 años de edad se alcanzaron mayores producciones, 60 y 54 t MS ha<sup>-1</sup> respectivamente, que las obtenidas en este estudio para tallos con la misma edad (Tabla 4.10), si bien hay que tener en cuenta que las condiciones edafoclimáticas son diferentes y la densidad muy inferior.

En ambas localidades y, para el clon AF2, la productividad anual se mantiene en el primer y segundo ciclo después del recepe, sin embargo, para el clon I-214, esta productividad anual en el segundo ciclo resulta ser la mitad que en el anterior, por lo que se puede pensar que, en este caso, se haya llegado al máximo potencial. En trabajos

realizados por Armstrong et al. (1999), Laureysens et al. (2003), Laureysens et al. (2005), se apreció que la producción disminuía con los sucesivos turnos. Nassi et al. (2010) indican que con turnos más cortos se puede alcanzar mayores producciones en la segunda o tercera rotación y Pontailier et al. (1999) obtuvo mejores producciones en el segundo ciclo de corta de dos años que en el primero.

El AF2 alcanza mayores producciones en el segundo ciclo de corta tras el recepe (Tabla 4.10), producciones que son muy inferiores a las obtenidas por Nassi et al. (2010) para *Populus deltoides* Bartr. (clon Lux) en Pisa (Italia). Valores en línea con los obtenidos para AF2 con un tallo de 2 años de edad, en Madrid, fueron obtenidos por Armstrong et al. 1999 para el clon *Populus trichocarpa* x *P. deltoides* “Beaupré”.

Analizando el efecto de la densidad de plantación (25.000 plantas ha<sup>-1</sup>, ensayo 1 y 33.333 plantas ha<sup>-1</sup>, ensayo 2) para el I-214 cultivado en Soria, se encuentran diferencias significativas en supervivencia, número de brotes por cepa y altura. Con mayor densidad hubo mayor supervivencia (96%), menor número de brotes por cepa (3,4) y menor altura (236,7 cm). La mayor competencia entre plantas afectó al número de brotes por cepa pero no provocó mayor mortandad.

La productividad presentó diferencia significativa entre densidades de plantación para el I-214. Con densidad de 33.333 plantas ha<sup>-1</sup> se obtuvieron 4,7 t MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, un 75% de la productividad obtenida con 25.000 plantas ha<sup>-1</sup> (6,2 t MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>).

A lo largo de todo el presente estudio la humedad de la biomasa en el momento de la recolección fue similar en todas las situaciones consideradas (media 50,2%).

#### 5.1.1.2.5 Modelos de estimación de la producción

Los modelos de regresión no lineal estimados para el año de implantación (2006) y para el primer ciclo de corta (dos años) son modelos sencillos y de fácil manejo, utilizando ecuaciones potenciales o polinómicas de segundo grado (Tabla 5.5) comunes en plantaciones de leñosas (Lamerre et al. 2015; Fajman et al. 2009). Las variables independientes fueron el AB<sub>10</sub> o el AB<sub>130</sub> y la variable dependiente la producción de biomasa leñosa en gramos por planta (BS).

En Soria, en el año 2006, tanto para el AF2 como para el I-214, los modelos que mejor se ajustaron fueron los que utilizan AB<sub>10</sub> (R<sup>2</sup> 90,2 y 93,2 para AF2 e I-214,

respectivamente) frente al  $AB_{130}$  ( $R^2$  79,3 para el AF2 y 78,5 para I-214), corroborando los datos del ensayo 1. Las ecuaciones (Tabla 5.5) seleccionadas, para cada clon, son las de menor ME y MAE, tanto para el modelo como para la validación del mismo; por tanto estos modelos se consideran los más eficaces para describir la variable dependiente para el año de implantación.

En Madrid, sin embargo, los modelos que mejor se ajustan para evaluar la producción de biomasa seca leñosa por planta, para el 2006, son los que utilizan  $AB_{130}$  ( $R^2$  98,7 para el AF2 y 97,3 para I-214), que son los que menor ME y MAE y, por tanto, los más satisfactorios, ello podría deberse al mayor tamaño del árbol en esta localización (Figura 5.4).

**Tabla 5.5:** Modelos de regresión no lineal para estimar la producción de biomasa seca aérea (g planta<sup>-1</sup>) en el ensayo 2

| Año  | Localización | Clon  | Modelo de regresión                                                                        | Modelo                     |       |          | Validación |        | AB media<br>(mm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> ) | CV<br>(%) |
|------|--------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|----------|------------|--------|-----------------------------------------------------|-----------|
|      |              |       |                                                                                            | R <sup>2</sup><br>ajustada | MAE   | ME       | MAE        | ME     |                                                     |           |
| 2006 | Soria        | AF2   | BS = -10,1082 + 0,371252*AB <sub>10</sub> + 0,0000636971*(AB <sub>10</sub> ) <sup>2</sup>  | 88,3                       | 15,9  | 1,3663   | 9,4        | -1,8   | 256,3 ± 151,3                                       | 59,0      |
|      |              |       | BS = 0,0779*(AB <sub>10</sub> ) <sup>1,2606</sup>                                          | 90,2                       | 15,3  | -0,0005  | 8,1        | -2,4   |                                                     |           |
|      |              | I-214 | BS = 5,98238 + 0,187004*AB <sub>10</sub> + 0,000469803*(AB <sub>10</sub> ) <sup>2</sup>    | 82,5                       | 8,8   | 2,0690   | 15,1       | -1,4   | 220,7 ± 92,8                                        | 42,1      |
|      |              |       | BS = 0,1278*(AB <sub>10</sub> ) <sup>1,1707</sup>                                          | 93,2                       | 8,1   | -0,0002  | 13,5       | -6,5   |                                                     |           |
|      | Madrid       | AF2   | BS = -3,79383 + 0,293365*AB <sub>10</sub> + 0,000260407*(AB <sub>10</sub> ) <sup>2</sup>   | 97,9                       | 24,9  | 1,6359   | 37,7       | -18,4  | 447,4 ± 400,6                                       | 89,5      |
|      |              |       | BS = 0,0401*(AB <sub>10</sub> ) <sup>1,3813</sup>                                          | 98,3                       | 21,4  | -0,0003  | 37,3       | -20,0  |                                                     |           |
|      |              | I-214 | BS = -13,0906 + 0,297692*AB <sub>10</sub> + 0,00034594*(AB <sub>10</sub> ) <sup>2</sup>    | 97,7                       | 14,9  | 0,3865   | 18,8       | -16,2  | 411,4 ± 213,4                                       | 51,9      |
|      |              |       | BS = 0,0238*(AB <sub>10</sub> ) <sup>1,4717</sup>                                          | 97,9                       | 14,7  | 0,0010   | 17,2       | -17,8  |                                                     |           |
|      | Soria        | AF2   | BS = 34,5554 + 1,2056*AB <sub>130</sub> - 0,0000883795*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>   | 78,7                       | 21,4  | 3,9512   | 23,9       | -19,2  | 64,6 ± 47,8                                         | 74,0      |
|      |              |       | BS = 8,0524*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,6376</sup>                                         | 79,3                       | 20,8  | -0,0009  | 20,9       | -22,1  |                                                     |           |
|      |              | I-214 | BS = 24,9244 + 1,54657*AB <sub>130</sub> - 0,00294513*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>    | 75,8                       | 14,2  | 2,5720   | 19,3       | 6,9    | 42,7 ± 30,1                                         | 70,5      |
|      |              |       | BS = 11,287*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,5394</sup>                                         | 78,5                       | 13,2  | -0,0005  | 18,1       | 3,4    |                                                     |           |
| 2008 | Madrid       | AF2   | BS = 24,0747 + 0,636334*AB <sub>130</sub> + 0,000811422*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>  | 90,4                       | 54,9  | 28,11085 | 38,4       | 38,4   | 233,6 ± 220,2                                       | 94,3      |
|      |              |       | BS = 2,1557*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,8606</sup>                                         | 98,7                       | 17,0  | -0,00002 | 15,0       | -7,3   |                                                     |           |
|      |              | I-214 | BS = 9,90624 + 1,03964*AB <sub>130</sub> + 0,000133792*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>   | 94,3                       | 15,9  | 3,4976   | 33,4       | -31,9  | 161,1 ± 118,1                                       | 73,3      |
|      |              |       | BS = 1,6173*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,9296</sup>                                         | 97,3                       | 15,1  | -0,0011  | 33,2       | -32,4  |                                                     |           |
|      | Soria        | AF2   | BS = 128,118 + 0,832963*AB <sub>130</sub> + 0,000271169*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>  | 68,4                       | 97,9  | 26,7771  | 92,7       | 45,6   | 363,2 ± 227,3                                       | 62,6      |
|      |              |       | BS = 8,9063*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,6738</sup>                                         | 79,4                       | 90,0  | 0,0003   | 81,1       | 3,3    |                                                     |           |
|      |              | I-214 | BS = 83,5524 + 1,15368*AB <sub>130</sub> - 0,000300268*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>   | 67,9                       | 71,4  | 12,8459  | 106,1      | 24,0   | 284,7 ± 164,4                                       | 57,7      |
|      |              |       | BS = 5,681*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,7429</sup>                                          | 71,5                       | 69,9  | -0,0011  | 101,1      | 14,2   |                                                     |           |
|      | Madrid       | AF2   | BS = -118,794 + 1,37514*AB <sub>130</sub> + 0,0000641446*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup> | 92,9                       | 252,4 | 152,325  | 220,7      | 157,6  | 1486,5 ± 1240,3                                     | 83,4      |
|      |              |       | BS = 0,8166*(AB <sub>130</sub> ) <sup>1,0659</sup>                                         | 97,9                       | 196,5 | 0,001    | 216,9      | -2,6   |                                                     |           |
|      |              | I-214 | BS = 21,46 + 0,984404*AB <sub>130</sub> + 0,000535801*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>    | 88,9                       | 136,5 | 99,7595  | 237,4      | 100,9  | 408,8 ± 451,9                                       | 110,5     |
|      |              |       | BS = 2,0602*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,9267</sup>                                         | 95,8                       | 82,9  | 0,0014   | 172,7      | -159,6 |                                                     |           |

BS: producción de biomasa aérea (g planta<sup>-1</sup>), AB<sub>10</sub>: área basal a 10 cm de altura (mm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), AB<sub>130</sub>: área basal a 130 cm de altura (mm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación ajustado, MAE: error medio absoluto, ME: error medio, AB media: área basal media ± desviación típica, CV: coeficiente de variación. Modelos sombreados en gris: seleccionados para estimar la producción de biomasa leñosa aérea.

En ambas localizaciones (Tabla 5.5), para la corta de 2008, se estimaron los modelos considerando únicamente, como variable independiente, el  $AB_{130}$ , dado que en el ensayo 1, a partir del año de implantación, la variable más adecuada fue  $AB_{130}$ . El criterio de selección de los modelos fue el mismo que el seguido en el año de implantación.

Para todos los ensayos y localizaciones considerados en este estudio el modelo potencial es el que mejor se ajusta para estimar la biomasa leñosa seca por planta, considerando como variable de la función el  $AB_{130}$ , con la única excepción para el año de implantación, en Soria, donde la variable independiente  $AB_{10}$ , resulta ser la más adecuada.

Cuando se estimaron modelos de regresión no lineal para cada clon estudiado independientemente de la localización, los mejores ajustes se consiguieron con modelos polinómicos de segundo grado (Tabla 5.6). El  $AB_{10}$  siguió siendo la variable independiente más adecuada para estimar la producción en el año de implantación y el  $AB_{130}$  para las cortas después del recepe, considerando siempre para su elección el mayor  $R^2$  y los menores errores.

Resulta difícil comparar estos resultados con otros obtenidos por diferentes autores (Amichev et al. 2010; Johansson y Karacic 2011) debido a las variaciones en las condiciones ambientales y de cultivo. Sin embargo, los modelos alométricos en cuanto al coeficiente de determinación ajustado están, en general, en línea con los obtenidos para el género *Populus* por otros autores (Sabatti et al. 2014; Truax et al. 2012).

**Tabla 5.6:** Modelos de regresión no lineal para estimar la producción de biomasa seca aérea (g planta<sup>-1</sup>) en el ensayo 2 para cada clon independientemente de la localización

| Año  | Clon  | Modelo de regresión                                                                        | Modelo                     |       |          | Validación |       | AB media<br>(mm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> ) | CV<br>(%) |
|------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|----------|------------|-------|-----------------------------------------------------|-----------|
|      |       |                                                                                            | R <sup>2</sup><br>ajustada | MAE   | ME       | MAE        | ME    |                                                     |           |
| 2006 | AF2   | BS = -51,891 + 0,569582*AB <sub>10</sub>                                                   | 90,8                       | 27,7  | -0,0004  | 30,3       | -7,1  | 291,1 ± 227,2                                       | 78,1      |
|      |       | BS = -69,9559 + 0,513377*AB <sub>10</sub> + 0,192072*H                                     | 90,9                       | 27,2  | -0,0002  | 34,8       | -5,4  |                                                     |           |
|      |       | BS = 2,82637 + 0,2484*AB <sub>10</sub> + 0,000285718*(AB <sub>10</sub> ) <sup>2</sup>      | 96,4                       | 17,4  | -0,0009  | 15,3       | -24,5 |                                                     |           |
|      |       | BS = 0,0627*(AB <sub>10</sub> ) <sup>1,3014</sup>                                          | 93,0                       | 19,2  | 3,0619   | 15,8       | -4,7  | 97,9 ± 123,7                                        | 126,4     |
|      |       | BS = 31,143 + 1,10894*AB <sub>130</sub>                                                    | 92,0                       | 28,6  | -0,0005  | 28,4       | -7,3  |                                                     |           |
|      |       | BS = 106,432 + 1,36551*AB <sub>130</sub> - 0,49941*H                                       | 92,3                       | 29,5  | -0,0004  | 26,3       | -20,4 |                                                     |           |
|      |       | BS = 50,2485 + 0,777477*AB <sub>130</sub> + 0,000541299*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>  | 93,3                       | 28,1  | -0,0005  | 23,6       | -19,0 |                                                     |           |
|      |       | BS = 7,2727*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,6526</sup>                                         | 81,5                       | 32,5  | 10,2741  | 33,8       | -19,4 |                                                     |           |
|      | I-214 | BS = -41,9047 + 0,531486*AB <sub>10</sub>                                                  | 94,5                       | 12,2  | -0,00005 | 20,3       | -8,9  | 254,9 ± 142,0                                       | 55,7      |
|      |       | BS = -60,6086 + 0,440879*AB <sub>10</sub> + 0,22688*H                                      | 95,0                       | 11,2  | -0,0002  | 19,1       | -11,8 |                                                     |           |
|      |       | BS = 1,81629 + 0,216423*AB <sub>10</sub> + 0,000431095*(AB <sub>10</sub> ) <sup>2</sup>    | 97,4                       | 9,1   | -0,0006  | 15,8       | -12,5 |                                                     |           |
|      |       | BS = 0,0756*(AB <sub>10</sub> ) <sup>1,2706</sup>                                          | 89,2                       | 11,0  | 3,1979   | 16,1       | -7,2  | 67,8 ± 76,7                                         | 113,1     |
|      |       | BS = 36,2255 + 1,00243*AB <sub>130</sub>                                                   | 92,6                       | 15,5  | -0,0001  | 24,8       | -5,9  |                                                     |           |
|      |       | BS = 32,072 + 0,981965*AB <sub>130</sub> + 0,0280488*H                                     | 92,5                       | 15,5  | -0,0005  | 24,7       | -5,8  |                                                     |           |
|      |       | BS = 35,7318 + 1,01607*AB <sub>130</sub> - 0,0000420749*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>  | 92,5                       | 15,5  | -0,0003  | 24,9       | -5,9  |                                                     |           |
|      |       | BS = 8,9162*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,5967</sup>                                         | 80,4                       | 18,7  | 5,2406   | 25,5       | -3,4  |                                                     |           |
|      | AF2   | BS = -140,683 + 1,58193*AB <sub>10</sub>                                                   | 97,6                       | 182,3 | -0,002   | 168,1      | 12,2  | 934,1 ± 1057,6                                      | 113,2     |
|      |       | BS = 177,77 + 1,737*AB <sub>130</sub> - 1,02715*H                                          | 97,9                       | 162,2 | 0,001    | 142,2      | -2,7  |                                                     |           |
|      |       | BS = -14,5825 + 1,26392*AB <sub>130</sub> + 0,0000860399*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup> | 98,1                       | 145,0 | -0,004   | 141,8      | -6,6  |                                                     |           |
|      | I-214 | BS = 1,8392*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,9494</sup>                                         | 88,8                       | 263,1 | 152,410  | 235,3      | 172,9 | 341,3 ± 332,6                                       | 97,4      |
|      |       | BS = -68,551 + 1,63538*AB <sub>130</sub>                                                   | 89,9                       | 110,4 | 0,0004   | 129,5      | -34,4 |                                                     |           |
|      |       | BS = -9,35489 + 1,72075*AB <sub>130</sub> - 0,264639*H                                     | 90,0                       | 108,6 | 0,0001   | 181,9      | -39,9 |                                                     |           |
|      |       | BS = 72,4403 + 0,811577*AB <sub>130</sub> + 0,000619971*(AB <sub>130</sub> ) <sup>2</sup>  | 94,1                       | 88,4  | -0,0001  | 126,7      | -98,9 |                                                     |           |
|      |       | BS = 2,3636*(AB <sub>130</sub> ) <sup>0,9015</sup>                                         | 86,2                       | 110,0 | 51,4832  | 139,1      | 53,7  |                                                     |           |

BS: producción de biomasa aérea (g planta<sup>-1</sup>), AB<sub>10</sub>: área basal a 10 cm de altura (mm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), AB<sub>130</sub>: área basal a 130 cm de altura (mm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación ajustado, MAE: error medio absoluto, ME: error medio, AB media: área basal media ± desviación típica, CV: coeficiente de variación. Modelos sombreados en gris: seleccionados para estimar la producción de biomasa leñosa aérea.

Las estimaciones de producción acumulada, mediante las ecuaciones de regresión obtenidas, para el año de implantación, subestiman en un 3,8% de media la producción real en Soria y sobreestiman en un 5,2% la de Madrid (Tabla 5.7). Al final del primer ciclo, la situación se invierte. En Soria, usando el modelo seleccionado, se obtiene un 42% más de producción con el clon AF2, y un 4,0% menos para el I-214. En Madrid, en este ciclo, la producción se sobrevalora un 5,9% de media.

La predicción de la producción obtenida con la aplicación de los modelos seleccionados (Tabla 5.5, modelos sombreados) se considera adecuada, ya que difiere en menos del 10% de la producción real obtenida, salvo para el clon AF2 en Soria.

**Tabla 5.7:** Producciones reales y estimadas en el ensayo 2

| Año  | Edad de<br>plantación<br>(años) | Soria                                           |       |                                                     |       |                 |       | Madrid                                          |       |                                                     |       |                 |       |
|------|---------------------------------|-------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------|-------|-----------------|-------|-------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------|-------|-----------------|-------|
|      |                                 | Producción<br>real<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> ) |       | Producción<br>estimada<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> ) |       | $\Delta$<br>(%) |       | Producción<br>real<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> ) |       | Producción<br>estimada<br>(Mg MS ha <sup>-1</sup> ) |       | $\Delta$<br>(%) |       |
|      |                                 | AF2                                             | I-214 | AF2                                                 | I-214 | AF2             | I-214 | AF2                                             | I-214 | AF2                                                 | I-214 | AF2             | I-214 |
| 2006 | R1T1                            | 2,9                                             | 2,6   | 2,8                                                 | 2,5   | -5,0            | -2,7  | 6,3                                             | 4,8   | 6,4                                                 | 5,2   | 2,2             | 8,3   |
| 2008 | R3T2                            | 9,7                                             | 13,2  | 13,8                                                | 12,7  | 42,0            | -4,0  | 30,9                                            | 17,9  | 28,6                                                | 17,1  | -7,5            | -4,3  |

R: raíz, T: tallo,  $\Delta$ : el porcentaje de diferencia asociado al uso de modelos para estimar la producción de biomasa leñosa aérea sobre la realidad

### 5.1.2 Biomasa foliar

Como en muchos de los bosques caducifolios templados, la mayor parte de la hojarasca se produce en otoño, durante un período relativamente corto (Abelho 2001); se observó que la mayor parte de las hojas caen entre septiembre y noviembre, registrándose el máximo en noviembre (67%). Según Abelho y Graça (1998), los aportes de hojarasca en otoño pueden llegar a ser del 73% (hojas y ramas pequeñas) del total de la cantidad anual caída, y pueden estar compuestos principalmente de hojas. A través de la cantidad de hojas recolectadas mediante el método de trampas (Tabla 4.11), se estimó la relación media de la biomasa foliar frente a biomasa leñosa (tallos +ramas) para cada año, resultando un valor medio de  $0,57 \pm 0,04$ . En cuanto a la cantidad de hojas se observó que aumentó de  $1,6 \text{ t ha}^{-1}$  (año de implantación) a  $11,4 \text{ t ha}^{-1}$  (cuarto periodo vegetativo), lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Lodhiyal y Lodhiyal (1997b), y Meiresonne et al. (2007).

Dentro del ensayo 2, en Soria, para el clon AF2, se estimó la eficiencia de reabsorción para los bioelementos móviles N, P y K (Tabla 4.12), siendo esta 66,6, 36,1 y 51,0%, respectivamente, valores superiores a los obtenidos para *Populus caspica* por Salehi et al. (2013). La eficiencia de uso del nutriente a nivel de la hoja, para estos mismos nutrientes, es 464,2, 1388,1, 319,7 ( $\text{g MS g}^{-1}$  de nutriente), respectivamente. Estos valores, en general, son inferiores a los obtenidos para *Populus deltoides* por Henderson y Jose (2012); posiblemente, la falta de coincidencia se deba a la diferente edad del árbol y muy superior densidad de plantación considerada en este estudio.

Para el clon AF2, en Soria, la relaciones medias de la biomasa foliar frente a biomasa leñosa (tallos +ramas) para cada año, a través del método de trampas, varía entre 0,42 y 0,59 (Tabla 4.11), siendo los valores más bajos a mayor edad del árbol. Estos resultados fueron coherentes con los obtenidos por Fillion et al. (2009) y Singh y Lodhiyal (2009) para otras especies del género *Populus*. Sin embargo, la cantidad de hojas mostró el efecto contrario, tendió a aumentar con el crecimiento de la biomasa aérea leñosa (Tabla 4.11), debido a la acumulación de la misma cuando no se realizan cortas cada año.

Comparando, en ambos ensayos el clon I-214, la relación entre la producción de hojas y la de biomasa aérea leñosa (tallos+ ramas) se aprecia que es mayor cuanto

menor es la producción de biomasa leñosa (Tabla 4.11). Esta diferencia se atribuiría a la mayor competencia entre los árboles y, por tanto, menor o mayor tamaño de estos.

En la recolección de las hojas caídas sobre el suelo, el ratio hojarasca foliar/biomasa leñosa (0,37) disminuye drásticamente y se asocia con la heterogénea distribución de las hojas al caer y la deriva por el viento.

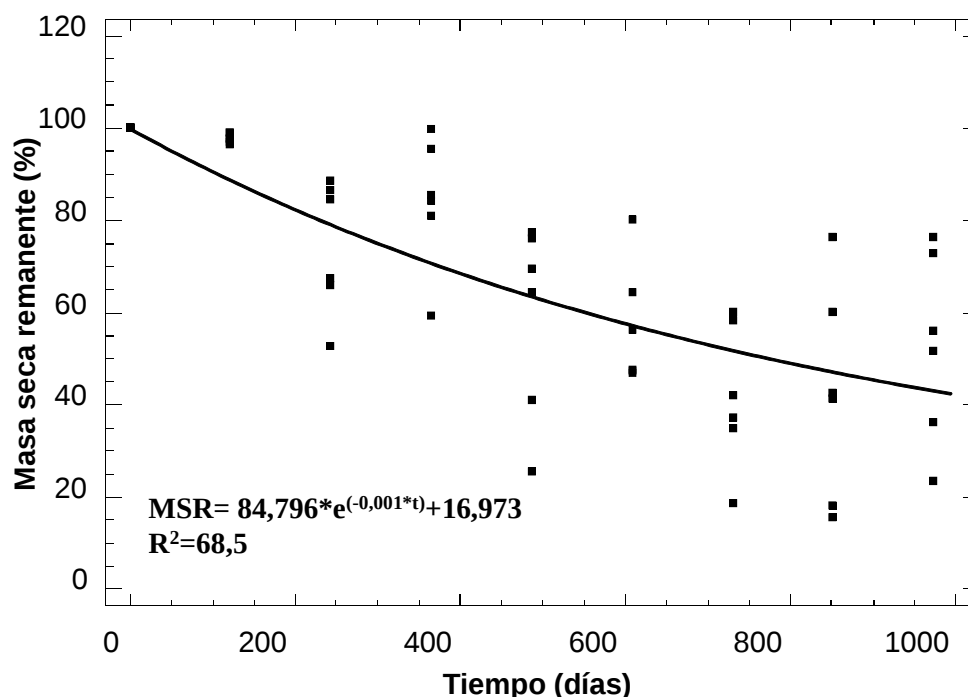
Los ratios obtenidos mediante defoliación del árbol antes de la caída de las hojas (0,74 y 0,71 para Soria y 0,93 y 1,00 para Madrid del clon AF2 e I-214, respectivamente), en general, son mayores (Tabla 4.11) y no se han encontrado diferencias significativas entre clones y, para el clon AF2, tampoco existe diferencias entre localidades. En este caso, hay que considerar que, posiblemente, la reabsorción no ha finalizado.

## 5.2 Descomposición de hojarasca foliar

### 5.2.1.1 Ensayo 1

La pérdida de masa foliar en las bolsas se mantuvo prácticamente constante durante los primeros cuatro meses de estudio (Figura 5.5), coincidiendo con la temporada invernal, este efecto puede ser debido a un limitado crecimiento microbiano (Abelho 2008). La descomposición comenzó en la primavera, con una pérdida de masa del 26% (Tabla 4.13 y 4.14). Las condiciones meteorológicas tienen un efecto directo sobre la descomposición de la hojarasca a través de la regulación de la actividad de los microorganismos, y tienen un efecto indirecto sobre la química de la hojarasca como resultado de la influencia que el clima ejerce sobre la formación del suelo y el ciclo de nutrientes (Lavelle et al. 1993). Después de 2 años de exposición en el campo, se observó una fase de descomposición muy lenta, casi estacionaria, alcanzándose unas pérdidas medias de materia seca del 58% a finales del 2008. A lo largo del estudio, las pérdidas de masa difieren mucho entre las bolsas de hojarasca, atribuido, principalmente, a su ubicación dentro de la plantación, donde la variación de la espesura de la biomasa puede modificar las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestas (radiación solar, precipitación, etc...).

La tendencia de la materia seca que permanece con el tiempo se ajusta a un modelo exponencial con un  $R^2$  de 68,5% (Figura 5.5).



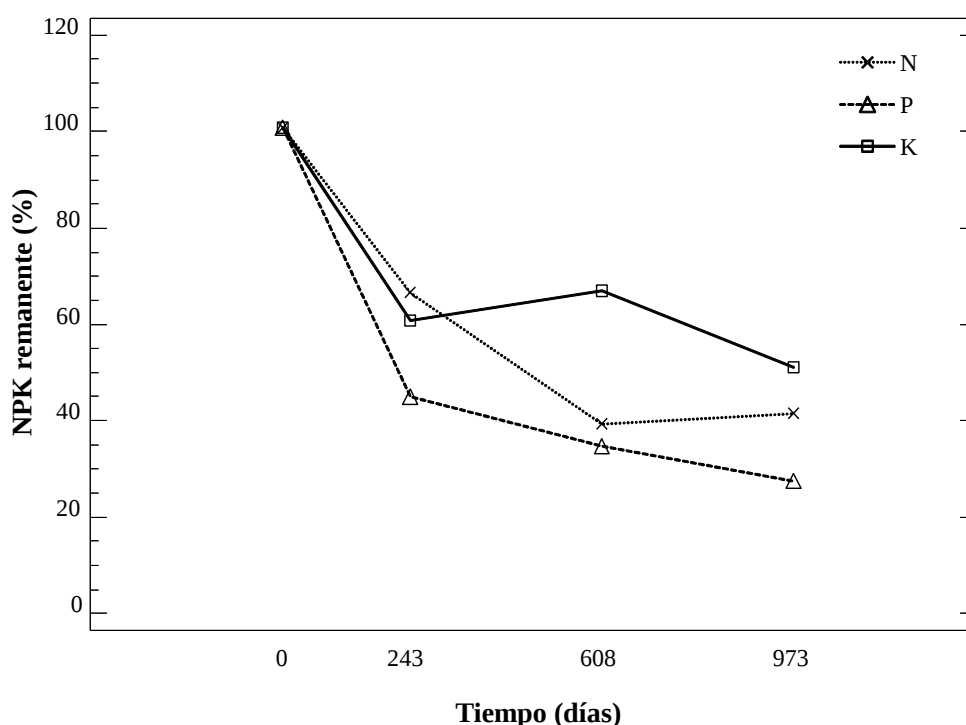
**Figura 5.5:** Evolución temporal de la materia seca remanente (MSR) en las bolsas de hojarasca (expresada como un porcentaje de la materia seca inicial) t: tiempo en días

La constante de descomposición anual obtenida fue de  $0,68 \text{ año}^{-1}$ . Harmon et al. (1990) para *Populus trichocarpa*, obtuvo valores de esta constante entre 0,61 y  $0,68 \text{ año}^{-1}$ . En zonas mediterráneas, se registraron constantes que oscilaban entre 0,65 y  $0,78 \text{ año}^{-1}$  para *Populus nigra* L, (Aranda et al. 1990). A su vez, las constantes de descomposición observadas para *Populus x hybrida* en una zona de ribera del centro de España (Pérez-Corona et al. 2006), y para *P. x euroamericana*, con el mismo clon, en el centro de Italia (Cotrufo et al. 2005) fueron más altas ( $2,01$ - $2,93 \text{ año}^{-1}$  respectivamente), indicándose que, probablemente, se alcancen estos valores debido al incremento de la temperatura del suelo y la humedad en primavera provocando un incremento de la actividad microbiana que favorece la descomposición.

La evolución del C orgánico se asocia principalmente con una disminución progresiva de la materia seca. Durante un período de 20 meses, la liberación de C de la hojarasca en las bolsas fue del 66%, muy cerca de las pérdidas de C encontradas para plantaciones de chopo Híbrido 275 y Robusta en el norte de Polonia (Jonczak et al. 2010). Al final del estudio, la liberación media de C alcanzó  $0,28 \text{ g C g}^{-1}\text{MS}$  y la pérdida absoluta de C fue del 32% (Tabla 4.13). Este valor es ligeramente inferior al encontrado en la literatura para otras especies (Santa Regina et al. 1986). Después de 32

meses, sólo alrededor del 36% del C inicial permaneció en los restos de la hojarasca foliar (Tabla 4.14).

Durante los primeros 20 meses (Figura 5.6 y Tabla 4.14), se han observado pérdidas significativas de N en la hojarasca foliar de las bolsas (57% del N inicial se liberó). Al final del estudio, la liberación media de N fue de  $12,7 \times 10^{-3} \text{ g N g}^{-1} \text{ MS}$ , mientras que la pérdida absoluta de N fue del 18% (Tabla 4.13). Otros autores indican ganancias de N en la hojarasca foliar (Jonczak et al. 2010). Por lo tanto, este desacuerdo podría indicar que el N no es limitante, en el presente estudio, para el desarrollo de los microorganismos que son responsables de la descomposición de hojarasca, quizás, por el efecto de la fertilización nitrogenada que se hace inicialmente en este tipo de cultivos.



**Figura 5.6:** Evolución temporal del NPK remanente en las bolsas de hojarasca (expresada como porcentaje)

El valor inicial de la relación C/N en la hojarasca foliar fue alrededor del 20 (Tabla 4.13). En otros estudios, se observaron relaciones C/N mayores para varias especies de chopo (Cotrufo et al. 2005; Moore et al. 2005). Ocho meses después del inicio del experimento, la relación C/N presentó un rápido descenso (16) respecto al valor inicial. Según Swarnalatha y Reddy (2011) las relaciones C/N menores de 20 o con altas concentraciones de N ( $> 2,5\%$ ) indican la mineralización del N, lo cual conduce a una

descomposición más rápida de la hojarasca foliar en el sistema suelo-hojarasca. Posteriormente, la relación C/N se mantuvo constante durante el resto del tiempo.

Con una baja relación inicial C/P (235/1), la mayor parte del P de la hojarasca foliar se liberó durante los primeros 8 meses del estudio (Tabla 4.13). Después de 32 meses, se encontró que la liberación fue  $1,3 \times 10^{-3} \text{ g P g}^{-1} \text{ MS}$ . Del mismo modo que a Jonczak et al. (2010), la hojarasca foliar de chopo liberó aproximadamente el 70% de su contenido de P inicial (Tabla 4.14). La pérdida de P absoluta fue del 42%. La hojarasca caída es conocida por ser la principal entrada de P (Meiresonne et al. 2007).

El contenido total de K en la hojarasca foliar fue sólo  $4,7 \times 10^{-3} \text{ g K g}^{-1} \text{ MS}$  (Tabla 4.13). La liberación media de K de la hojarasca foliar fue de  $2,2 \times 10^{-3} \text{ g K g}^{-1} \text{ MS}$  y, la más significativa (alrededor del 40%), se produjo durante los primeros 8 meses (Tabla 4.14), proceso que se frena durante los 2 años siguientes. Este es un fenómeno comúnmente observado en muchos estudios de descomposición de la hojarasca (Kim et al. 2003; Jonczak et al. 2010). En general, el contenido de K absoluto se mantuvo prácticamente constante (con pérdidas absolutas del 2%) durante el período, de 32 meses, en el que las hojas permanecieron en el campo.

Respecto a la liberación de otros bioelementos, después de 243 días de exposición en el campo, se encontraron datos significativos mayores para todos los bioelementos, excepto para el Mn. La liberación media de Ca, N y S de la hojarasca foliar fue cercana al 30%, para el K fue del 37% y para el C, P y Mg fue aproximadamente del 50% (Tabla 4.14). La liberación de nutrientes siguió este orden  $\text{Mn} < \text{N} < \text{S} < \text{Ca} < \text{K} < \text{C} < \text{Mg} < \text{P}$  (Tabla 5.8). Las pérdidas de nutrientes de la hojarasca aumentaron en la mayoría de ellos durante los siguientes meses, encontrando aproximadamente un 60% de liberación media de C, P y Mg, y alrededor de un 50% de Ca, S y N, permaneciendo prácticamente constante esta liberación después de 608 días de exposición en el campo para todos los nutrientes evaluados. La liberación, a los 608 días, fue estadísticamente significativa para C, N, Ca, Mg y S, y no para P, respecto al muestreo anterior (243 días). La liberación media, después de 608 días, de la hojarasca foliar expuesta en el campo en las bolsas fue de 47, 62, 64, 69 de K, Mg, C, P, respectivamente y entorno al 55% de Ca, S, N. Estos valores, después de 608 días de exposición en el campo, están muy por debajo de los reportados para plantaciones de chopo Híbrido 275 y muy cercanos a los reportados para plantaciones de chopo Robusta en el norte de Polonia (Jonczak et al. 2010).

**Tabla 5.8:** Resumen del orden de liberación de los nutrientes de la hojarasca foliar a lo largo del tiempo en el ensayo 1

| Tiempo<br>(días) | Orden de liberación de nutrientes |
|------------------|-----------------------------------|
| 243              | Mn <N <S <Ca <K <C <Mg <P         |
| 608              | Mn <K <Ca <S <N <P <Mg <C         |
| 973              | Mn <K <Ca < S <N <Mg <C <P        |

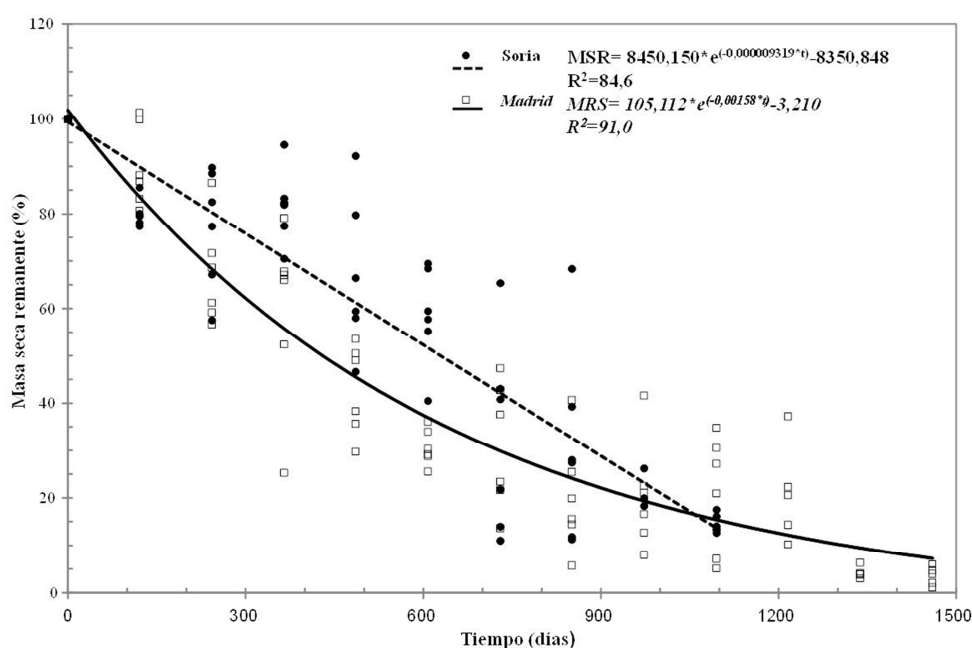
Respecto a la dinámica de Mn en la descomposición de la hojarasca hay poco datos disponibles. El Mn tiene importancia como factor de regulación de la descomposición, en especial en las etapas finales de esta (Pérez y Jeffries 1992). En términos absolutos, se observa que hubo una ganancia de Mn, la cual fue del 79% (Tabla 4.14). En términos relativos, la liberación de Mn de la hojarasca foliar no presenta una diferencia estadísticamente significativa entre muestreos para un nivel de confianza del 95%. Después de 32 meses, un 9% del Mn fue liberado, mientras que un 91% de media permaneció en la hojarasca foliar de las bolsitas (Tabla 4.14), lo que significa que este elemento se libera de forma notablemente más lenta en comparación con el resto de los nutrientes estudiados, observaciones que son coherentes con las encontradas en la literatura para otra especie (Guo y Sims 2001). Por otro lado, este estudio guarda relación, con los resultados aportados por Berg (2000) quien señala que a mayores concentraciones de Mn mayor descomposición de la hojarasca en las últimas etapas.

#### 5.2.1.2 Ensayo 2

La evolución en el tiempo de la materia seca remanente y el contenido absoluto de cada bioelemento, en cada localización, siguen distinta tendencia (Tabla 4.15, 4.16 y 4.17).

En Soria, en los primeros ocho meses del primer año de estudio, se observó una pérdida rápida de peso (Tabla 4.15), siendo ésta, en torno al 22%. Esta situación podría deberse a que la descomposición de la hojarasca está influenciada por la temperatura (Taylor y Parkinson 1988), cuando la temperatura aumenta, la descomposición de la hojarasca aumenta (Salah y Scholes 2011). Además, el aumento de temperatura incrementa la población de microorganismos (Witkamp 1966). Desde los 121 días hasta

los 365 días la descomposición fue lenta y no hubo diferencias significativas (Figura 5.7). A continuación, la descomposición se reactiva y se alcanzan unas pérdidas de entorno al 40% a los 608 días. La descomposición continuó incrementando de forma significativa respecto a los muestreos anteriores y a los 973 días quedó tan solo un 21,6% de materia seca (Tabla 4.18). A partir de este momento hasta el final del estudio (1095 días) se observó una fase de descomposición lenta, casi una fase estacionaria (Figura 5.7). En el último trimestre estudiado se registró el máximo de pérdidas de biomasa foliar (85,6%). La pérdida de materia al igual que la velocidad de descomposición están influenciados por la precipitación y temperatura, al aumentar alguno de estos factores, la descomposición de la hojarasca es más rápida (Austin y Vitousek 2000), esto explicaría las variaciones que se producen en cuanto a la materia seca a lo largo del periodo aquí estudiado.



**Figura 5.7:** Evolución temporal de la materia seca remanente (MSR) en las bolsas de hojarasca en Soria y en Madrid (expresada como un porcentaje de la materia seca inicial) t: tiempo en días

La tendencia de la materia seca que permanece con el tiempo, en ambas localizaciones, se ajusta a un modelo exponencial con un R<sup>2</sup> del 85 y 91% para Soria y Madrid, respectivamente (Figura 5.7).

Mientras que en Madrid, en el primer trimestre del estudio se observa una pérdida de materia menor (10,0%) que en Soria (20%) (Figura 5.7), que indicaría una fase de

descomposición más lenta, atribuible a que la precipitación y la humedad fueron menores en Madrid. El proceso de descomposición de la hojarasca está principalmente controlado por factores abióticos y bióticos (Coûteaux et al. 1995; Zhi-Gao y Jing-Shuang 2007). A los 243 días (Tabla 4.19 y 4.20), se alcanzó una mayor descomposición en Madrid (32,7%), hecho que en Soria no se alcanzó hasta los 486 días (32,1%). En este periodo, la temperatura media (Tabla 3.1) en Madrid supero en algo más de 5°C a la de Soria (21,5 y 16,2°C en Madrid y Soria, respectivamente), siendo varios autores los que indican el efecto positivo que tiene esto sobre la descomposición de la hojarasca (Hobbie 1996; Scowcroft et al. 2000; Salah y Scholes, 2011). En los siguientes 12 meses (hasta los 608 días), la hojarasca foliar continuo descomponiéndose quedando un 30,7% de materia seca en las bolsitas (Tabla 4.20). A partir de este momento las pérdidas para cada periodo monitorizado respecto al anterior son menores, lo que se atribuye a factores ambientales como, por ejemplo, a la menor humedad relativa. Panda et al (2010) informo que las pérdidas de hojarasca foliar se correlacionan significativamente con la humedad relativa. También, Nagy and Macauley (1982) indicaron el efecto que la humedad relativa tendrá sobre las tasas de descomposición al influir sobre la cantidad de agua que hay en el sustrato y, por tanto, en la que está disponible para los microorganismos, influyendo así en la actividad de los descomponedores. Desde los 608 días hasta los 1216, no hubo diferencias significativas, ya que se llegó a una fase más estable (Figura 5.7), en donde la velocidad de descomposición es lenta. En los últimos ocho meses del estudio, se observó de nuevo una rápida pérdida de peso, alcanzándose al final una pérdida del 96,4% (Tabla 4.18). En este periodo, la precipitación caída fue de 301,2 mm (Tabla 3.1), y de acuerdo a estudios previos, la descomposición de la hojarasca podría verse afectada, entre otros factores abióticos, por la precipitación (Austin y Vitousek 2000). También, Swift et al. (1979) indica que mayores precipitaciones aceleran la descomposición de la hojarasca superficial. Además, se puede observar como a los 730 días las pérdidas de materia, en ambas localizaciones, parecen alcanzar una fase de equilibrio aunque en el último trimestre del año 2010 (1095 días), la pérdida de biomasa en Soria fue 6,5 puntos más que la producida en Madrid (Figura 5.7).

La constante de descomposición anual (K) estimada usando la ecuación 1 (apartado 3.9) y, a lo largo de 3 años de exposición en el campo, fue de  $0,63 \text{ año}^{-1}$  y  $1,08 \text{ año}^{-1}$  para Soria y Madrid, respectivamente. Cuando se considera un año más (4 años), en

Madrid, esta constante fue de  $1,02 \text{ año}^{-1}$ . Según Fioretto et al. (2005) en ecosistemas mediterráneos la constante de descomposición anual oscila entre  $0,30$  y  $0,75 \text{ año}^{-1}$ , valores acordes con los encontrados por Berg y McClaugherty (2008) para *Populus tremula* L. ( $0,66 \text{ año}^{-1}$ ) en Suecia y también, Aranda et al. (1990) con *Populus nigra* L., en zonas mediterráneas ( $0,65$  a  $0,78 \text{ año}^{-1}$ ), valores que están en línea con el obtenido en el estudio de Soria.

Las diferencias en las constantes pueden ser atribuidas a numerosas y diferentes variables, tales como clones, composición de hojarasca y factores ambientales que limitan la descomposición. En este sentido, la zona mediterránea se considera una zona geográficamente crítica para la descomposición de la materia, pues según Coûteaux et al. (1995) el factor limitante principal de la descomposición, no es la temperatura, como ocurre en las zonas templadas, sino la baja humedad relativa, principalmente en verano. Las diferencias encontradas en las constantes de descomposición, a lo largo del periodo de exposición en el campo, en ambas localizaciones, pueden ser atribuidas a las condiciones particulares de cada sitio como el microclima, las propiedades edáficas y fundamentalmente a la actividad de la biota del suelo (Swift et al. 1979; Attiwill y Adams 1993; Aerts y Chapin 2000).

En la mayoría de los estudios experimentales sobre la degradación de la hojarasca, la composición química de la misma (por ejemplo, concentración de nutrientes o la relación C/N) es frecuentemente considerada para indicar su calidad (Strickland et al. 2009), y es a menudo decisiva en la descomposición de la hojarasca en un determinado ambiente (Chapin et al. 2011). Teniendo en cuenta estas premisas parece necesario analizar la dinámica de los nutrientes.

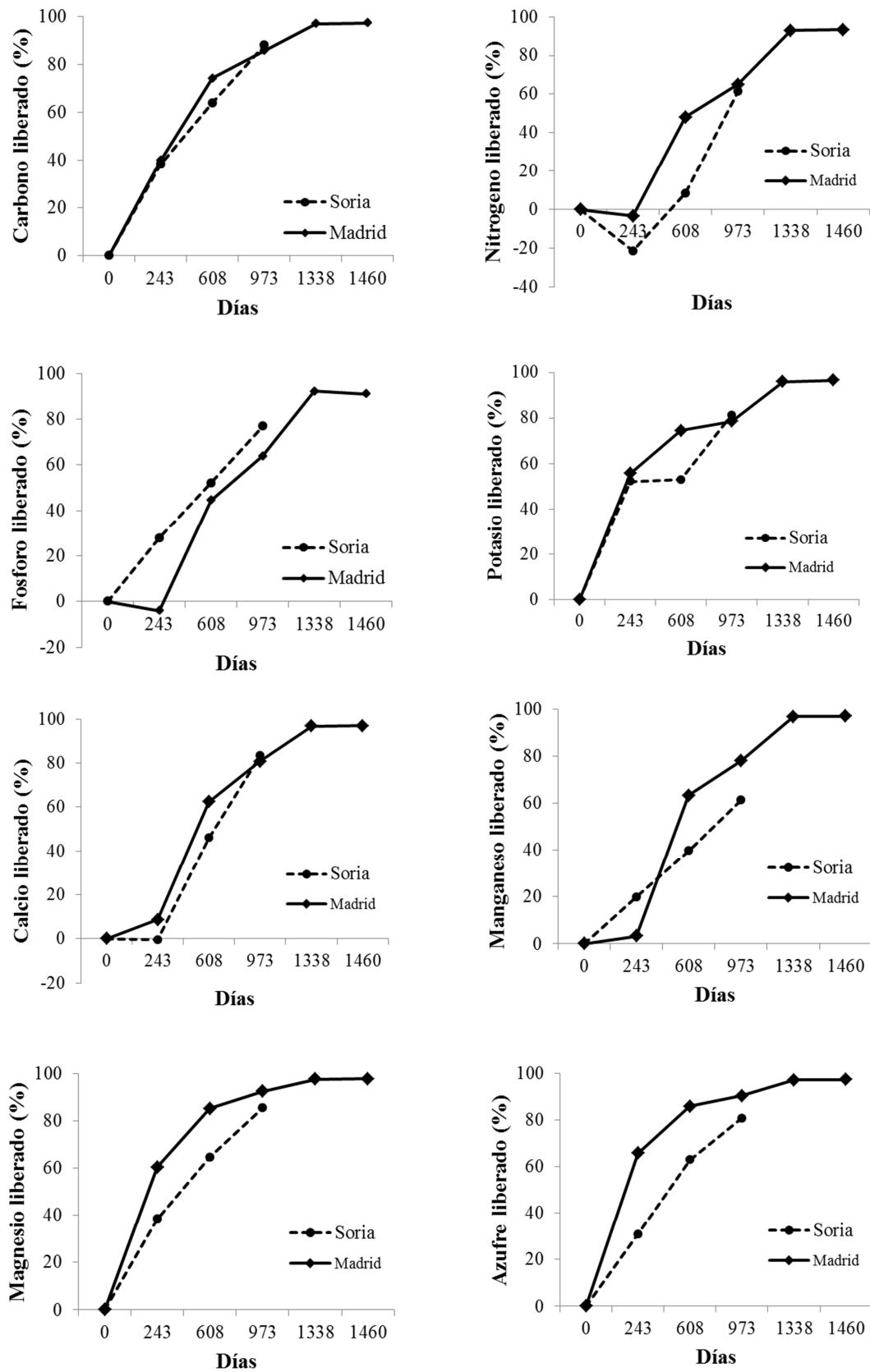
### **Carbono (C)**

El C de la hojarasca comúnmente funciona como la principal fuente de energía para los descomponedores (Ågren y Bosatta 1996; Manzoni et al. 2008, 2010). La cantidad de C de la hojarasca disminuye continuamente, en ambas localizaciones, durante todo el período de descomposición (Tabla 4.15 y 4.16), lo cual es similar a algunas investigaciones en otros ecosistemas (Kochsiek 2010; Zhang y Wang 2012). En Soria, el C disminuye de manera significativa a lo largo de todo el periodo estudiado (Tabla

4.15), mientras que en Madrid el C ha disminuido de forma significativa solo en los dos primeros muestreos (Tabla 4.17).

Coincidiendo con otros estudios (Allred y Giesy 1988; Davis et al. 2003; Rubino et al. 2009) se aprecia que, en ambas localizaciones, la pérdida de C de la hojarasca es proporcional a la pérdida de masa total (Tablas 4.15 y 4.16). Por otro lado, en términos absolutos, hay una mayor pérdida de C en el ensayo de Soria (Tabla 4.15) que en el de Madrid, llegando en esta última localidad, a los 973 y 1460 días, a una pérdida absoluta similar, 23 y 24%, respectivamente (Tabla 4.16 y 4.17).

Comparando las pérdidas de C, entre ambas localidades, se han observado diferencias significativas tan solo a los 608 días de exposición de la hojarasca en el campo (Tabla 4.18 y Figura 5.8). Este descenso de C que se produce en la hojarasca puede deberse a la descomposición microbiana (Anderson 1973) o al efecto de la temperatura en el proceso de descomposición de la misma (Fierer et al. 2005).



**Figura 5.8:** Bioelementos liberados (%) a través de la descomposición de la hojarasca a lo largo del tiempo en Soria y Madrid

## Nitrógeno (N)

En términos absolutos, hay una ganancia de N en ambas localizaciones (Tabla 4.15, 4.16 y 4.17), incluso en Madrid no hay diferencia en que la hojarasca estuviese expuesta en el campo 973 días o 1460, siendo 76% la ganancia media de N en ambas zonas. Esta ganancia de N en la hojarasca durante la descomposición es frecuente (Berg 1988; Van Vuuren y Van der Eerden 1992) y podría ser debido a la inmovilización microbiana (Tan et al. 2013) y a adiciones por deposición del N atmosférico durante la descomposición.

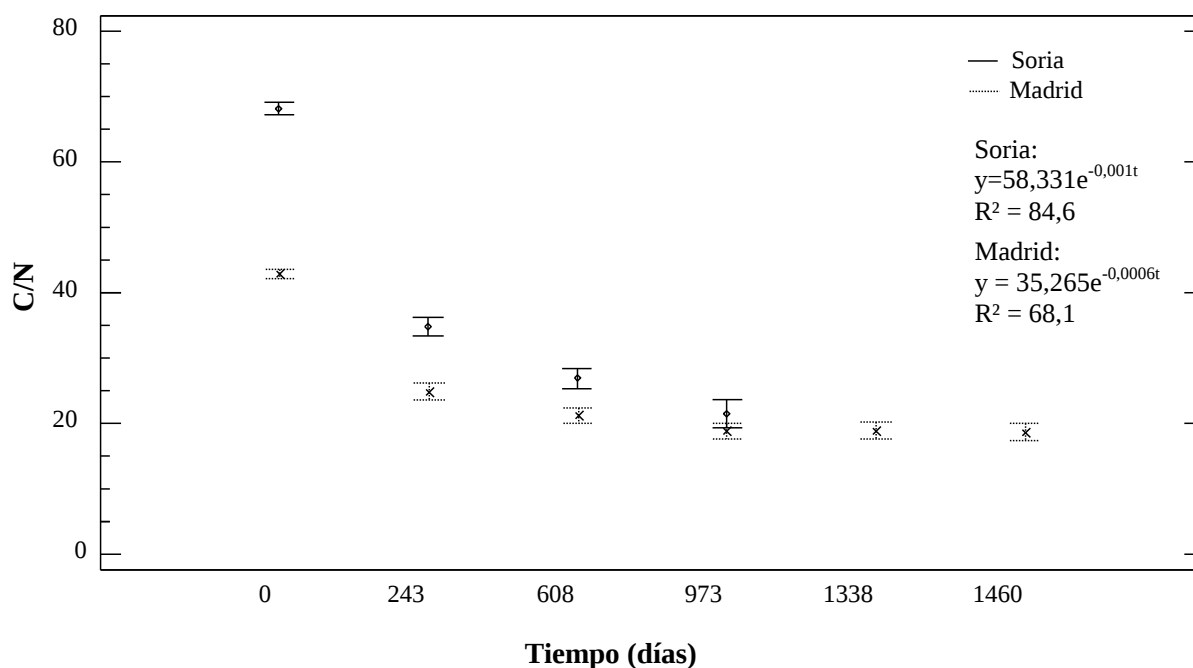
La concentración de N, en Soria, en la hojarasca foliar incrementó hasta los 243 días (Tabla 4.19), mientras que en Madrid se mantuvo constante (Tabla 4.20). Los resultados indican que frecuentemente el N aumenta durante el proceso de descomposición (Fioretto et al. 2003). A partir de ahí (243 días), en ambas localizaciones, se observa que la liberación de N aumenta, disminuyendo la concentración de N en la hojarasca (Fioretto et al. 2001), llegando a quedar, a los 973 días, un 38,6 y 35,1% de N en la hojarasca de Soria y Madrid, respectivamente.

A pesar de tener inicialmente diferentes velocidades de liberación de N (Figura 5.8), prácticamente a los 1000 días se obtienen valores similares 61,4% y 64,9% para Soria y Madrid, respectivamente (Tabla 4.18). En Madrid, al final del estudio, se alcanzaron pérdidas superiores y cercanas a 90%. Además, la concentración de N en la hojarasca también se correlaciona con las tasas de descomposición de las hojas (Moro y Domingo 2000; García-Pausas et al. 2004).

La temperatura es un factor clave para determinar la actividad de los organismos en los ecosistemas (Friberg et al. 2009), y con mayores temperaturas se estimulan las actividad biológicas al menos dentro de los límites fisiológicos (Bergfur y Friberg 2012). Los cambios de temperatura que se han producido, en ambas localizaciones a lo largo del periodo estudiado, favorecen el proceso de descomposición y mineralización del N (Hobbie 1996). Sin embargo, esta tendencia no es común para todas las especies, en *Pinus patula* se ha observado que a mayor temperatura mayor acumulación de N en la hojarasca (Salah y Scholes 2011).

## Relación C/N

Las relaciones de nutrientes pueden desempeñar un papel importante en la dinámica de la descomposición de la hojarasca (Aerts 1997). En particular, la relación C/N (Figura 5.9) se conoce como un predictor de la tasa de descomposición de la hojarasca, especialmente en ecosistemas terrestres (Vivanco y Austin 2006).



**Figura 5.9:** Evolución temporal de la relación C/N en hojarasca foliar de las bolsitas en Soria y Madrid ( $y$ = relación C/N,  $t$ = tiempo en días)

La variación temporal de la relación C/N de la hojarasca foliar siguió un modelo de descomposición exponencial (Figura 5.9), y se atribuyó a la retención de N y a la pérdida de C en la hojarasca. Las relaciones C/N, al inicio del experimento, fueron de 68 y 43 para Soria y Madrid, respectivamente (Tabla 4.15 y 4.17). Esta relación disminuyó más rápidamente en Madrid que en Soria, ya que en Madrid se alcanzó un valor de 20 en diciembre de 2008 mientras que en Soria fue de 22 un año después (diciembre de 2009). Estudios previos han mostrado que el N, por lo general, fue liberado cuando los ratios C/N de la hojarasca se redujeron a un valor crítico (Hobbie et al. 2008; Manzoni et al. 2010; Berglund y Ågren 2012). En este valor crítico, se espera que el N en la hojarasca comience a satisfacer las necesidades de las principales comunidades de descomponedores las cuales consumen el C asociado (Moore et al. 2006; Parton et al. 2007). Los ratios críticos de C/N para la liberación de N, generalmente, oscilan de 23 a 80 para hojarasca foliar de origen forestal de diversas

especies, tales como pinos, robles, abetos (Edmonds 1980; McClaugherty et al. 1985; Hart et al. 1992; Hart 1999), valores inferiores a 23 se obtuvieron en el presente estudio, aumentando la liberación de N (Tabla 4.18) en la medida que la relación C/N disminuye.

### **Fósforo (P)**

En ambas localizaciones, en términos absolutos, hay una ganancia de P, siendo mucho menor está en Soria (Tabla 4.15) que en Madrid (Tabla 4.16 y 4.17). En Madrid, la ganancia absoluta incrementó con el paso del tiempo, ya que fue del 69% a los 973 días y del 131% a los 1460 días (Tabla 4.16 y 4.17).

La hojarasca foliar, en Madrid, inicialmente mostró cierta acumulación de P y luego mostró liberación (Tabla 4.18), estos resultados son muy similares a los obtenidos por Moore et al. (2010). En Soria, durante todo el periodo estudiado, se liberó P (Tabla 4.18). Comparando ambas localizaciones, se han observado diferencias estadísticamente significativas a los 243 días de exposición de la hojarasca foliar en el campo.

Según Bockheim et al. (1991), en la hojarasca en descomposición, el P puede aumentar o disminuir, siendo el aumento atribuido a la inmovilización microbiana. Las concentraciones iniciales de P de la hojarasca foliar (Tabla 4.15 y 4.16), en ambas localizaciones, eran todas por encima de 0,022%, valor que sugiere Güsewell y Verhoeven (2006) como límite inferior para las concentraciones de P en la hojarasca de gramíneas y, por debajo del cual, todo P está fijado en material estructural, por tanto, la descomposición del P es limitada. Inicialmente, la concentración de P es menor en Madrid que en Soria, por lo que la liberación de P fue mayor en Soria a lo largo del todo el periodo estudiado, resultados coherentes con estudios previos (Moore et al. 2010).

### **Potasio (K)**

El K es el elemento más fácilmente liberado en comparación con otros nutrientes porque está presente en la hojarasca como un nutriente soluble en agua (Kim et al. 2003). Además, al ser un elemento no estructural, el K es muy móvil (Stohlgren 1988; Toky y Singh 1993; Abugre et al. 2011). Al igual que le ocurrió a Kunhamu et al. (2009) en su estudio, se puede apreciar, en ambas localizaciones, inicialmente un rápido

descenso en las concentraciones absolutas de K en la hojarasca (Tabla 4.15 y 4.17) debido a la gran movilidad del K atribuible a su no unión estructural. Entre ambas localizaciones, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en cada muestreo respecto a la liberación de K (Tabla 4.18). En Madrid, se aprecia que la tendencia mostrada por el K está de acuerdo con otros estudios (Osono y Takeda 2004; Chhetri et al. 2012) donde al principio se observa una gran reducción de la concentración de K en la hojarasca y después le sigue una última fase con fluctuaciones en la concentración (Tabla 4.17). En general, las mayores pérdidas absolutas encontradas para el K (Tabla 4.15 y 4.16) han sido a los 973 días (15 y 11% para Soria y Madrid, respectivamente).

### **Otros bioelementos (Ca, Mg, Mn y S)**

El Ca, el Mg y el Mn se asocian con las estructuras celulares y se pierden normalmente a través de la descomposición de la hojarasca (Rustad y Cronan 1988), siendo esta una fuente importante de estos nutrientes disponible para los árboles (Chapin 1991; Likens y Bormann 1995).

En Soria, el Ca disminuyó durante la descomposición de hojarasca foliar (Tabla 4.15), de una forma similar al que reportó You et al. (2000). En Madrid, se produjo un aumento significativo de Ca, en términos absolutos, a los 243 días y luego comenzó a disminuir hasta los 973 días (Tabla 4.17), momento a partir del cual se estabilizó. Similar tendencia fue observada por Lousier y Parkinson (1978). En la primera fase de descomposición, aunque no significativa respecto al inicio del estudio, hubo una ligera ganancia de Ca de 4,0% (Tabla 4.18).

Según Kim et al. (2003), la concentración de Mg, en general, en los tres tipos de hojarascas que consideró, tendió a incrementar durante el período estudiado y este aumento puede ser debido a la rápida pérdida de materia seca a lo largo de los procesos de descomposición. Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente trabajo mostraron un efecto contrario ya que el contenido absoluto de Mg, para ambas localizaciones, disminuyó a lo largo de 973 días (Tabla 4.15 y 4.16). Al igual que para otros autores (Waring y Schlesinger 1985; Van Wesemael 1993; Stevenson y Cole 1999; Martins et al. 2009), en este estudio, para ambas localizaciones, se produjo una

liberación más rápida de otros bioelementos (por ejemplo, K y Mg) que del Ca (Tabla 4.18) y se liberó a mayor velocidad en Madrid que en Soria.

Hay pocos estudios y/o análisis sobre la dinámica del Mn en la descomposición de la hojarasca. El contenido absoluto de Mn, en Soria, se mantuvo constante hasta los 608 días (Tabla 4.15), mientras que en Madrid permaneció sin variar a lo largo de todo el periodo estudiado (Tabla 4.17). Únicamente, a los 243 días, la liberación de Mn en Soria fue 16,5 puntos mayor que en Madrid (Tabla 4.18).

En cuanto al contenido absoluto de S, hubo cambios significativos, a los 608 días en Soria (Tabla 4.15) y, en Madrid a los 243 y 1338 días (Tabla 4.17). El S se añade a los suelos de zonas arbóreas en formas inorgánicas (por ejemplo a través de la lluvia, gases absorbidos, etc.) y en formas orgánicas (a través de la hojarasca). Según Johnson (1984) el retorno de S a través de la hojarasca constituye la mayor parte de la entrada de S biológico para el suelo boscoso.

Al igual que otros bioelementos (K, Ca y Mg), el S se liberó a mayor velocidad en Madrid que en Soria (Tabla 4.18). En términos absolutos, a los 973 días, se produjo una liberación de Ca, Mg y S que fue de 23%, 33%, 11% y 1%, 64%, 53% en Soria y Madrid, respectivamente (Tabla 4.15 y 4.16). Después de casi mil días, se apreció una ganancia de Mn (Tabla 4.15 y 4.16) que fue mayor en Soria (77%) que en Madrid (7%).

La liberación de nutrientes en la hojarasca foliar sigue un patrón (Tabla 5.9). El orden de liberación varía con el tiempo, tanto en Soria como en Madrid. En Soria, únicamente el N se mantiene siempre entre los dos últimos puestos y el Mg entre los dos primeros, siendo la liberación media de S, K, Ca, Mg y C, a los 973 días, de aproximadamente el 84%, la del P del 77%, mientras que la del Mn y N fue entorno al 61% (Tabla 4.18). En Madrid, según el orden de liberación, siempre destaca en último lugar el P y el N y, en primero, el S y Mg (Tabla 5.9), siendo la liberación media, a los 973 días, de P y N entorno al 64%, de Mn y K alrededor del 78%, de Ca 81%, de C 86%, de S 90% y de Mg 92% (Tabla 4.18).

**Tabla 5.9:** Resumen del orden de liberación de los nutrientes de la hojarasca foliar a lo largo del tiempo en el ensayo 2

| Tiempo<br>(días) | Localización | Orden de liberación de nutrientes |
|------------------|--------------|-----------------------------------|
| 243              | Soria        | N <Ca <Mn <P <S <C <Mg <K         |
|                  | Madrid       | P <N <Mn <Ca <C <K <Mg <S         |
| 608              | Soria        | N <Mn <Ca <P <K <S <C <Mg         |
|                  | Madrid       | P <N <Ca <Mn <C <K <Mg <S         |
| 973              | Soria        | Mn <N <P <S <K <Ca <Mg <C         |
|                  | Madrid       | P <N <Mn <K <Ca <C <S <Mg         |
| 1338             | Madrid       | P <N <K <Mn <Ca <C <S <Mg         |
| 1460             | Madrid       | P <N <K <Mn <Ca <S <C <Mg         |

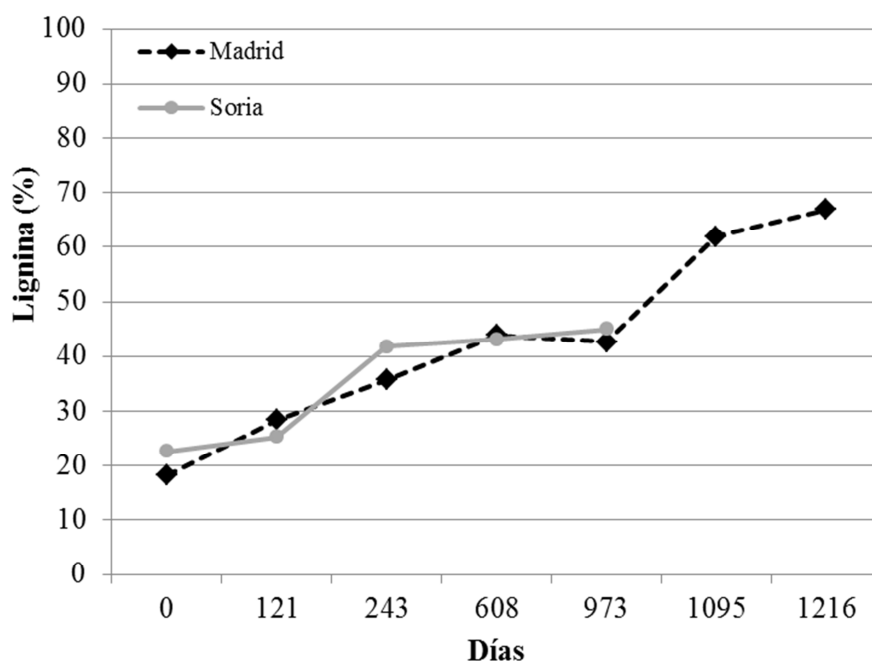
Comparando las dos localizaciones, en la primera etapa de descomposición (243 días), no hubo diferencias significativas en cuanto a la liberación del C, K, Ca y Mn pero si existieron respecto a la liberación N, P, Mg y S (Tabla 4.18). A partir de esta primera etapa, la liberación de nutrientes fue mayor en Madrid que en Soria, excepto para el P (Figura 5.8), aunque sin diferencias significativas, entre ambas localizaciones, en la liberación del K, Ca y P.

Respecto a C, N, Mg, Mn y S las diferencias fueron significativas entre localizaciones a los 608 días (Tabla 4.18). En el último muestreo llevado a cabo en ambas localizaciones (973 días), tan solo, de todos los elementos estudiados, hubo diferencia significativa en la liberación de S (Tabla 4.18). A partir de 973 días, y para la localización de Madrid, la liberación aumento hasta los 1338 días estabilizándose a partir de aquí hasta la finalización del estudio (1460 días) para todos los elementos (Tabla 4.18).

### Lignina

La concentración inicial de lignina en la hojarasca de las bolsas fue de 22,7 y 18,2% en Soria y Madrid, respectivamente. A los 973 días, en Soria fue de 45,0 % y en Madrid de 42,6% (Tabla 4.21). El mayor contenido de lignina dificulta la degradabilidad de la materia orgánica y se traduce en una menor velocidad de descomposición. Los resultados obtenidos de la constante de descomposición anual (K), a los 973 días de exposición en el campo, mostraron que esta fue menor en Soria ( $0,63 \text{ año}^{-1}$ ) que en

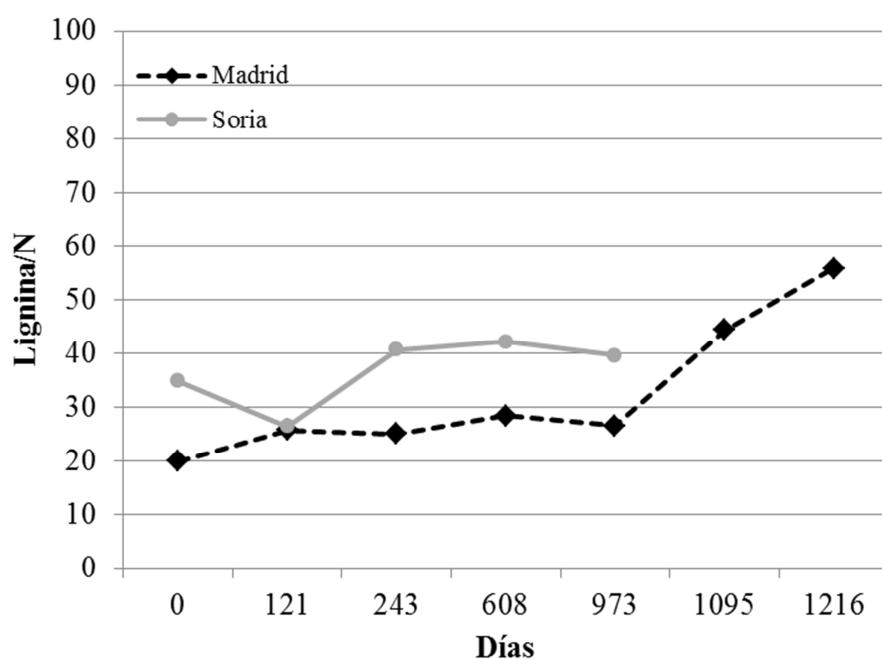
Madrid ( $1,08 \text{ año}^{-1}$ ). Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Meentemeyer 1978; Arunachalam y Singh 2002; Prause y Fernández 2007). Cuando la hojarasca se descompone y la concentración relativa de lignina aumenta, la concentración de N también aumenta (Berg y McClaugherty 2008).



**Figura 5.10:** Evolución temporal del porcentaje de lignina en las bolsas de hojarasca foliar a lo largo de 973 y 1216 días para Soria y Madrid, respectivamente

Estudiar por separado la concentración de lignina no es de mucha utilidad como su concentración en relación al N, para predecir las tasas de descomposición de la hojarasca (Semwal et al. 2003). En general, la hojarasca con menor relación lignina/N se descompone más rápido (Tian et al. 1995; Ball y Drake 1997; Valenzuela-Solano y Crohn 2006), siendo esto coherente con los resultados de este estudio.

En Madrid, en las última etapas de la descomposición (1095 y 1216 días), se produjo un incremento relativo de los niveles de lignina (Figura 5.10) y, a su vez, un aumento de la relación lignina/N (Figura 5.11). El aumento de los niveles de lignina reprime las velocidades de descomposición, lo cual se debe a la interacción de la lignina con la concentración de N y el clima (Berg y McClaugherty 2008), condicionando, de esta forma, que las constantes de descomposición anual a lo largo de 3 y 4 años de exposición en el campo fuesen  $1,08 \text{ año}^{-1}$  y  $1,02 \text{ año}^{-1}$ , respectivamente.



**Figura 5.11:** Evolución temporal de la relación lignina/N en las bolsas de hojarasca foliar a lo largo de 973 y 1216 días para Soria y Madrid, respectivamente

### 5.3 Suelo

#### 5.3.1 Ensayo 1

Los suelos, en Soria, son Cambisoles dístricos y Fluvisoles dístricos (Forteza et al. 1988). Con una textura arenosa y una alta proporción de gravas (37%) que determinan un drenaje excesivo (Tabla 4.22 y Foto 4.1). Ambos parámetros confirman la naturaleza de los materiales que forman los suelos; son depósitos sedimentarios cuaternarios, en forma de aluviones y terrazas, procedentes del río Duero (IGME 1991). Los valores de la densidad aparente, en las capas de 0-20 y 20-40 cm son cercanos a  $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$ , en la tercera capa de suelo (40-60 cm de profundidad) la densidad se incrementa hasta  $1,88 \text{ Mg m}^{-3}$  debido a la disminución de la materia orgánica, la compactación de los horizontes suprayacentes (Doran y Parkin, 1994) y el uso agrícola que, durante épocas pasadas, han soportado estos suelos.



**Foto 4.1:** Aspecto del suelo en el ensayo 1

Los valores de pH son cercanos a la neutralidad (Tabla 4.23), óptimos para *Populus* spp (Ciria 2009) y tienden a disminuir con la profundidad.

Al inicio de la plantación se observó que existen diferencias estadísticamente significativas entre las distintas profundidades para todas las características estudiadas salvo para la relación C/N, difiriendo esta tan solo a la profundidad de 40-60 cm. El  $N_t$  y el C orgánico, a nivel de cada profundidad estudiada, mostraron un patrón similar, lo cual es coherente con otros estudios (Franzluebbers y Stuedemann 2009; Yao et al. 2010). Las concentraciones de estos elementos disminuyen con la profundidad de 320 a 180  $\text{mg kg}^{-1}$  y de 15 a 7  $\text{Mg ha}^{-1}$ , respectivamente (Tabla 4.23). La textura arenosa, las condiciones climáticas y el uso agrícola en décadas pasadas determinan que los contenidos de C orgánico sean muy bajos. Otro factor que ha influido muy significativamente en el estado actual del suelo es el impacto que la nivelación reciente, previo a la plantación, ha generado. El  $P_d$  es más alto en la capa más profunda (36  $\text{mg kg}^{-1}$ ) y el  $K_d$  en la intermedia (66  $\text{mg kg}^{-1}$ ).

Al final del estudio se observó que existen diferencias estadísticamente significativas entre las distintas profundidades para todas las características estudiadas salvo para el pH, difiriendo esta tan solo a la profundidad de 0-20 cm.

Después de los aportes de la hojarasca foliar caída a lo largo de 32 meses, en todas las profundidades hubo diferencias significativas para todos los parámetros estudiados.

El  $N_t$ ,  $P_d$ ,  $K_d$  y C orgánico aumentan en las primeras capas y, además, el  $N_t$  y C orgánico lo hacen también en la capa más profunda (40-60 cm). La materia orgánica aumenta, particularmente, con la profundidad, llegando a valores de  $32 \text{ Mg ha}^{-1}$  debido a posibles procesos de lavado. La relación C/N disminuye, lo que ocurre en un proceso de mineralización, estando los valores finales en el rango de 9,4 a 7,7 (Tabla 4.23). Esta disminución está en contraposición con lo que indica Stetter y Makeschin (1997) en plantaciones de corta rotación.

### 5.3.2 Ensayo 2

Las características del suelo antes de la plantación, en la zona de Soria, correspondientes al ensayo 2, coinciden con las descritas para el ensayo 1 (punto 5.3.1).

Los suelos, en Madrid, se clasifican *Calcisol Háptico* (FAO 2008) y se desarrollan sobre gravas, arcillas, arenas y limos del Pleistoceno (IGME 1994). Tienen textura franco arenosa (66% arena, 13% de arcilla) en las primeras capas estudiadas (0-20 cm y 20-40 cm de profundidad), pero cambia a textura franco (49% arena, 20% de arcilla) en la capa de 40-60 cm de profundidad (Tabla 4.24). La densidad aparente es  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  en la primer capa analizada (0-20 cm) y tiene un valor de  $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$  en las dos siguiente niveles (20-40 cm y 40-60 cm de profundidad). Cuando la densidad aparente del suelo aumenta se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad (Haddad 2004), limitando a su vez el crecimiento de las raíces (Wolf y Snyder 2003). Son suelos calcáreos que inmovilizan severamente fósforo debido a la precipitación con  $\text{Ca}^{2+}$  (Carreira y Latjha 1997), lo cual con frecuencia es crítico debido al bajo contenido de P natural que tienen los suelos mediterráneos. Además, tienen una buena capacidad para estabilizar la materia orgánica (Rovira y Vallejo 2003; Rovira et al. 2010), lo cual es beneficioso desde el punto de vista de prevenir pérdidas del mismo (Barthes y Roose 2002).

En el suelo testigo, al inicio, en Madrid, se observó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las distintas profundidades para los diferentes parámetros analizados. Por el contrario, al final del estudio, se observaron diferencias entre las profundidades que van de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, también, para todos los parámetros considerados (Tabla 4.25).

Comparando la situación inicial y final, en el suelo testigo, del periodo estudiado, en Madrid, el  $N_t$  aumenta y la relación C/N disminuye de forma significativa en la profundidad de 20-40 cm, manteniéndose constante el C orgánico. Por otra parte, el  $P_d$  aumento y el  $K_d$  disminuyó en los primeros 20 cm.

En Soria, después de tres años, sin intervención alguna, en el suelo testigo, se observó que no existen diferencias estadísticamente significativas para ninguna de las propiedades químicas del suelo aquí estudiadas, salvo para el pH a la profundidad de 0-20 cm, donde se observa un ligero proceso de acidificación (Tabla 4.25).

A lo largo del estudio se observa en el suelo testigo de Soria, una disminución de los contenidos de C orgánico y un aumento de la concentración del  $N_t$ , presumiblemente por el establecimiento de la flora microbiana (Paul y Clark 1997), cuya actividad evoluciona para generar relaciones C/N bajas y muy bajas (entre 8 y 4). En todas las profundidades la materia orgánica disminuye (Tabla 4.25) lo que se asociaría, según Thompson and Troeh (2002), a una reducción en el volumen de poros y por tanto a un incremento de la densidad (Tabla 4.24). El  $P_d$  y el  $K_d$  disminuyeron en todas las profundidades estudiadas.

Al comparar los parámetros de la capa más superficial de suelo, en Soria y Madrid, al inicio del ensayo con el estado final del mismo (Tabla 4.26), se observó que los valores de pH disminuyen significativamente entre los dos periodos estudiados, no siendo estos resultados coherentes con los reportados por Sartori et al. (2007) para plantaciones de *Populus*. En el contenido de  $N_t$  (Tabla 4.26) se apreció un aumento estadísticamente significativo en Soria, incremento que puede ser debido a la alta cantidad de hojarasca caída, al enraizamiento profundo e intensivo y a la disminución de la filtración del agua con nutrientes (Pellegrino et al. 2011). Sin embargo, el  $N_t$  se mantuvo constante en Madrid.

El  $P_d$  en el suelo, a la profundidad de 0-20, se mantuvo constante en Soria y disminuyó en Madrid (Tabla 4.26). Estas variaciones se asocian con cambios en el C orgánico del suelo (Piccolo et al. 1996), al uso previo de la tierra, al tiempo transcurrido desde la conversión de uso del suelo, a las especies arbóreas plantadas y a las condiciones climáticas (Ross et al. 1999; Ritter 2007; Zhao et al. 2007).

En cuanto al  $K_d$  se observó, una situación contradictoria, un aumento y una disminución significativa en Soria y Madrid, respectivamente (Tabla 4.26). Según

Gupta y Sharma (2009) la ganancia de  $K_d$  pudo ser atribuida a la mejora de las condiciones físicas y químicas del suelo más superficial, debido a que está muy influido por la cubierta vegetal. Es posible que, en Madrid, el descenso del contenido de  $K_d$  se produzca por una mayor absorción de las raíces al tener que soportar una mayor producción de biomasa leñosa aérea (Tabla 4.10).

El C orgánico a nivel superficial, en ambas localizaciones, aumentó significativamente (Tabla 4.26), según varios estudios estos aumentos se podrían deber a la forestación de antiguas tierras agrícolas (Tolbert et al. 2002; Kahle et al. 2007; Laganière et al. 2010).

Respecto a la relación C/N no se observaron diferencias significativas (Tabla 4.26), en ninguna de las localizaciones, no siendo estos resultados coherentes con el estudio realizado por Stetter y Makeschin (1997).

Al final del estudio correspondiente al ensayo 2, un suelo sin intervención alguna (Tabla 4.25) y un suelo sometido a la plantación de chopo con la correspondiente caída y descomposición de hojarasca (Tabla 4.26), presentan aumentos significativos para, prácticamente, todos los parámetros estudiados, lo que no ocurre cuando se compara el suelo sin plantación al inicio y al final del estudio. De esto se puede deducir el efecto positivo sobre el suelo de la plantación de chopos y la descomposición de su hojarasca.

## 5.4 Secuestro de carbono y balance de nutrientes

### 5.4.1 Ensayo 1

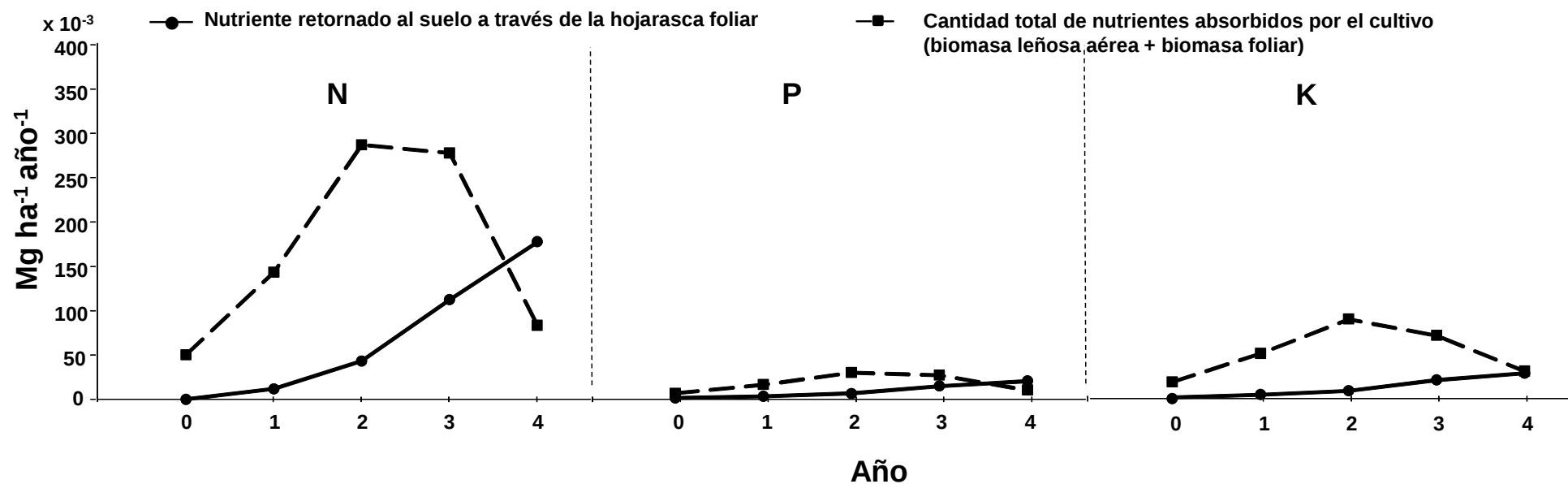
En el área de estudio, la biomasa permanente (tallos + ramas) fue  $25,3 \text{ Mg MS ha}^{-1}$  (Tabla 4.27). Esta biomasa secuestró  $12,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$  durante 4 años. Durante este mismo período, la producción anual de hojarasca foliar, en términos de C, fue de  $3,2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . La producción media anual de C a través de la descomposición de hojarasca fue de  $2,0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , un valor más alto en comparación con los reportados en la literatura para el follaje de *Populus deltoides* a una densidad de 500 árboles  $\text{ha}^{-1}$  (Yadava 2010), o para *Castanea sativa* (Gallardo y González 2004).

Al final del estudio, el C acumulado se distribuye de la siguiente manera: 78,1% en la biomasa aérea leñosa permanente, 6,3% en la capa superior del suelo, y 15,7% en la

biomasa subterránea (3,11, 0,25 y 0,62 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente). Estos valores, particularmente para el suelo y las raíces, difieren de los reportados en la bibliografía (Sartori et al. 2007; Rytter 2012), probablemente debido a la mayor edad del árbol y menor densidad de plantación que la considerada en este estudio.

Teniendo en cuenta, en el periodo comprendido entre 2007 y 2009, la absorción por la parte aérea de la biomasa (tallos + hojas + ramas) y la cantidad potencial de bioelementos que podrían retornar al suelo a través de la hojarasca foliar caída, el aporte de N, P y K al suelo a través de la hojarasca representó el 84, 75 y 60% de la absorción total de NPK por el cultivo, respectivamente. Un estudio previo, en una plantación de corta rotación de *Populus trichocarpa* x *deltoides*, encontró que alrededor del 60-80% de la absorción de NPK retornaba al suelo cada año a través de la hojarasca (Berthelot et al. 2000).

En términos de eficiencia se pretende que al final de la vida útil de la plantación, el suelo quede, al menos, en condiciones similares respecto a las concentraciones de nutrientes iniciales, restituyendo al suelo las extracciones de nutrientes que hace el cultivo y, si es posible, se incrementen estos valores. Por lo tanto, teniendo en cuenta la absorción total del cultivo (Tabla 4.28), y la liberación anual de N, P y K al suelo procedente de la descomposición de la hojarasca foliar caída a lo largo de los distintos periodos (Tabla 4.14), se ha estimado que, en las condiciones ensayadas, en el cuarto año desde el inicio del estudio (Figura 5.12), la hojarasca foliar proporciona al suelo similar cantidad de P y K y, mayor de N que la cantidad total de nutrientes absorbidos por toda la biomasa aérea (tallos + hojas + ramas), debido a su acumulación (Tabla 4.29). Este es un hecho importante a tener en cuenta cuando se define las tasas de fertilización óptimas con el fin de racionalizar la aplicación de fertilizantes, con el consecuente ahorro económico y energético, y, en definitiva, poder contar con un cultivo energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Sin embargo, se considera que se necesitaría posteriores investigaciones para verificar si la cantidad total de nutrientes absorbidos por el cultivo puede venir de los nutrientes liberados por la descomposición de hojarasca foliar, deposiciones atmosféricas (Jones et al. 2014) o del fertilizante residual.



**Figura 5.12:** Balance de nutrientes entre el aporte al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar caída y el total extraído por el cultivo.

#### 5.4.2 Ensayo 2

La biomasa permanente (tallos + ramas) obtenida, en Soria y Madrid, para el periodo 2007 a 2010 fue 21,1 y 59,1 Mg MS ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla 4.30). Durante estos 4 años, la biomasa secuestró 10,2 y 28,6 Mg C ha<sup>-1</sup> (Tabla 4.30), siendo el valor mayor cuanto mayor es la producción de biomasa permanente. Durante este mismo período, la producción anual de hojarasca foliar, en términos de C, para Soria y Madrid, fue de 1,6 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para Soria y 4,3 para Madrid. La producción media anual de C a través de la descomposición de hojarasca fue de 1,4 y 4,0 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, valores más altos en comparación con los reportados para el follaje de *Populus simonii* a una densidad de 1420 árboles ha<sup>-1</sup> (Gao et al. 2014) y *Populus deltoides* a una densidad de 475 árboles ha<sup>-1</sup> (Arora y Chaudhry 2015).

En Madrid, para el periodo 2007-2011, la producción de biomasa leñosa permanente fue 73,2 Mg MS ha<sup>-1</sup> y su almacenamiento de C fue 35,4 Mg C ha<sup>-1</sup> (Tabla 4.30). La producción media de C anual de la hojarasca foliar, durante los 5 años estudiados, fue 5,1 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Teniendo en cuenta la descomposición de la hojarasca foliar, la producción de C anual fue 5,0 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, mayores que los encontrados por Kanime et al. (2013) para el follaje de *Populus deltoides* a una densidad de 500 árboles ha<sup>-1</sup> y una edad de 8 años.

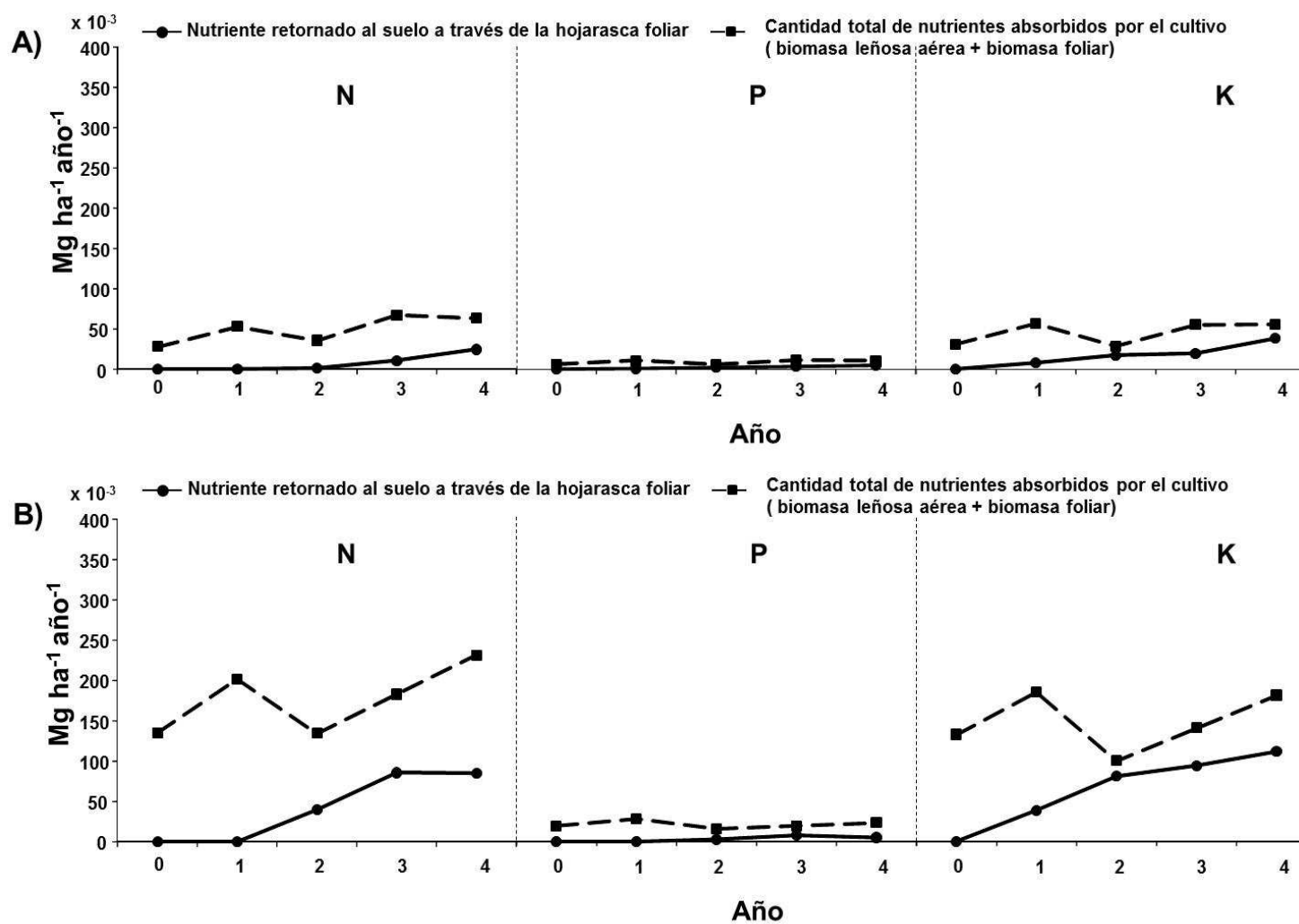
Al final del 2010, en Soria y Madrid respectivamente, el C acumulado se distribuye de la siguiente manera: 56 y 79 % en la biomasa aérea leñosa permanente, 33,0 y 5,5% en la capa superior del suelo y, 11,2 y 15,7% en la biomasa subterránea. En Soria, se acumuló más C en el suelo que en Madrid, lo que se podría atribuir a su origen agrícola. Según Gordan y Matthews (2006) el secuestro de C en suelos bajo cultivos de corta rotación, establecidos en terrenos de origen agrícola parece que acumulan mayores contenidos de C. Estos valores son menores para la biomasa aérea leñosa permanente y mayores para la capa superior del suelo y la biomasa subterránea que los indicados por Bowman y Turnbull (1997) y Kanime et al. (2013), probablemente debido a la diferente edad del árbol y densidad de plantación considerada en este estudio, así como a las diferentes condiciones edafoclimáticas.

En Madrid, al final del estudio (2011), el C acumulado se distribuye de la siguiente manera: 79,6 % en la biomasa aérea leñosa permanente, 4,5% en la capa superior del suelo y, 15,9% en la biomasa subterránea. La disminución que se aprecia, en Madrid, respecto al C acumulado en la capa superior del suelo en el periodo 2007-2010 (5,5%),

puede ser atribuido según Gao et al. (2014) a que la velocidad media de descomposición de la hojarasca foliar fue algo menor ( $K=1,02 \text{ año}^{-1}$ ) y por lo tanto se produce menor entrada de C de la hojarasca al suelo. Similares resultados encontraron Teklay y Chang (2008), ya que después de 4 años del establecimiento de una plantación con *Populus deltoides* × *Populus petrowskyana* var. Walker en el suelo hubo pérdida de C.

Considerando, en el primer ciclo de corta (2007 y 2008), la absorción por la parte aérea de la biomasa (tallos y ramas + hojas) y la cantidad potencial de bioelementos que podría retornar al suelo a través de la hojarasca foliar caída, se puede decir que el aporte de N, P y K al suelo a través de la hojarasca puede ser del 59, 50 y 54% y, el 69, 40 y 60% de la absorción total de NPK por el cultivo en Soria y Madrid, respectivamente. Valores en línea para el N y mayores para el P y K que los obtenidos por Lodhiyal et al. (1995) y Lodhiyal y Lodhiyal (1997a), probablemente debido a la diferente densidad de plantación, variedad dentro del género *Populus*, edad de los árboles y disponibilidad de agua. En este sentido, la diferencia en cuanto al aporte potencial de N, P y K al suelo a través de la hojarasca, en las plantaciones de Soria y Madrid con las mismas condiciones de cultivo, podría ser debido a la cantidad de agua recibida (Lodhiyal y Lodhiyal 1997a), y su distribución a lo largo del año, así como a las mayores temperaturas (temperatura media anual de 11 y 15°C en Soria y Madrid, respectivamente). La plantación de Soria recibió un 85% del agua que recibió la plantación de Madrid (precipitación + riego) en los meses de máxima actividad vegetativa, entre mayo y agosto (Tabla 3.1).

Teniendo en cuenta la absorción total del cultivo (Tabla 4.31), y la liberación anual de N, P y K al suelo procedente de la descomposición de la hojarasca foliar caída a lo largo del periodo (Tabla 4.18), se ha observado, en ambas localizaciones, un comportamiento cíclico (Figura 5.13). Además, a lo largo del periodo estudiado no se ha llegado a proporcionar al suelo, debido a la acumulación de hojarasca foliar, igual o mayor cantidad de macronutrientes primarios que la cantidad total nutrientes absorbida por toda la biomasa aérea (Tabla 4.32).



**Figura 5.13:** Balance de nutrientes entre el aporte al suelo a través de la descomposición de hojarasca foliar caída y el total extraído por el cultivo. A) Soria B) Madrid

En Soria y con los valores obtenidos se estima que después de 4 años de caída y acumulación de hojas, su descomposición ha aportado al suelo un 58, 70 y 91% de N, P y K, respectivamente. En Madrid, estas cifras son 53%, 42% y 83% de N, P y K. Referido a la cantidad total absorbida por toda la biomasa aérea estas cifras son, en Soria, del 39, 49 y 68% de N, P y K, respectivamente, y de 37, 22 y 62% en Madrid (Tabla 4.32). Estos últimos valores indican la reducción de elementos aportados al suelo que, en el cuarto año desde el inicio del estudio, se podría hacer sobre la necesidad de fertilizantes calculados en función de las extracciones totales. A este respecto, valores de más de 1,5 veces han sido observados por otros autores (Lodhiyal et al. 1994) con pluviometría superior (del orden de 1600 mm), sin periodos fríos, con densidad de plantación muy inferior (666 árboles ha<sup>-1</sup>) y distinto clon.

Los resultados obtenidos en el ensayo 2, respecto al balance de nutrientes, difieren de los encontrados en el ensayo 1. La diferencia principal de los dos ensayos radica en la distinta composición química de la hojarasca inicial. Serían recomendables más ensayos posteriores para poder dilucidar una tendencia para el chopo en turno corto y alta densidad dado que, actualmente, apenas existen datos al respecto.

## **CONCLUSIONES**



## 6 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones más relevantes:

1. El clon AF2 fue más sobresaliente que el clon I-214 tanto en diámetros por brote como en altura para ambas localizaciones estudiadas. También el área basimétrica calculada fue mayor en el clon AF2.
2. Las productividades de biomasa leñosa ( $\text{Mg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) están dentro del rango 2,6 a 15,4 dependiendo de la localización, del clon y del turno de corta. Ha resultado más productivo el clon AF2 que el I-214 y la zona de Madrid que la de Soria, lo que indicaría la importancia de una buena elección del material vegetal para las condiciones edafoclimáticas consideradas.
3. El área basimétrica es una variable independiente eficaz para predecir la producción de biomasa, obteniéndose ecuaciones con una variabilidad explicada superior al 70% en todos los casos.
4. En modelo potencial considerando como variable independiente  $AB_{130}$  es el que mejor se ajusta para estimar la biomasa leñosa seca por planta. La única excepción es para el año de implantación, en Soria, donde la variable independiente  $AB_{10}$ , resulta ser la más adecuada. La diferencia de la producción estimada por los modelos respecto a la real es, en general, inferior al 10%.
5. El porcentaje que representa la biomasa foliar respecto a la biomasa leñosa desciende al aumentar el crecimiento de las plantas con la edad. Para el clon I-214, con el método de trampas, el ratio hojas/(tallos + ramas) es mayor cuanto menor es la producción de biomasa leñosa y mayor es la densidad de plantación.
6. La tasa de descomposición anual se mantiene constante en la misma localidad, independientemente del periodo considerado y a pesar de las variaciones climáticas interanuales (valores medios para Soria de 0,65 y para Madrid de 1,05).
7. En un periodo de 32 meses, en la zona más cálida, los nutrientes que en mayor porcentaje se liberaron de la hojarasca (>del 90%) son el S y Mg, y los que

menos el P y N (un 65 %). En la zona más fría, los de mayor porcentaje fueron C y Mg (88 y 85%, respectivamente) y los de menor Mn y N (61%).

8. La descomposición de la hojarasca foliar, en 32 meses, proporcionó entre 1,4 y 4,0 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, siendo mayor en Madrid, la zona de mayor producción de biomasa y con mejores condiciones edafoclimáticas. El efecto sobre el contenido de materia orgánica del suelo ha sido positivo.
9. La cantidad de macronutrientes (NPK) liberados de la hojarasca respecto a las extracciones totales ha sido diferente en los dos ensayos realizados, incluso, entre los ensayos de una misma localización, pudiendo llegar a aportar hasta el 100% de lo absorbido por el cultivo al cuatro año después de la implantación, dada la acumulación interanual de hojarasca foliar.
10. La descomposición de la hojarasca de chopo, además de retornar los nutrientes que necesita el chopo para su crecimiento, fija C y contribuye a mejorar las características del suelo aumentando la materia orgánica y, con ello, los beneficios que esta conlleva.
11. Dada la importancia de satisfacer el incremento mundial de demanda de energía, el cultivo sostenible del chopo con fines energéticos parece una necesidad. Por ello, se considera de gran interés científico, continuar con estos estudios tanto para verificar, en nuevas áreas geográficas, algunos de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en Soria y Madrid como incrementar las bases del conocimiento acerca de los impactos que estos agrosistemas conllevan.

## **BIBLIOGRAFÍA**



## 7 BIBLIOGRAFÍA

### A

- Abelho, M. 2001. From litterfall to breakdown in streams: A review. *The Scientific World J.* 1:656-680.
- Abelho, M. 2008. Effects of leaf litter species on macroinvertebrate colonization during decomposition in a Portuguese stream. *Int. Rev. Hydrobiol.* 93(3):358-371.
- Abelho, M., M.A.S. Graça. 1998. Litter in a first-order stream of a temperate deciduous forest (Margaraça Forest, central Portugal). *Hydrobiologia* 386(1-3):147-152.
- Abugre, S., C. Oti-Boateng, M.F. Yeboah. 2011. Litter fall and decomposition trend of *jatropha curcas* L. leaves mulches under two environmental conditions. *Agric. Biol. J. N. Am.* 2(3):462-470.
- Adams, M.A., P.M. Atwill. 1982. Nitrogen mineralization and nitrate reduction in forests. *Soil Biol. Biochem.* 14(3):197-202.
- Adams, M.B., T.R. Angradi. 1996. Decomposition and nutrient dynamics of hardwood leaf litter in the Fernow Whole-Watershed Acidification Experiment. *Forest Ecol. Manag.* 83(1-2):61-69.
- AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), and IM (Instituto de Meteorología de Portugal). 2011. *Iberian Climate Atlas 1971-2000. Temperatura del aire y precipitación*. Madrid: AEMET, IM, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 80 p.
- AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2012. *Guía resumida del clima en España (1981-2010)*. Available online at [http://www.aemet.es/es/conocermas/publicaciones/detalles/guia\\_resumida\\_2010](http://www.aemet.es/es/conocermas/publicaciones/detalles/guia_resumida_2010); last accessed Oct. 10, 2014.
- Aerts, R. 1996. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? *J. Ecol.* 84(4):597-608.

- Aerts, R. 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos* 79(3):439-449.
- Aerts, R., H. De Caluwe. 1997. Nutritional and plant-mediated controls on leaf litter decomposition of *Carex* species. *Ecology* 78(1):244-260.
- Aerts, R., F.S. Chapin. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Adv. Ecol. Res.* 30:1-67.
- Ågren, G.I., E. Bosatta. 1996. Quality: A bridge between theory and experiment in soil organic matter studies. *Oikos* 76(3):522-528.
- Alexander, M. 1980. *Introducción a la Microbiología del Suelo*. Mexico: AGT Ed. S.A. 491 p.
- Allred, P.M., J.P. Giesy. 1988. Use in situ microcosms to study mass loss and chemical composition of leaf litter being processed in a blackwater stream. *Arch. Hydrobiol.* 114(2):231-250.
- Amichev, B.Y., M. Johnston, K.C.J. Van Rees. 2010. Hybrid poplar growth in bioenergy production systems: Biomass prediction with a simple process-based model (3PG). *Biomass Bioenerg* 34(5):687-702.
- Anderson, J.M. 1973. The breakdown and decomposition of sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) leaf litter in two deciduous woodland soils. II. Changes in the carbon, hydrogen, nitrogen and polyphenol content. *Oecologia* 12(3):275-288.
- Anderson, J.M., M.J. Swift. 1983. Decomposition in tropical forest. En: Sutton, S.L., T.C. Whitmore y A.C. Chadwick (eds), *Tropical Rain forest: Ecology and Management*. Oxford: Blackwell, Special Publication Series of the British Ecological Society, p. 287-309.
- Aponte, C., L.V. García, T. Marañón. 2013. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence. *Forest Ecol. Manag.* 309:36-46.
- Aranda, Y., J.M. Serrano, F. Bermúdez de Castro. 1990. Degradación de la hojarasca de *Populus nigra* L. *Rev. Ecol. Biol. Sol* 27:395-406.

- Armstrong, A., C. Johns, I. Tubby. 1999. Effect of spacing and cutting cycle on the grown as an energy crop. *Biomass Bioenerg.* 17(4):305-314.
- Arora, P., S. Chaudhry. 2015. Carbon Sequestration Potential of *Populus deltoides* plantation under Social Forestry Scheme in Kurukshetra, Haryana in Northern India. *J. Mater. Environ. Sci.* 6(3):713-720.
- Arunachalam, A., N.D. Singh. 2002. Leaf litter decomposition of evergreen and deciduous Dillenia species in humid tropics of north-east India. *J. Trop. Forest. Sci.* 14(1):105-115.
- Attiwill, P.M., G.W. Leeper. 1987. *Forest Soils and Nutrient Cycles*. Melbourne: Melbourne University Press. 202 p.
- Attiwill, P.M., M.A. Adams. 1993. Tansley Review No 50. Nutrient cycling in forests. *New Phytol.* 124(4):561-582.
- Austin, A.T., P.M. Vitousek. 2000. Precipitation, decomposition and litter decomposability of *Metrosideros polymorpha* in native forests on Hawai'i. *J. Ecol.* 88(1):129-138.

## B

- Ball, A.S., B.G. Drake. 1997. Short-term decomposition of litter produced by plants grown in ambient and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Global Change Biol.* 3(1):29-35.
- 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.
- Barthes, B., E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels. *Catena* 47(2):133-149.
- Benito-Garzón, M., P. Ruiz-Benito, M.A Zavala. 2013. Inter-specific differences in tree growth and mortality responses to climate determine potential species distribution limits in Iberian forests. *Global Ecol. Biogeog.* 22(10):1141-1151.

- Berg, B. 1988. Dynamics of nitrogen ( $^{15}\text{N}$ ) in decomposing Scots pine (*Pinus sylvestris*) needle litter. Long-term decomposition in a Scots pine forest VI. *Can. J. Bot.* 66:1539-1546.
- Berg, B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecol. Manag.* 133(1):13-22.
- Berg, B., C. McClaugherty. 2008. *Plant litter: Decomposition, humus formation, C sequestration*. Berlin: Springer-Verlag. 338 p.
- Berg, B., C. McClaugherty. 1989. Nitrogen and phosphorus release from decomposing litter in relation to the disappearance of lignin. *Can. J. Bot.* 67(4):1148-1156.
- Berg, B., G. Ekbohm, C. McCaugherty. 1984. Lignin and holocellulose relations during long-term decomposition of some forest litters. *Can. J. Bot.* 62:2540-2550.
- Berg, B., G. Ekbohm, M.E. Johansson, C.A. McClaugherty, F. Rutigliano, A.V. Santo. 1996. Maximum decomposition limits of forest litter types: a synthesis. *Can. J. Bot.* 74(5):659-672.
- Berg, B., H. Staaf. 1980. Decomposition rate and chemical changes of Scots pine needle litter. II. Influence of chemical composition. *Ecol. Bull.* 32:373-390.
- Berg, B., H. Staaf. 1981. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter. *Ecol. Bull.* 33:163-178.
- Bergfur, J., N. Friberg. 2012. Trade-offs between fungal and bacterial respiration along gradients in temperature, nutrients and substrata: experiments with stream derived microbial communities. *Fungal Ecol.* 5(1):46-52.
- Berglund, S.L., G.I. Ågren. 2012. When will litter mixtures decompose faster or slower than individual litters? A model for two litters. *Oikos* 121(7):1112-1120.
- Bernhard-Reversat, F. 1993. Dynamics of litter and organic matter at the soil-litter interface in fast-growing tree plantations on sandy ferrallitic soils (Congo). *Acta Oecol.* 14(2):179-195.
- Berthelot, A., J. Ranger, D. Gelhaye. 2000. Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France. *Forest Ecol. Manag.* 128(3):167-179.

- Bigler, C., H. Bugmann. 2003. Growth-dependent tree mortality models based on tree rings. *Can. J. Forest Res.* 33(2):210-221.
- Blake, G.R., K.H. Hartge. 1986. Bulk Density. 2<sup>nd</sup> edición. En: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph N°. 9 Madison, WI: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America (ASA-SSSA), p. 363-375.
- Bockheim, J.G., E.A. Jepsen, D.M. Heisey. 1991. Nutrient dynamics in decomposition leaf litter of four tree species on a sandy soil in northwestern Wisconsin. *Can. J. For. Res.* 21(6):803-812.
- Bowman, U., J. Turnbull. 1997. Integrated biomass energy systems and emission of carbon dioxide. *Biomass Bioener.* 13(6):333-343.
- Bray, R.H., L.T. Kurtz. 1945. Determination total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59(1):39-45.
- Bringmark, L. 1977. A bioelement budget of an old Scots Pine forest in central Sweden. *Silva Fennica* 11:201-209.
- Bubb, K.A., Z.H. Xu, J.A. Simpson, P.G. Saffigna. 1998. Some nutrient dynamics associated with litterfall and litter decomposition in hoop pine plantations of southeast Queensland, Australia. *Forest Ecol. Manag.* 110(1-3):343-352.

## C

- Campbell, D.J., J.K. Henshall. 1991. Bulk Density. En: Smith, K.A. y C.E. Mullins (Eds.) *Soil Analysis: Physical Methods*. New York: Marcel Decker, Inc. 270 Madison Avenue, p. 329-366.
- Campbell, C.D., R.F. Sage. 2006. Interactions between the effects of atmospheric CO<sub>2</sub> content and P nutrition on photosynthesis in white lupin (*Lupinus albus* L.). *Plant Cell Environ.* 29(5):844-853.
- Cao, M., S.D. Prince, K. Li, B. Tao, J. Small, X. Shao. 2003. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Glob. Change Biol.* 9(4):536-546.

- Cárcamo, H.A., T.A. Abe, C.E. Prescott, C.P. Chanway. 2000. Influence of millipedes on litter decomposition, N mineralization, and microbial communities in a coastal forest in British Columbia, Canada. *Can. J. For. Res.* 30(5):817-826.
- Carreira, J.A., K. Latjha. 1997. Factors affecting phosphate sorption along a Mediterranean, dolomitic soil and vegetation chronosequence. *Eur. J. Soil Sci.* 48(1):139-149.
- Cassab, G.I. 1998. Plant cell wall proteins. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49:281-309.
- Chandler, R.F. 1943. Amount and mineral nutrient content of freshly fallen needle litter of some northeastern conifers. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 8:409-411.
- Chapin, F.S., III, R.A. Kedrowski. 1983. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous taiga trees. *Ecology* 64(2):376-391.
- Chapin, F.S., III. 1991. Effects of multiple environmental stresses on nutrient availability and use. En: Mooney, H.A., W.E. Winner y E.J. Pell (eds.), *Responses of plants to multiple stresses*. San Diego: Academic Press, p. 67-88.
- Chapin, III F.S., P.A. Matson, P.M. Vitousek. 2011. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. 2<sup>nd</sup> Edición. New York: Springer. 529 p.
- Chapin, III, F.S., L. Moilanen. 1991. Nutritional controls over nitrogen and phosphorus resorption from Alaskan birch leaves. *Ecology* 72(2):709-715.
- Chen, J., W. Ju, J. Cihlar, D. Price, J. Liu, W. Chen, J. Pan, A. Black, A. Barr. 2003. Spatial distribution of carbon sources and sinks in Canada's forests. *Tellus* 55B:622-641.
- Chhetri, R., B. Toomsan, W. Kaewpradit, V. Limpinuntana. 2012. Mass loss, nitrogen, phosphorus and potassium release patterns and non-additive interactions in a decomposition study of chir pine (*Pinus roxburghii*) and oak (*Quercus griffithii*). *Int. J. Agric. Res.* 7(7):332-344.
- CIEMAT. BIORAISE-CE. Aplicación SIG para evaluación de cultivos energéticos. [Fecha de consulta: 07 agosto 2015]. Disponible en: <http://bioraise.ciemat.es/bioraisece.html>

- Ciria, M.P. 2009. El chopo (*Populus spp*) como cultivo energético. Hoja divulgadora nº 2131. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 32 p.
- Ciria, M.P., J. Pérez, M.J. Fernández, J.E. Carrasco. 2008. Nutrients extraction in a high density poplar plantation. P. 589-592 in *Proc. of 16<sup>th</sup> European Biomass Conf. From Research to Industry and Markets*, ETA-Florence Renewable Energies, Valencia.
- Cole, D.W. 1986. Nutrient cycling in world forest. En: Gessel, S.P. (ed), *Forest site and productivity*. The Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, p. 104-115.
- Cotrufo, M.F., P. De Angelis, A. Polle. 2005. Leaf litter production and decomposition in a poplar short-rotation coppice exposed to free air CO<sub>2</sub> enrichment (POPFACE). *Glob. Change Biol.* 11(6):971-982.
- Coulson, J.C., J. Butterfield. 1978. An investigation of the biotic factors determining the rates of plant decomposition on blanket bog. *J. Ecol.* 66(2):631-650.
- Coûteaux, M.M., P. Bottner, B. Berg. 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends Ecol. Evol.* 10(2):63-66.

## D

- Dantin, J., A. Revenga. 1961. Índice termopluviométrico. En: Lorente, J.M. (ed.). *Meteorología*. Barcelona: Editorial Labor, p. 286.
- Davis, S.E., C. Corronado-Molina, D.L. Childers, J.W. Day. 2003. Temporally dependent C, N, and P dynamics associated with the decay of *Rhizophora mangle* L. leaf litter in oligotrophic mangrove wetlands of the Southern Everglades. *Aquat. Bot.* 75(3):199-215.
- Del Arco, J.M., A. Escudero, M. Vega Garrido. 1991. Effects of site characteristics on nitrogen retranslocation from senescing leaves. *Ecology* 72(2):701-708.
- Di Matteo G., G. Sperandio, S. Verani. 2012. Field performance of poplar for bioenergy in southern Europe after two coppicing rotations: effects of clone and planting density. *iForest-Biogeoosciences and Forestry* 5(5):224-229.

- Donozo, Z.C. 1981. *Ecología forestal: el bosque y su medio ambiente*. Chile: Universidad Austral de Chiles. 369 p.
- Doran, J.W., T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. En: Doran, J.W., D.C. Coleman, D.F. Bezdicek y B.A. Stewart (eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA Special Publication. N° 35. Madison, WI: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America (ASA-SSSA), p. 3-21.
- Duchesne, L., R. Ouimet, D. Camire Houle. 2001. Seasonal nutrient transfers by foliar resorption, leaching and litter fall in a northern hardwood forest at Lake Clair Watershed, Quebec, Canada. *Can. J. For. Res.* 31(2):333-344.

## E

- Edmonds, R.L. 1980. Litter decomposition and nutrient release in Douglas-fir, red alder, western hemlock, and Pacific silver fir ecosystems in western Washington. *Can. J. Forest Res.* 10(3):327-337.
- Enoki, T., H. Kawaguchi. 2000. Initial nitrogen content and topographic moisture effects on the decomposition of pine needles. *Ecol. Res.* 15:425-434.
- Escudero, A., J.M. Del Arco, I.C. Sanz, J. Ayala. 1992. Effects of leaf longevity and retranslocation efficiency on the retention time of nutrients in the leaf biomass of different woody species. *Oecologia* 90(1):80-87.
- Eurachem/CITAC. 2000. *Guide CG4 Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*. 2<sup>nd</sup> edición. UK: S.L.R. Ellison, M. Rosslein y A. Williams. 120 p.
- Europa. Directiva 2009/28/CE de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Diario Oficial de la Unión Europea. 5 de junio de 2009, núm. 140, p. 16-62.

## F

- Facciotto, G., S. Bergante, C. Lioia, L. Rosso, G. Mughini, T. Zenone, G. Nervo. 2006. Produttività di cloni di pioppo e salice in piantagioni a turno breve. *Foresta-J. Silvicult. For. Ecol.* 3(2):238-252.
- Fajman, M., M. Palat, P. Sedlak. 2009. Estimation of the yield of poplars in plantations of fast-growing species within current results. *Acta universitatis agriculture et silviculturae Mendelianae Brunensis*. Vol. LVII, N° 2:25-36.
- FAO. 2008. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. IUSS-ISRIC-FAO. Un marco conceptual para clasificación y comunicación internacional. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Reporte N°. 103. Roma.
- FAO. 2012. Improving lives with poplars and willows. Synthesis of Country Progress Reports. 24th Session of the International Poplar Commission, Dehradun, India, 30 Oct-2 Nov. Working Paper IPC/12E.Forest Assessment, Management and Conservation Division.Rome.
- Fernandes, E.C.M., Y. Biot, C. Castilla, A. Canto, J.C. Matos, S. García, R. Perin, E. Wanderli. 1997. The impact of selective logging and forest conversion for subsistence agriculture and pastures on terrestrial nutrient dynamics in the Amazon. *Ciecia Cultura* 49(1-2):34-47.
- Fierer, N., J.M. Craine, K. McLauchlan, J.P. Schimel. 2005. Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. *Ecology* 86(2):320-326.
- Fillion, M., J. Brisson, T.I. Teodorescu, S. Sauvé, M. Labrecque. 2009. Performance of *Salix viminalis* and *Populus nigra* x *Populus maximowiczii* in short rotation intensive culture under high irrigation. *Biomass Bioenerg.* 33(9):1271-1277.
- Fioretto, A., C. Di Nardo, S. Papa, A. Fuggi. 2005. Lignin and cellulose degradation and N dynamics during decomposition of three leaf litter species in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biol. Biochem.* 37(6):1083-1091.
- Fioretto, A., S. Papa, A. Fuggi. 2003. Litter-fall and litter decomposition in a low Mediterranean shrubland. *Bio. Fert. Soils* 39(1):37-44.

- Fioretto, A., S. Papa, G. Sorrentino, A. Fuggi. 2001. Decomposition of *Cistus incatus* leaf litter in a Mediterranean maquis ecosystem: mass loss, microbial enzyme activities and nutrient changes. *Soil Biol. Biochem.* 33(3):311-321.
- Forteza, J., L.F. Lorenzo, N. Najac, S. Cuadrado, F. Ingelmo, J. Hernández, P. García, L. Prat, C. Muñoz, C. Macarro, D. Rivas. 1988. *Memoria y mapa de suelos de Castilla y León*. Valladolid: Dirección General de Medio Ambiente y Urbanismo. Sección de Ordenación del Territorio y Cartografía. Junta de Castilla-León. 98 p.
- Franklin, J.F., H.H. Shugart, M.E. Harmon. 1987. Tree death as an ecological process. *Bioscience* 8(37):550-556.
- Franzluebbers, A.J., J.A. Stuedemann. 2009. Soil-profile organic carbon and total nitrogen during 12 years of pasture management in the Southern Piedmont USA. *Agr. Ecosyst. Environ.* 129(1-3):28-36.
- Friberg, N., J.B. Dybkjær, J.S. Olafsson, G.M. Gislason, S.E. Larsen, T.L. Lauridsen. 2009. Relationships between structure and function in streams contrasting in temperature. *Freshwater Biol.* 54(10):2051-2068.

## G

- Gallardo, A. J. Merino. 1993. Leaf decomposition in two Mediterranean ecosystems of south-west Spain: Influence of substrate quality. *Ecology* 74(1):152-161.
- Gallardo, J.F., M.I. González. 2004. Sequestration of C in a Spanish chestnut coppice. *Invest.Agrar.:Sist. Recur.For.* vol. extra:108-113.
- Gao, Y., J. Cheng, Z. Ma, Y. Zhao, J. Su. 2014. Carbon storage in biomass, litter, and soil of different plantations in a semiarid temperate region of northwest China. *Ann. For. Sci.* 71(4):427-435.
- García, F., M.I. Izquierdo, F. Marcos, J. Ruiz, S. Villegas. 2001. Tablas de cubicación de chopo (I-214) Con fines energéticos a turnos muy cortos. Actas I Simposio del Chopo. Zamora, 9-11de Mayo.

- García-Pausas, J., P. Casals, J. Romanyà. 2004. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer. *Soil Biol. Biochem.* 56(6):989-997.
- Gee, G.W., J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. 2<sup>nd</sup> edición. En: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph N°. 9 Madison, WI: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America (ASA-SSSA), p. 383-411.
- Gordan, M., R. Matthews. 2006. A modelling analysis of the potential for soil carbon sequestration under short rotation coppice willow bioenergy plantations. *Soil Use Manage.* 18(3):175-183.
- Gordon, A.M., C. Chourmouzis, A.G. Gordon. 2000. Nutrient inputs in litterfall and rainwater fluxes in 27-year old red, black and white spruce plantations in Central Ontario, Canada. *Forest Ecol. Manag.* 138(1-3):65-78.
- Guo, L.B., R.E.H. Sims, 2001, Eucalypt litter decomposition and nutrient release under a short rotation forest regime and effluent irrigation treatments in New Zealand I. External effects. *Soil Biol. Biochem.* 33(10):1381-1388.
- Guo, L.B., R.E.H. Sims. 1999. Litter decomposition and nutrient release via litter decomposition in New Zealand eucalypt short rotation forests. *Agr. Ecosyst. Environ.* 75(1):133-140.
- Gupta, M.K., S.D. Sharma. 2009. Effect of tree plantation on soil properties, profile morphology and productivity index-II. Poplar in Yamunanagar district of Haryana. *Ann. For.* 17(1):43-70.
- Güsewell, S., J.T.A. Verhoeven. 2006. Litter N:P ratios indicate whether N or P limits the decomposability of graminoid leaf litter. *Plant Soil* 287(1-2):131-143.

## H

- Haase, R. 1999. Litterfall and nutrient return in seasonally flooded and non-flooded forest of the Pantanal, Mato Grosso, Brazil. *Forest Ecol. Manag.* 117(1-3):129-147.

- Haddad, N. 2004. Introduction - Why Study Earth System Science. Disponible online en: <http://serc.carleton.edu/files/eet/globe/EarthSysInt.pdf>; ultimo acceso Nov. 13, 2014.
- Harmon, M.E., G.A. Baker, G. Spycher, S.E. Green. 1990. Leaf-litter decomposition in the Picea/Tsuga forests of Olympic National Park, Washington, U.S.A. *For. Ecol. Manage.* 31(1-2):55-66.
- Harmon, M.E., W.L. Silver, B. Fasth, H. Chen, I.C. Burke, W.J. Parton, S.C. Hart, W.S. Currie. 2009. Long-term patterns of mass loss during the decomposition of leaf and fine root litter: an intersite comparison. *Glob. Change Biol.* 15(5):1320-1338.
- Harrison, R.B., P.W. Footen, B.D. Strahm. 2011. Deep soil horizons: contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change. *For. Sci.* 57(1):67-76.
- Hart, S.C. 1999. Nitrogen transformations in fallen tree boles and mineral soil of an old-growth forest. *Ecology* 80(4):1385-1394.
- Hart, S.C., M.K. Firestone, E.A. Paul. 1992. Decomposition and nutrient dynamics of ponderosa pine needles in a Mediterranean-type climate. *Can. J. Forest Res.* 22:306-314.
- Hasegawa, M., H. Takeda. 1996. Carbon and nutrient dynamics in decomposing pine needle litter in relation to fungal and faunal abundances. *Pedobiologia* 40(2):171-184.
- Heal, O.W., J.M. Anderson, M.J. Swift. 1997. Plant Litter Quality and Decomposition: An Historical Overview. En: Cadisch, G. y K.E. Giller (eds.), *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*. Wallingford: CAB International, p. 3-30.
- Henderson, D.E., S. Jose. 2012. Nutrient Use Efficiency of Three Fast Growing Hardwood Species across a Resource Gradient. *Open Journal of Forestry* 2(4):187-199. doi: 10.4236/ojf.2012.24023.

- Hernández, M.J., P. Pita, M. Sánchez, M.M. Sánchez, I. Cañellas, H. Sixto. 2013. Caracterización anatómica del xilema en genotipos de *Populus sp.* empleados en plantaciones forestales con fines energéticos en condiciones de estrés hídrico. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz.
- Hobbie, S.E. 1996. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan Tundra. *Ecol. Monogr.* 66(4):503-522.
- Hobbie, S.E. 2000. Interactions between litter lignin and soil nitrogen availability during leaf litter decomposition in a Hawaiian montane forest. *Ecosystems* 3(5):484-494.
- Hobbie, S.E. 2008. Nitrogen effects on decomposition: a five-year experiment in eight temperate sites. *Ecology* 89(9):2633-2644.
- Hobbie, S.E., P.M. Vitousek. 2000. Nutrient limitation of decomposition in Hawaiian forests. *Ecology* 81(7):1867-1877.
- Houghton, R.A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus* 51B:298-313.
- Huebschmann, M.M., T.B. Lynch, R.F. Wittwer. 1999. Needle litterfall prediction models for even-aged natural shortleaf pine (*Pinus echinata* Mill) stands. *Forest Ecol. Manag.* 117(1-3):179-186.

## I

- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético). 2011. Plan de Energías Renovables 2011-2020. Madrid. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 774 p.
- Incerti, G., G. Bonanomi, F. Giannino, D. Piermatteo, S. Castaldi, A. Fioretto, S. Papa, A. De Marco, A. Fierro, O. Maggi, A.M. Persiani, F.A. Rutigliano, E. Feoli, A. Virzo De Santo, S. Mazzoleni. 2011. Litter decomposition in Mediterranean ecosystems: Modelling the controlling role of climatic conditions and litter quality. *Appl. Soil Ecol.* 49:148-157.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1991. Mapa geológico de España. Escala 1:50000 Segunda Serie. Primera Edición. Gómara N° 379:23-15.

- Instituto Geológico y Minero Nacional (IGME). 1994. Mapa Geológico de España a escala 1:1.000.000. Publicaciones del IGME, Madrid.
- ISO/IEC Guide 98. 1993. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Genève: International Organization for Standardization, 105 p.

## J

- Jackson, M.L. 1976. *Análisis químicos de los suelos*. 3º Edición. Traducido del inglés por José Beltrán Martínez. Barcelona: Omega S.A. 662 p.
- Johansson, T., A. Karacic. 2011. Increment and biomass in hybrid poplar and some practical implications. *Biomass Bioenerg* 35(5):1925-1934.
- Johnson, D.W. 1984. Sulfur cycling in forests. *Biogeochemistry* 1:29-43.
- Jonczak, J., H. Dziadowiec, K. Kacprowicz, A. Czarnecki. 2010. An assessment of the influence of poplar clones Hybrid 275 and Robusta on soil cover based on the characteristics of their plant litter fall. *Pol. J. Soil Sci.* 43(1):9-19.
- Jones, L., A. Provins, M. Holland, G. Mills, F. Hayes, B. Emmett, J. Hall, L. Sheppard, R. Smith, M. Sutton, K. Hicks, M. Ashmore, R. Haines-Young, L. Harper-Simmonds. 2014. A review and application of the evidence for nitrogen impacts on ecosystem services. *Ecosystem Services* 7:76-88.
- Jordan, C.F. 1985. *Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. Principles and their application in management and conservation*. New York: John Wiley & Sons. 223 p.

## K

- Kahle, P., E. Hildebrand, C. Baum, B. Boelcke. 2007. Long-term effects of short rotation forestry with willows and poplar on soil properties. *Arch. Agron. Soil Sci.* 53(6):673-682.

- Kanime, N., R. Kaushal, S.K. Tewari, K.P. Raverkar, S. Chaturvedi, O.P. Chaturvedi. 2013. Biomass production and carbon sequestration in different tree-based systems of Central Himalayan Tarai region. *Forests, Trees and Livelihoods* 22(1):38-50.
- Kavvadias, V.A., D. Alifragis, A. Tsiontsis, G. Brofas, G. Stamatelos. 2001. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *Forest Ecol. Manag.* 144(1-3):113-127.
- Killingbeck, K.T. 1996. Nutrients in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency. *Ecology* 77(6):1716-1727.
- Killingbeck, K.T., J.D. May, S. Nyman. 1990. Foliar senescence in an aspen (*Populus tremuloides*) clone: the response of element resorption to inter-ramet variation and timing of abscission. *Can. J. For. Res.* 20(8):1156-1164.
- Kim, C., J.H. Lim, J.H. Shin. 2003. Nutrient dynamics in litterfall and decomposing leaf litter at the Kwangneung deciduous broad-leaved natural forest. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 5(2):87-93.
- Kittredge, J. 1948. *Forest influence. The effects of woody vegetation on climate, water, and soil, with applications to the conservation of water and the control of floods and erosion.* New York: Mcgraw-Hill Book Co. 394 p.
- Knoepp, J.D., D.C. Coleman, D.A. Crossley, J.S. Clark. 2000. Biological indices of soil quality: An ecosystem case study of their use. *For. Ecol. Manage.* 138(1-3):357-368.
- Kochsiek, A.E. 2010. *Litter carbon dynamics: the importance of decomposition, accretion, and sequestration in understanding ecosystem carbon cycling.* PhD Dissertation. Lincoln: University of Nebraska-Lincoln.
- Koike, T. 1995. Effects of CO<sub>2</sub> in interaction with temperature and soil fertility on the foliar phenology of alder, birch, and maple seedlings. *Can. J. Bot.* 73(2):149-157.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15:259-263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130

- Kunhamu, T.K., Kumar B.M., Viswanath S. 2009. Does thinning affect litterfall, litter decomposition, and associated nutrient release in *Acacia mangium* stands of Kerala in peninsular India? *Can. J. For. Res.* 39(4):792-801.

## L

- Laganière, J., D.A. Angers, D. Paré. 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biol.* 16(1):439-453.
- Lajtha, K. 1987. Nutrient reabsorption efficiency and the response to phosphorus fertilization in the desert shrub *Larrea tridentate* (D.C.) Cov. *Biogeochemistry* 4(3):265-276.
- Lamerre, J., K.U. Schwarz, M. Langhof, G. von Wühlisch, J.M. Greef. 2015. Productivity of poplar short rotation coppice in an alley-cropping agroforestry system. *Agroforest Syst.*: in press. **Published online: 01 Julio 2015. DOI [10.1007/s10457-015-9825-7](https://doi.org/10.1007/s10457-015-9825-7)**
- Laurance, W.F., P. Delamonica, S.G. Laurance, H.L. Vasconcelos, T.E. Lovejoy. 2000. Rainforest fragmentation kills big trees. *Nature* 404:836.
- Laureysens, I., A. Pellis, J. Willems, R. Ceulemans. 2005. Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar. III. Second rotation results. *Biomass Bioenerg.* 29(1):10-21.
- Laureysens, I., W. Deraedt, T. Indeherberge, R. Ceulemans. 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 Bioenerg.* 24(2):81-95.
- Lavelle, P., E. Blanchart, A. Martin, S. Martin, A. Spain, F. Toutain, I. Barois, R. Schaefer. 1993. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems. Applications to soils of the humid tropics. *Biotropica* 25(2):130-150.

- Liberloo, M., C. Calfapietra, M. Lukac, D. Godbold, Z.B. Luo, A. Polle, M.R. Hoosbeek, O. Kull, M. Marek, C. Raines, M. Rubino, G. Taylor, G. Scarascia-Mugnozza, R. Ceulemans. 2006. Woody biomass production during the second rotation of a bio-energy *Populus* plantation increases in a future high CO<sub>2</sub> world. *Glob. Change Biol.* 12(6):1094-1106.
- Likens, G.E., F.H. Bormann. 1995. *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. 2<sup>nd</sup> edición. New York: Springer-Verlag. 180 p.
- Liu, W.Y., J.E.D. Fox, Z.F. Xu. 2000. Leaf litter decomposition of canopy trees, bamboo and moss in a montane moist evergreen broad-leaved forest on Ailao mountain, Yunnan, Southwest China. *Ecol. Res.* 15:435-447.
- Lodhiyal, L.S., N. Lodhiyal. 1997a. Nutrient cycling and nutrient use efficiency in short rotation, high density central Himalayan Tarai poplar plantations. *Ann. Bot.* 79(5):517-527.
- Lodhiyal, L.S., N. Lodhiyal. 1997b. Variation in biomass and net primary productivity in short rotation high density central Himalayan poplar plantations. *Forest Ecol. Manag.* 98(2):167-179.
- Lodhiyal, L.S., R.P. Singh, S.P. Singh. 1994. Productivity and nutrient cycling in poplar stands in central Himalaya, India. *Can. J. For. Res.* 24(6):1199-1209.
- Lodhiyal, L.S., R.P. Singh, S.P. Singh. 1995. Structure and function of an age series of poplar plantations in central Himalaya. II. Nutrient dynamics. *Ann. Bot.* 76(2):201-210.
- Lousier, J.D., D. Parkinson. 1978. Chemical element dynamics in decomposing leaf litter. *Can. J. Botany* 56(21):2795-2812.
- Lusk, C.H., F. Matus, M. Moreno-Chacón, A. Saldaña, M. Jiménez-Castillo. 2003. Seasonal variation in leaf litter nutrient concentrations of Valdivian rainforest trees. *Gayana Bot.* 60(1):35-39.

## M

- Makeschin, F. 1999. Short rotation forestry in Central and Northern Europe - introduction and conclusions. *Forest Ecol. Manag.* 121(1-2):1-7.

- Manzoni, S., J.A. Trofymow, R.B. Jackson, A. Porporato. 2010. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. *Ecol. Monogr.* 80(1):89-106.
- Manzoni, S., R.B. Jackson, J.A. Trofymow, A. Porporato. 2008. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. *Science* 321(5889):684-686.
- Martín, A., J.F. Gallardo, I. Santa Regina. 1995. Interaction between litter and soil epipedons in forest ecosystems of the Sierra de Gata mountains, province of Salamanca, Spain. *Arid Soil Res. Rehab.* 9(3):299-305.
- Martins, A., S. Azevedo, F. Raimundo, L. Carvalho, M. Madeira. 2009. Decomposição de folhada de quatro espécies florestais no Norte de Portugal: Taxa de decomposição e evolução da composição estrutural e do teor em nutrientes. *Rev Ciências Agrárias* 32(1):223-237.
- McClaugherty, C.A., J. Pastor, J.D. Aber. 1985. Forest litter decomposition in relation to soil nitrogen dynamics and litter quality. *Ecology* 66(1):266-275.
- McGuire, K. L., N. Fierer, C. Bateman, K. K. Treseder, B.L. Turner. 2012. Fungal community composition in Neotropical rain forests: the influence of tree diversity and precipitation. *Microb. Ecol.* 63(4):804-812.
- Meentemeyer, V. 1978. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. *Ecology* 59(3):465-472.
- Meentemeyer, V., E.O. Box, R. Thompson. 1982. World pattern and amounts of terrestrial plant litter production. *Bioscience* 32(2):125-128.
- Meiresonne, L., A. De Schrijver, B. De Vos. 2007. Nutrient cycling in a poplar plantation (*Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* 'Beaupré') on former agricultural land in northern Belgium. *Can. J. Forest Res.* 37(1):141-155.
- Melillo, J.M., J.D. Aber, J.F. Muratore. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63(3):621-626.
- Montagnini, F., C.F. Jordan. 2002. Reciclaje de nutrientes. En: Guariguata, M.R. y G. Kattan (eds.). *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. Cartago (Costa Rica): Editorial tecnológica, p.167-191.

- Moore, T.R., J.A. Trofymow, C.E. Prescott, B.D. Titus. 2010. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests. *Plant Soil* 339(1-2):163-175.
- Moore, T.R., J.A. Trofymow, C.E. Prescott, J. Fyles, B.D. Titus. 2006. Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests. *Ecosystems* 9(1):46-62.
- Moore, T.R., J.A. Trofymow, M. Siltanen, C. Prescott, CIDET Working Group. 2005. Patterns of decomposition and C, N, and phosphorus dynamics of litter in upland forest and peatland sites in central Canada. *Can. J. For. Res.* 35(1):133-142.
- Moro, M.J., F. Domingo, A. Escarré. 1996. Organic matter and nitrogen cycles in a pine forested catchment with a shrub layer of *Adenocarpus decorticans* and *Cistus laurifolius* in south-eastern Spain. *Ann. Bot.* 78(6):675-685.
- Moro, M.J., F. Domingo. 2000. Litter decomposition in four woody species in a Mediterranean climate: weight loss, N and P dynamics. *An. Bot.* 86(6):1065-1071.
- Murphy, K.L., J.M. Klopatek, C.C. Klopatek. 1998. The effects of litter quality and climate on decomposition along an elevation gradient. *Ecol. Appl.* 8(4):1061-1071.

## N

- Nagy, L.A., B.J. Macaulev. 1982. Eucalyptus leaf-litter decomposition: effects of relative humidity and substrate moisture content. *Soil Biol. Biochem.* 14(3):233-236.
- Nambiar, E.K.S., D.N. Fife. 1987. Growth and nutrient retranslocation in needles of radiata pine in relation to nitrogen supply. *Ann. Bot.* 60(2):147-156.
- Nassi o Di Nasso, N., W. Guidi, G. Ragaglini, C. Tozzini, E. Bonari. 2010. Biomass production and energy balance of a 12-year-old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles. *Glob. Change Biol. Bioenergy* 2(2):89-97.

- Netzer, D.A., D. Tolsted, M.E. Ostry, J.G. Isebrands, D.E. Riemenschneider, K.T. Ward. 2002. Growth, yield, and disease resistance of 7 to 12-year-old poplar clones in the north central United States. St. Paul (MN): United States Department of Agriculture, Forest Service, Technical Report NC-229, p. 33.
- Ngao, J., F. Bernhard-Reversat, J.-J. Loumeto. 2009. Changes in eucalypt litter quality during the first three months of field decomposition in a Congolese plantation. *Appl. Soil Ecol.* 42(3):191-199.
- Niinemets, Ü., Ü. Tamm. 2005. Species differences in timing of leaf fall and foliage chemistry modify nutrient resorption efficiency in deciduous temperate forest stands. *Tree Physiol.* 25(8):1001-1014.

## O

- Oliveira, N., H. Sixto, I. Cañellas, R. Rodríguez-Soalleiro, C. Pérez-Cruzado. 2015. Productivity model and reference diagram for short rotation biomass crops of poplar grown in Mediterranean environments. *Biomass Bioenerg.* 72:309-320.
- Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of agricultura (USDA). Circular N°. 939:1-19.
- Osono, T., H. Takeda. 2001. Organic chemical and nutrient dynamics in decomposing beech leaf litter in relation to fungal growth and succession during 3-year decomposition processed in a cool temperate deciduous forest in Japan. *Ecol. Res.* 16(4):649-670.
- Osono, T., H. Takeda. 2004. Potassium, calcium, and magnesium dynamics during litter decomposition in a cool temperate forest. *J. For. Res.* 9(1):23-31.

## P

- Padró, A., J. Orensanz. 1987. *El chopo y su cultivo*. Serie Técnica. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 446 p.

- Palma, R.M., J. Prause, A.V. Fontanive, M.P. Jimenez. 1998. Litter fall and litter decomposition in a forest of the Parque Chaqueño Argentino. *Forest Ecol. Manag.* 106(2-3):205-210.
- Panda, T., P.K. Pani, R.B. Mohanty. 2010. Litter decomposition dynamics associated with cashew nut plantation in coastal habitat of Orissa, India. *J. Oceanogr. Mar. Sci.* 1(4):79-85.
- Paris, P., L. Mareschi, M. Sabatti, A. Pisanelli, A. Ecosse, F. Nardin, G. Scarascia-Mugnozza. 2011. Comparing hybrid *Populus* clones for SRF across northern Italy after two biennial rotations: survival, growth and yield. *Biomass Bioenerg.* 35(4):1524-1532.
- Parton, W., W.L. Silver, I.C. Burke, L. Grassens, M.E. Harmon, B. Currie, J. King, E.C. Adair, L. Brandt, B. Fasth. 2007. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science* 315(5810):361-364.
- Paul, E.A., F.E. Clark. 1997. *Soil Microbiology and Biochemistry*. San Diego: Academic Press. 340 p.
- Pedersen, L.B., J.B. Hansen. 1999. A comparison of litterfall and element fluxes in even aged Norway spruce, sitka spruce and beech stands in Denmark. *Forest Ecol. Manag.* 114(1):55-70.
- Peel, M.C., B.L. Finlayson, T.A. McMahon. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 11(5):1633-1644.
- Pellegrino, E., C. Di Bene, C. Tozzini, E. Bonari. 2011. Impact on soil quality of a 10-year-old short-rotation coppice poplar stand compared with intensive agricultural and uncultivated systems in a Mediterranean area. *Agr. Ecosyst. Environ.* 140(1-2):245-254.
- Pérez, J., T.W. Jeffries. 1992. Roles of manganese and organic acid chelators in regulating lignin degradation and biosynthesis of peroxidases by *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl. Environ. Microbiol.* 58(8):2402-2409.
- Pérez-Corona, M.E., M.C. Pérez, F. Bermúdez de Castro. 2006. Decomposition of alder, ash, and poplar litter in a Mediterranean riverine area. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37(7-8):1111-1125.

- Piatek, K.B., H. Lee Allen. 2000. Site preparation effects on foliar N and P use, retranslocation, and transfer to litter in 15-years old *Pinus taeda*. *Forest Ecol. Manag.* 129(1-3):143-152.
- Piccolo, A., S. Nardi, G. Concheri. 1996. Macromolecular changes of humic substances induced by interaction with organic acids. *Eur. J. Soil Sci.* 47(3):319-328.
- Pontailler, J.Y., R. Ceulemans, J. Guittet, F. Mau. 1997. Linear and non-linear functions of volume index to estimate woody biomass in high density young poplar stands. *Ann. For. Sci.* 54:335-345.
- Pontailler, J.Y., R. Ceulemans, J. Guittet. 1999. Biomass yield of poplar after five 2-year coppice rotations. *Forestry* 72(2):157-163.
- Prause, J., C. Fernández. 2007. Litter decomposition and lignin/cellulose and lignin/total nitrogen rates of leaves in four species of the Argentine Subtropical forest. *Agrochimica* 51(6):294-300.
- Prescott, C.E., G.D. Hope, L.L. Blevins. 2004. Effects of gap size on litter decomposition and soil nitrate concentrations in a high-elevation spruce-fir forest. *Can J For. Res.* 33(11):2210-2220.
- Prescott, C.E., L.L. Blevins, C.L. Staley. 2000a. Effects of clearcutting on decomposition rates of litter and humus in forests of British Columbia. *Can. J. For. Res.* 30(11):1751-1757.
- Prescott, C.E., L.M. Zabek, C.L. Staley, R. Kabzems. 2000b. Decomposition of broadleaf and needle litter in forests of British Columbia: influence of litter type, forest type, and litter mixtures. *Can. J. Forest Res.* 30(11):1742-1750.

## R

- Ribeiro, C., M. Madeira, M.C. Araújo. 2002. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes *Forest Ecol. Manag.* 171(1-2):31-41.

- Riemenschneider, D.E., W.E. Berguson, D.I. Dickmann, R.B. Hall, J.G. Isebrands, C.A. Mohn. 2001. Poplar breeding and testing strategies in the north-central US: demonstration of potential yield and consideration of future research needs. *For. Chron.* 77(2):245-253.
- Ritter, E. 2007. Carbon, nitrogen and phosphorus in volcanic soils following afforestation with native birch (*Betula pubescens*) and introduced larch (*Larix sibirica*) in Iceland. *Plant Soil* 295(1-2):239-251.
- Ross, D., K. Tate, N. Scott, C. Feltham. 1999. Land-use change: effects on soil carbon, nitrogen and phosphorus pools and fluxes in three adjacent ecosystems. *Soil Biol. Biochem.* 31(6):803-813.
- Rovira, P., M. Jorba, J. Romanyà. 2010. Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils. *Biol. Fertil. Soils* 46:355-360.
- Rovira, P., R. Vallejo. 2003. Physical protection and biochemical quality of organic matter in Mediterranean calcareous forest soils: a density fractionation approach. *Soil Biol. Biochem.* 35(2):245-261.
- Rubino, M., C. Lubritto, A. D'Onofrio, F. Terrasi, C. Kramer, G. Gleixner, M.F. Cotrufo. 2009. Isotopic evidences for microbiologically mediated and direct C input to soil compounds from three different leaf litters during their decomposition. *Environ. Chem. Lett.* 7(1):85-95.
- Rustad, L.E., C. Cronan. 1988. Element loss and retention during litter decay in a red spruce stand in Maine. *Can. J. For. Res.* 18:947-953.
- Rytter, R.-M. 2012. The potential of willow and poplar plantations as C sinks in Sweden. *Biomass Bioenerg.* 36:86-95.

## S

- Sabatti, M., F. Fabbrini, A. Harfouche, I. Beritognolo, L. Mareschi, M. Carlini, P. Paris, G. Scarascia-Mugnozza. 2014. Evaluation of biomass production potential and heating value of hybrid poplar genotypes in a short-rotation culture in Italy. *Industrial Crops and Products* 61:62-73.

- Salah, Y.M.S., M.C. Scholes. 2011. Effect of temperature and litter quality on decomposition rate of *Pinus patula* needle litter. *Procedia Environmental Sciences* 6:180-193.
- Salehi, A., N. Ghorbanzadeh, M. Salehi. 2013. Soil nutrient status, nutrient return and retranslocation in poplar species and clones in northern Iran. *iForest* 6:336-341.
- Sanaullah, M., A. Chabbi, G. Lemaire, X. Charrier, C. Rumpel. 2010. How does plant leaf senescence of grassland species influence decomposition kinetics and litter compounds dynamics? *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 88(2):159-171.
- Sanderman, J., R. Farquharson, J. Baldock. 2009. *Soil carbon sequestration potential: A review for Australian agriculture*. South Australia: Department of Climate Change and Energy Efficiency (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)). 81 p.
- Santa Regina, I., C. San Miguel, J.F. Gallardo. 1986. Evolución y velocidad de descomposición de la hojarasca en tres bosques en la sierra de Béjar (Salamanca). *Anu. Cent. Edaf. Biol. Apli.* 11:217-231.
- Sardans, J., J. Peñuelas. 2005. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean holm oak forest. *Soil Biol. Biochem.* 37(3):455-461.
- Sariyildiz, T., J.M. Anderson. 2003. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: A laboratory study. *Soil Biol. Biochem.* 35(3):391-399.
- Sartori, F., R. Lal, M.H. Ebinger, J.A. Eaton. 2007. Changes in soil carbon and nutrient pools along a chronosequence of poplar plantations in the Columbia Plateau, Oregon, USA. *Agric. Ecosyst. Environ.* 122(3):325-339.
- Schlesinger, W.H. 2000. *Biogeoquímica: un análisis global*. Barcelona: Ariel Ciencia. 577 p.
- Schlesinger, W.H., M.M. Hasey. 1981. Decomposition of chaparral shrub foliage: losses of organic and inorganic constituents from deciduous and evergreen leaves. *Ecology* 62(3):762-774.
- Schroeder, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforest. Syst.* 27(1):89-97.

- Scowcroft, P.G., D.R. Turner, P.M. Vitousek. 2000. Decomposition of *Metrosideros polymorpha* leaf litter along elevational gradients in Hawai'i. *Global Change Biol.* 6(1):73-85.
- Semwal, R.L., R.K. Maikhuri, K.S. Rao, K.K. Sen, K. G. Saxena. 2003. Leaf litter decomposition and nutrient release patterns of six multipurpose tree species of central Himalaya, India. *Biomass Bioenerg.* 24(1):3-11.
- Shaw, M.R., J. Harte. 2001a. Control of litter decomposition in a subalpine meadow-sagebrush steppe ecotone under climate change. *Ecol. Appl.* 11(4):1206-1223.
- Shaw, M.R., J. Harte. 2001b. Response of nitrogen cycling to stimulated climate change: differential responses along a subalpine ecotone. *Glob. Change Biol.* 7(2):193-210.
- Sierra, M., F.J. Martínez, R. Verde, F.J. Martín, F. Macías. 2013. Soil-C sequestration and soil-C fractions, comparison between poplar plantations and corn crops in south-eastern Spain. *Soil Till. Res.* 130:1-6.
- Singh, P., L.S. Lodhidal. 2009. Biomass and Carbon Allocation in 8-year-old Poplar (*Populus deltoides* Marsh) Plantation in Tarai Agroforestry Systems of Central Himalaya, India. *N. Y. Sci. J.* 2(6):49-53.
- Singh, R.K., R.K. Dutta, M. Agrawal. 2004. Litter decomposition and nutrient release in relation to atmospheric deposition of S and N in a dry tropical region. *Pedobiologia* 48(4):305-311.
- SIOSE. 2005. Proyecto SIOSE. Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Subdirección General de Producción Cartográfica. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. En <http://www.siose.es>
- Sixto, H., J. Rueda, J.L. García-Caballero, J.L. Montoto. 2009a. 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., M.J. Hernández, P. Ciria, J.E. Carrasco, I. Cañellas. 2010. *Manual de cultivo de Populus spp. para la producción de biomasa con fines energéticos.*

Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) y Ministerio de Ciencia e Innovación. 60 p.

- Sixto, H., M.M. Sánchez, J. L. Montoto, I. Cañellas. 2009b. 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.
- Stetter, U., F. Makeschin. 1997. Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik vormals landwirtschaftlich genutzter Böden nach Erstaufforstung mit schnellwachsenden Baumarten. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 85(II):1047-1050.
- Stevens, P.A., M. Hornung, S. Hughes. 1989. Solute concentrations, and major nutrient cycles in a mature Sitka spruce plantation in Beddgelert forest North Wales. *Forest Ecol. Manag.* 27(1):1-20.
- Stevenson, F.J., M.A. Cole. 1999. *Cycles of soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients*. 2<sup>nd</sup> edición. New York: John Wiley & Sons. 448 p.
- Stohlgren, T. J. 1988. Litter dynamics in two sierra mixed conifer forests. II. Nutrient release in decomposing leaf litter. *Can. J. For. Res.* 18(9):1136-1144.
- Strickland, M.S., E. Osburn, C. Lauber, N. Fierer, M.A. Bradford. 2009. Litter quality is in the eye the beholder: initial decomposition rates as a function of inoculum characteristics. *Funct. Ecol.* 23(3):627-636.
- Sundarapandian, S.M., P.S. Swamy. 1999. Litter production and leaf-litter decomposition of selected tree species in tropical forests at Kodayar in the western Ghats, India. *Forest Ecol. Manag.* 123(2-3):231-244.
- Suryawanshi, M.N., A.R. Patel, T.S. Kale, P.R. Patil. 2014. Carbon sequestration potential of tree species in the environment of North Maharashtra University Campus, Jalgaon (MS) India. *Bioscience Discovery* 5(2):175-179.
- Swan, C.M., M.A. Gluth, C.L. Horne. 2009. Leaf litter species evenness influences non-additive breakdown in a headwater stream. *Ecology* 90(6):1650-1658.
- Swarnalatha, B., M.V. Reddy. 2011. Leaf litter breakdown and nutrient release in three tree plantations compared with a natural degraded forest on The Coromandel Coast (Puducherry, India). *Ecotropica* 17(2):39-51.

- Swift, M.J., J.M. Anderson. 1989. Decomposition. En: Lieth H. y M.J.A. Werger (Eds.). *Ecosystems of the world*, 14A. *Tropical rain forest ecosystems: Biogeographical and ecological studies*. New York: Elsevier Science, p.547-569.
- Swift, M.J., O.W. Heal, J.M. Anderson. 1979. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Berkeley: University of California Press. 372 p.

## T

- Tan, Y., J. Chen, L. Yan, J. Huang, L. Wang, S. Chen. 2013. Mass loss and nutrient dynamics during litter decomposition under three mixing treatments in a typical steppe in Inner Mongolia. *Plant Soil* 366(1-2):107-118.
- Taylor, B., D. Parkinson. 1988. Aspen and pine leaf litter decomposition in laboratory microcosm. II. Interactions of temperature and moisture level. *Can. J. Bot.* 66(10):1966-1973.
- Taylor, B.R., D. Parkinson, W.F.J. Parsons. 1989. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology* 70(1):97-104.
- Teklay, T., S.X. Chang. 2008. Temporal changes in soil carbon and nitrogen storage in a hybrid poplar chronosequence in northern Alberta. *Geoderma* 144(3-4):613-619.
- Thompson, L.M., F.R. Troeh. 2002. *Los suelos y su fertilidad*. 4<sup>th</sup> edición. Barcelona: Editorial Reverté S.A. 661 p.
- Tian, G., B.T. Kang, L. Brussaard. 1992. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions: decomposition and nutrient release. *Soil Biol. Biochem.* 24(10):1051-1060.
- Tian, G., L. Brussaard, B.T. Kang. 1995. Breakdown of plant residues with contrasting chemical-compositions under humid tropical conditions: Effects of earthworms and millipedes. *Soil Biol Biochem.* 27(3):277-280.
- Toky, O.P, V. Singh. 1993. Litter dynamics in short-restoration high density tree plantations in an arid region of India. *Agr. Ecosyst. Environ.* 45(1-2):129-145.

- Toky, O.P., P.S. Ramakrishnan. 1983. Secondary succession following slash and burn agriculture in North-Eastern India. I. Biomass, litterfall and productivity. *J. Trop. Ecol.* 71:747-757.
- Tolbert, V.R., D.E. Todd, L.K. Mann, C.M. Jawdy, D.A. Mays, R. Malik. W. Bandaranayake, A. Houston, D. Tyler, D.E. Pettry. 2002. Changes in soil quality and below-ground carbon storage with conversion of traditional agricultural crop lands to bioenergy crop production. *Environ. Pollut.* 116(Suppl.1):S97-S106.
- Trofymow, J.A., T.R. Moore, B. Titus, C. Prescott, I. Morrison, M. Siltanen, S. Smith, J. Fyles, R. Wein, C. Camire, L. Duschene, L. Kozak, M. Kranabetter, S. Visser. 2002. Rates of litter decomposition over 6 years in Canadian forests: influence of litter quality and climate. *Can. J. For. Res.* 32(5):789-804.
- Truax, B., D. Gagnon, J. Fortier, F. Lambert. 2012. Yield in 8 year-old hybrid poplar plantations on abandoned farmland along climatic and soil fertility gradients. *Forest Ecol. Manag.* 267:228-239.
- Truax, B., D. Gagnon, J. Fortier, F. Lambert. 2014. Biomass and volume yield in mature hybrid poplar plantations on temperate abandoned farmland. *Forests* 5:3107-3130.

## V

- Valenzuela-Solano, C., D.M. Crohn. 2006. Are decomposition and N release from organic mulches determined mainly by their chemical composition? *Soil Biol. Biochem.* 38(2):377-384.
- Van Vuuren, M.M.I, F. Berendse, W. De Visser. 1993. Species and site differences in the decomposition of litter and roots from wet heathlands. *Can. J. Bot.* 71:167-173.
- Van Vuuren, M.M.I., L.J Van der Eerden. 1992. Effects of three rates of atmospheric nitrogen deposition enriched with <sup>15</sup>N on litter decomposition in a heathland. *Soil Biol. Biochem.* 24(6):527-532.

- Van Wesemael, B. 1993. Litter decomposition and nutrient distribution in humus profiles in some Mediterranean forests in southern Tuscany. *Forest Ecol. Manag.* 57(1):99-114.
- Vashum, K.T., S. Jayakumar. 2012. Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests -A Review. *J. Ecosyst. Ecogr.* 2(4):doi:10.4172/2157-7625.1000116
- Villela, D.M., J. Proctor. 1999. Litterfall mass, chemistry, and nutrient retranslocation in a monodominant forest on Maraca Island, Roraima, Brazil. *Biotropica* 31(2):198-211.
- Viro, P.J. 1955. *Investigations on forest litter*. Helsinki: Valtioneuvoston Kirjapñ. 65 p.
- Vitousek, P.M., D.R. Turner, W. Parton, R.L. Sanford. 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawai'i: patterns, mechanisms, and models. *Ecology* 75(2):418-429.
- Vivanco, L., A.T. Austin. 2006. Intrinsic effects of species on leaf litter and root decomposition: a comparison of temperate grasses from North and South America. *Oecologia* 150(1):97-107.

## W

- Wardle, D.A. 2002. *Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components*. Monographs in Population Biology, 34. Princeton: Princeton University Press. 402 p.
- Waring, R. H., W.H. Schlesinger. 1985. *Forest ecosystems: concepts and management*. New York: Academia Press. 340 p.
- Wetih, M. 2004. Intensive short rotation forestry in boreal climates: present and future prespectives. *Can. J. Forest Res.* 34(7):1369-1378.
- Wilson, K.B., D.D. Baldocchi, P.J. Hanson. 2000. Spatial and seasonal variability of photosynthetic parameters and their relationship to leaf nitrogen in a deciduous forest. *Tree Physiol.* 20(9):565-578.

- Witkamp, M. 1966. Rate of carbon dioxide evolution from the forest floor. *Ecology* 47(3):492-494.
- Wolf, B., G. Snyder. 2003. *Sustainable soils; the place of organic matter in sustainable soils and their productivity*. New York: Food Products Press. 352 p.

## X

- Xuluc-Tolosa, F.J., H.F.M. Vester, N. Ramírez–Marcial, J. Castellanos–Albores, D. Lawrence. 2003. Leaf litter decomposition of tree species in three sucesional phases of tropical dry secondary forest in Campeche, Mexico. *Forest Ecol. Manag.* 174(1-3):401-412.

## Y

- Yadava, A.K. 2010. Carbon Sequestration: underexploited environmental benefits of Tarai agroforestry Systems. *Report and Opinion* 2(11):35-41.
- Yamashita, T., H. Takeda. 1998. Decomposition and nutrient dynamics of leaf litter in litter bags of two mesh size set in two dipterocarp forest sites in Peninsular Malaysia. *Pedobiologia* 42(1):11-21.
- Yang, Y.S., J.F. Guo, G.S. Chen, J.S. Xieb, L.P. Cai, P. Lin. 2004. Litterfall, nutrient return, and leaf-litter decomposition in four plantations compared with a natural forest in subtropical China. *Ann. Forest Sci.* 61(5):465-476.
- Yao, Z., Z. Zhou, X. Zheng, B. Xie, B. Mei, R. Wang, K. Butterbech-Bahl, J. Zhu. 2010. Effects of organic matter incorporation on nitrous oxide emissions from rice-wheat rotation ecosystems in China. *Plant Soil* 327(1):315-330.
- You, Y-H., J. Namgung, Y-Y. Lee, J-H. Kim, J-Y. Leen, H-T. Mun. 2000. Mass loss and nutrients dynamics during the litter decomposition in Kwangnung experimental forest. *Jour. Kor. For. Soc.* 89:41-48.

## Z

- Zeng, D.-H., R. Mao, S.X. Chang, L.-J. Li, D. Yang. 2010. C mineralization of tree leaf litter and crop residues from poplar-based agroforestry systems in Northeast China: A laboratory study. *Appl. Soil Ecol.* 44(2):133-137.
- Zhang X., X. Meng, J. Fan, L. Gao, X. Sun. 2011. Soil total organic carbon,  $\delta^{13}\text{C}$  values and their responses to the soil core transferring experiment from high- to low-elevation forest along natural altitudinal transect of old temperate volcanic forest soils. *Procedia Environ. Sci.* 5:139-144.
- Zhang, D., D. Hui, Y. Luo, and G. Zhou. 2008. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *J. Plant Ecol.* 1(2):85-93.
- Zhang, W., S. Wang. 2012. Effects of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  on litter and soil organic carbon decomposition in a Chinese fir plantation forest in South China. *Soil Biol. Biochem.* 47:116-122.
- Zhao, L., Y.-L. Hu, G.-G. Lin, Y.-C. Gao, Y.-T Fang., D.-H. Zeng. 2013. Mixing effects of understory plant litter on decomposition and nutrient release of tree litter in two plantations in Northeast China. *Plos One* 8(10):1-8.
- Zhao, Q., D.H. Zeng, D.K. Lee, X.Y. He, Z.P. Fan, Y.H. Jin. 2007. Effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* afforestation on soil phosphorus status of the Keerqin Sandy Lands in China. *J. Arid Environ.* 69(4):569-582.
- Zhi-Gao, S., L. Jing-Shuang. 2007. Development in study of wetland litter decomposition and its responses to global change. *Acta ecologica Sinica* 27(4):1606-1618.
- Zimmermann, S., S. Braun, M. Conedera, P. Blaser. 2002. Macronutrient inputs by litterfall as opposed to atmospheric deposition into two contrasting chestnut forest stands in southern Switzerland. *Forest Ecol. Manag.* 161(1-3):289-302.