



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-201

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Sistemas Agroforestales para la adaptación al cambio climático: cereales de invierno con nogal híbrido.

ARENAS-CORRALIZA, M.G.¹, LÓPEZ-DÍAZ, M.L.¹ y MORENO, G.¹

¹ INDEHESA. Grupo de Investigación Forestal, Universidad de Extremadura, Plasencia 10600.

Resumen

Una de las consecuencias previsibles del cambio climático es la reducción del rendimiento de los cultivos. En los últimos años se ha señalado la oportunidad de los sistemas agroforestales como estrategia de mitigación y adaptación al cambio climático, por su mayor eficiencia en el uso de los recursos. En este ensayo se estudiaron las interacciones de competencia y facilitación en un sistema agroforestal de nogal híbrido (*Juglans x intermedia* Mj209xRa) con cereales de invierno durante los años 2013/14 y 2014/15, comparando el sistema agroforestal con los respectivos control de cultivo y de arbolado. Las especies de cereal fueron trigo harinero (*Triticum aestivum* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.) y triticale (*X Triticosecale* Wittm.) con distintas variedades. El objetivo último fue seleccionar aquellas variedades con mejor respuesta a la presencia del arbolado (sombra y competencia por agua y nutrientes), a la vez que los nogales se beneficien de las prácticas agronómicas. Se estudiaron la producción de biomasa, el rendimiento en grano y el incremento del diámetro del arbolado. La climatología condicionó la producción en los cereales, siendo el segundo año, con mejor distribución de las precipitaciones, el de mayor rendimiento en grano. El sistema agroforestal fue beneficioso para la producción de biomasa de cereal, resultando perjudicial en el incremento diametral del arbolado. El sistema nogal-cebada presentó unos prometedores resultados en cuanto a las características productivas de la cebada, que se comportó de forma más favorable y estable que en monocultivo.

Palabras clave

Nogal híbrido, cereal de invierno, intensificación ecológica, cultivo intercalar.

1. Introducción

A lo largo de la segunda mitad del siglo XX la población mundial creció de forma paralela al aumento del rendimiento de los cultivos, posibilitado por la mejora de las técnicas agronómicas, el uso de fertilizantes, energías y pesticidas y la selección y mejora genética (FAO, 1996). Estos avances, conocidos como “revolución verde”, permitieron multiplicar el rendimiento de los cultivos por unidad de suelo cultivado. Sin embargo, en los últimos años se ha producido un estancamiento en los rendimientos, pudiendo incluso disminuir como consecuencia del cambio climático y la recurrencia creciente de eventos climatológicos extremos (olas de calor, largas sequías...) (BRISSON et al., 2010; RAY et al., 2012), lo que conlleva la necesidad de búsqueda de nuevas tierras agrícolas (HERNÁNDEZ, 2005).

En los países en desarrollo, sólo el 20% del incremento de la producción procederá de nuevas tierras cultivables, mientras que el 80% deberá conseguirse con el aumento del rendimiento e intensidad de los cultivos (FAO, 2009). Por esta razón, se han realizado numerosos llamamientos y propuestas para avanzar en la intensificación ecológica, que persigue aumentar el rendimiento de la tierra a través de un mejor aprovechamiento de los recursos propios de la misma (CASSMAN, 1999; DORÉ et al., 2011; BOMMARCO et al., 2013). Entre estas propuestas se encuentran los sistemas agroforestales o silvoagrícolas (CARSAN et al., 2014; TITTONELL, 2014) que combinan en un mismo territorio estratos arbóreo y/o herbáceo o arbustivo, originando una serie de interacciones de competencia y/o facilitación, que manejadas correctamente pueden aumentar la producción del sistema (MORENO et al., 2013).

El papel de la silvoagricultura ha sido recogido en la estrategia europea del cambio climático (EU, 2014), la estrategia forestal europea (EU, 2013) y en el último informe (Quinto informe) del IPCC (2015), como mecanismo de adaptación y en la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero. Los sistemas agroforestales muestran mayor capacidad de secuestro de carbono que los monocultivos, por la contribución adicional del arbolado al C fijado en la biomasa y en el suelo (LORENZ y LAL, 2014), contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. Por otro lado, el carbono adicional fijado en el suelo aumenta la capacidad de retención de agua en el suelo, y la sombra del arbolado reduce la pérdida de agua por transpiración del cultivo, aumentando de esta forma la eficiencia del sistema en el uso del agua, factor clave en la adaptación al cambio climático (VERCHOT. et al., 2007, SCHOENEGER et al., 2012, FAO, 2013; LASCO et al., 2014).

El material vegetal más utilizado en España para la producción de madera de calidad está compuesto por distintas especies del género *Juglans*, como *J. nigra* L. y *J. regia* L., pero actualmente son más utilizados los híbridos entre especies de nogal negro (*J. nigra* L., *J. major* Torr. y *J. hindsii* Jeps., entre las más comunes). En concreto, las progenies híbridas *Juglans x intermedia* Mj209xRa y *Juglans x intermedia* Ng23xRa, cuyos turnos oscilan entre 25 y 30 años, son las más utilizadas (ALETÁ y VILANOVA, 2011). Ambas presentan buenas características forestales y resistencia a agentes nocivos, facilitando su gestión (COELLO et al., 2009). El nogal híbrido de origen francés *Juglans x intermedia* Mj209xRa procede de la polinización de la variedad *Juglans major* Torr. Var. 209 (Mj209) con polen de *Juglans regia* L. (Ra). No se sabe con seguridad a qué especie pertenece el progenitor femenino (Mj209), que aunque inicialmente se consideró *J. nigra* L., posteriormente se clasificó como *J. major* Torr. y en la actualidad se cree que podría ser en sí mismo un híbrido con capacidad reproductora. Este híbrido destaca por su crecimiento elevado (vigor híbrido) y su escasa producción de fruto. Presenta una gran capacidad de adaptación a distintos tipos de suelos y áreas cálidas de la Península Ibérica, siendo su brotación de tipo medio, posterior al 15 de abril (ALETÁ Y VILANOVA, 2006).

En España, en el año 2000, las importaciones de madera para aserradero procedente de especies no coníferas eran más de 15 veces superiores a las exportaciones. Actualmente, a pesar de la caída experimentada en las importaciones como consecuencia de la crisis económica, estas siguen siendo el triple respecto a las exportaciones (EUROSTAT, 2016). Este hecho evidencia la importancia del sector de transformación de la madera en España, que no es equiparable a la de la superficie de plantación. De hecho, el Libro Blanco de la Agricultura y el Desarrollo Rural (MAPYA, 2003) ya indicaba la necesidad de emprender líneas de investigación para la implantación de sistemas de cultivo asociado que permitan altas producciones simultáneas de cultivos herbáceos y leñosos. Las elevadas exigencias ecológicas de las especies utilizadas en calidades de estación y disponibilidad de recursos hídricos (ya sean de procedencia edáfica o mediante riego) han provocado que, en los últimos años, en España se establezcan plantaciones en terrenos aluviales de regadío (GARCÍA et al., 2010).

Experiencias realizadas en un sistema agroforestal de trigo duro (*Triticum durum* L.) con nogal híbrido (*Juglans x intermedia* Ng23xRa) demostraron que el arbolado captó parte del nitrógeno residual lavado por debajo de la zona ocupada por el sistema radicular del trigo, mostrando que el nogal híbrido tiene plasticidad radicular para extender sus raíces en una zona no ocupada por las del cultivo herbáceo (ANDRIANARISOA et al., 2015) y que éstas pueden ser modificadas tanto vertical como horizontalmente por la presencia del cultivo, desarrollando sistemas radiculares más profundos que en plantaciones puras (CARDINAEL et al., 2015). Así mismo, en un sistema agroforestal de nogal (*Juglans nigra* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.) el nogal experimentaba un cambio en las zonas de absorción de agua a lo largo de su ciclo vegetativo, realizando una mayor absorción en capas profundas en la segunda mitad de su ciclo que en la primera, mostrando la plasticidad de éste para adaptarse a la competencia por los recursos hídricos (LINK et al., 2015).

2. Objetivos

El ensayo se enmarcó dentro del proyecto europeo AGFORWARD que tiene como finalidad conocer mejor los sistemas agroforestales europeos e impulsar su desarrollo a través de propuestas de innovación y del reconocimiento social de sus productos y servicios ambientales. El objetivo general de este ensayo es estudiar el funcionamiento y rendimiento del sistema de cultivo intercalar cereal-nogal bajo clima mediterráneo como posible herramienta de adaptación y mitigación del cambio climático. Además se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar la producción de biomasa y grano de diferentes variedades de tres especies de cereal de invierno (trigo harinero, cebada y triticale) en monocultivo y en asociación con nogal híbrido (sistema agroforestal).
- Comparar el crecimiento diametral del arbolado (nogal híbrido para producción de madera de calidad) con o sin cultivo intercalar.
- Analizar la posible competencia o facilitación entre ambos estratos vegetales.

3. Metodología

El ensayo de campo se llevó a cabo en los años agrícolas 2013/14 y 2014/15, en el término municipal de El Carpio de Tajo (Toledo), a una altitud de 411 metros sobre el nivel del mar. Las coordenadas UTM del centro de la parcela, con elipsoide de referencia ETRS 89, son X = 374.444 m; Y = 4.411.877 m (Huso 30 zona N), perteneciente a la empresa Bosques Naturales S.A., cuyas plantaciones de madera de calidad están en régimen de cultivo intensivo. Dichas plantaciones cuentan con la certificación forestal FSC (*Forest Stewardship Council*). La temperatura media anual es de 15,24 °C, siendo la precipitación media anual 439,01 mm. El suelo de la parcela es un Fluvisol, con una profundidad superior a 1,40 m y de textura franco-arcillo-arenosa, con pH 6, que hace posible el cultivo de las especies utilizadas en el estudio.

El ensayo incluye 3 tratamientos, agroforestal (cultivo de cereal intercalado entre nogales; Figura 1), y los respectivos testigos de cultivo (sin árboles) y forestal (nogales sin cultivo intercalar). Para el tratamiento agroforestal se cultivaron 5 parcelas de 80 m² (20 m de largo x 4 m de calle, que incluye 5 árboles en la línea) por variedad de cereal. Así mismo, se establecieron 4 parcelas de 2x2 m por variedad de cereal sin arbolado como testigo de la producción del cereal, dejando pasillos de 0,5 m de ancho entre ellas. Como control forestal se utilizaron 3 parcelas de arbolado sin siembra de cereal (45 árboles cada parcela). La localización de las parcelas varió entre los 2 años de ensayo.



Figura 1. Sistema agroforestal de nogal híbrido con cereales de invierno en la parcela de ensayo.

El arbolado estaba constituido por ejemplares del clon *Nat7* de nogal híbrido *Juglans x intermedia* Mj209xRa plantados en 2007, por lo que en los años de ensayo 2013-14 y 2014-2015 los árboles tenían 7 y 8 años de edad respectivamente y una altura variable entre 10-11 m el primer año y 11-12 m el segundo. El diámetro medio el primer año de ensayo fue de 15,30 cm en enero de 2013 y 15,92 en enero de 2014. El segundo, el diámetro medio fue de 16,27 cm en enero de 2014 y de 17,04 cm en enero de 2015. La densidad del arbolado fue de 333 pies ha⁻¹ (marco rectangular 6 x 5 m). Las líneas de plantación poseían riego por goteo con portagoteros a ambos lados. La siembra se realizó a voleo de forma manual a principios de noviembre de cada año y las especies de cereales de invierno que se utilizaron fueron trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) y triticale (*X Triticosecale* Wittm.) sembrados a una dosis de siembra de 220 kg ha⁻¹ y cebada (*Hordeum vulgare* L.) a dosis de siembra de 180 kg ha⁻¹. Las variedades escogidas fueron de ciclo medio-precoc en el caso del trigo (variedades Kilopondio y Bologna el primer año de estudio e Ingenio, Sublim y Nogal el segundo) y de ciclo precoc-muy precoc en el caso de la cebada (variedades Azara y Doña Pepa el primer año de estudio y Basic, Lukhas, Hispanic y Dulcinea el segundo año). La variedad de triticale utilizada el segundo año de estudio fue Verato.

Las muestras de cereal se recogieron en junio de 2014 y 2015, cosechándolas a ras de suelo en cuadrados de 50 x 50 cm, tomando 4 muestras por parcela en la parte central. El crecimiento del arbolado en grosor se determinó mediante el incremento que experimentó el diámetro normal, a 1,30 m del suelo, en el plazo de un año. En época de parada vegetativa (enero) se midieron los perímetros de los árboles, repitiendo la medición un año después. A partir de estos datos se calcularon los incrementos de diámetro observados para cada árbol.

4. Resultados

4.1. Rendimiento de los cereales

La biomasa producida fue mayor en el sistema agroforestal que en las parcelas de control ambos años de estudio y para todas las especies de cereal, siendo el aumento significativo en las variedades de cebada Azara ($p < 0,05$) el primer año e Hispanic ($p < 0,001$) el segundo año (Tabla 1, Figura 2).

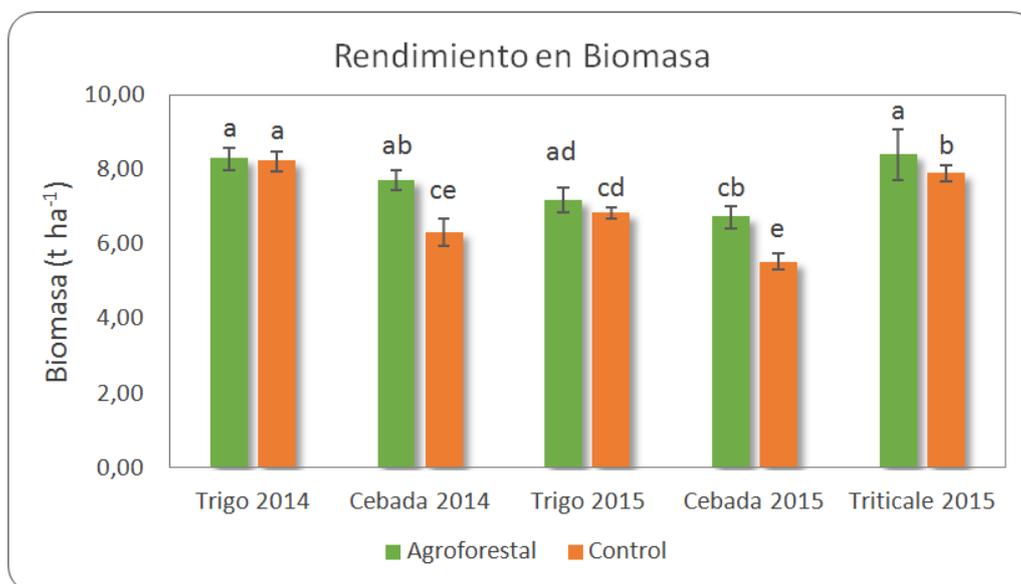


Figura 2. Rendimiento en biomasa (t ha⁻¹) de trigo, cebada y triticale en los distintos sistemas de producción (agroforestal y control) y años de estudio. Letras diferentes representan la existencia de diferencias significativas (LSD $p < 0,05$).

La producción de grano presentó marcadas diferencias entre variedades, especies, sistemas de producción y años. En ambos años la cebada aumentó su rendimiento en grano en el sistema agroforestal (Figura 3), especialmente los cultivares Azara y Doña Pepa el primer año ($p < 0,05$) y Basic el segundo año ($p < 0,05$) (Tabla 1). En el caso del trigo el sistema agroforestal no resultó significativo el primer año respecto al control, siendo el segundo año significativamente inferior la producción en el sistema agroforestal, especialmente en los cultivares Sublim ($p < 0,001$) y Nogal ($p < 0,001$) (Tabla 1, Figura 3). En el caso del triticale, en el único año estudiado su producción fue significativamente menor en el sistema agroforestal ($p < 0,01$).

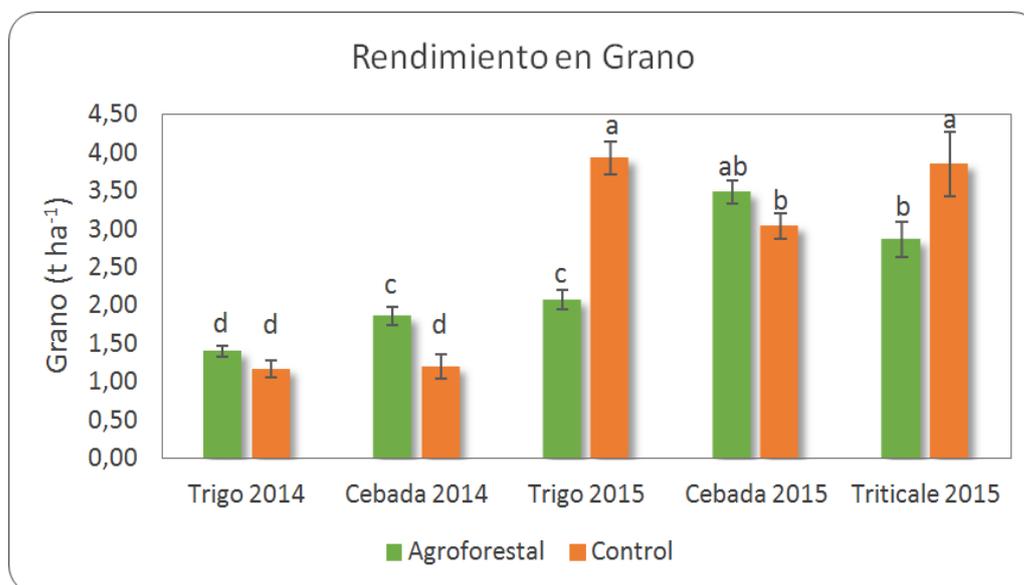


Figura 3. Rendimiento en grano ($t\ ha^{-1}$) de trigo, cebada y triticale en los distintos sistemas de producción (agroforestal y control) y años de estudio. Letras diferentes representan la existencia de diferencias significativas (LSD $p < 0,05$).

Tabla 1. Rendimiento en biomasa ($t\ ha^{-1} \pm E.S.$) y grano ($t\ ha^{-1}$) en tratamientos agroforestal y control de las especies y variedades de cereal utilizadas en el ensayo. Nivel de significación (t-test): * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Año	Especies	Variedades	Biomasa ($t\ ha^{-1}$)		Grano ($t\ ha^{-1}$)	
			Agroforestal	Control	Agroforestal	Control
2014	Cebada	Azara	7.60±0.37	6.14±0.49 *	1.77±0.18	1.09±0.11 *
	Cebada	Doña Pepa	7.83±0.41	6.50±0.57	1.94±0.15	1.30±0.30 *
	Trigo	Kilopondio	8.43±0.39	7.92±0.29	1.33±0.08	1.20±0.19
	Trigo	Bologna	8.14±0.44	8.53±0.43	1.46±0.12	1.13±0.12
2015	Cebada	Basic	6.12±0.50	5.35±0.36	3.22±0.27	2.29±0.37*
	Cebada	Lukhas	7.57±0.78	7.38±0.58	3.91±0.44	3.31±0.43
	Cebada	Hispanic	7.24±0.53	4.79±0.12 ***	3.68±0.25	3.24±0.22
	Cebada	Dulcinea	5.96±0.39	5.25±0.25	3.08±0.17	3.19±0.28
	Trigo	Ingenio	6.97±0.67	6.19±0.16	2.06±0.25	2.58±0.26
	Trigo	Sublim	7.70±0.55	7.55±0.25	2.36±0.26	5.25±0.20 ***
	Trigo	Nogal	6.90±0.45	6.27±0.20	1.81±0.17	2.94±0.21 ***
	Triticale	Verato	8.41±0.68	7.89±0.22	2.86±0.24	3.85±0.43 *

4.2. Crecimiento del arbolado

En el incremento de diámetro normal del arbolado hubo diferencias significativas entre los tratamientos agroforestal y forestal en ambos años de estudio, sobre todo en el primer año (Figura 4).

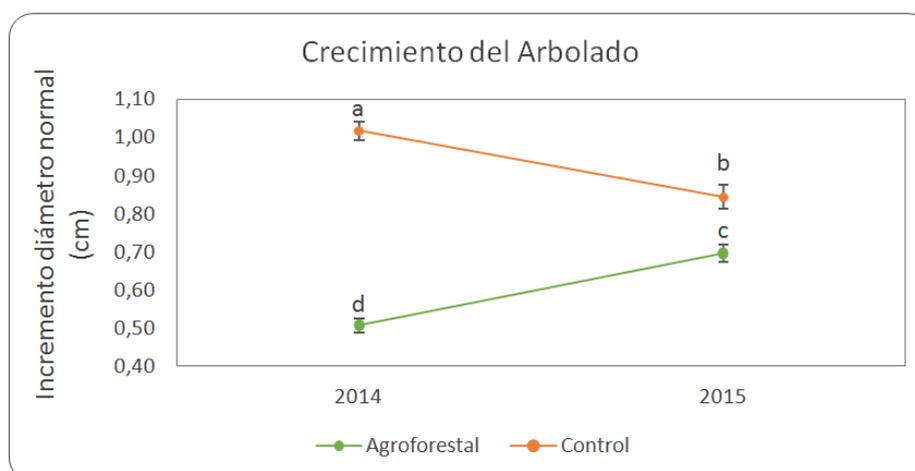


Figura 4. Incremento de diámetro normal (cm) del arbolado en los distintos sistemas de producción (agroforestal y control) y años de estudio. Letras diferentes representan la existencia de diferencias significativas a $p < 0,05$ de acuerdo con la LSD.

4.3. Condiciones climatológicas

Las precipitaciones anuales (Figura 5) de los dos años de estudio (2013/14 y 2014/15), con 387 mm y 284 mm, respectivamente, fueron inferiores a la media del período 1999-2013 (442 mm). Sin embargo se observa que el reparto de las mismas presentó marcadas diferencias entre los dos años y con la media de los años anteriores. Las precipitaciones otoñales fueron similares, siendo ligeramente inferiores el primer año de ensayo (103,6 mm) respecto al segundo (152,3 mm) y la media (153,7 mm). En invierno se observaron diferencias muy importantes, teniendo el primer año de ensayo casi un 60% más de precipitaciones (229 mm) que la media (144,1 mm) y el segundo año un 70% menos (42,1 mm) que ésta. Por otra parte, la cantidad y el reparto de las precipitaciones primaverales fue mayor en la media (118,2 mm) que en el primer y segundo año (54,1 mm y 79,2 mm respectivamente).

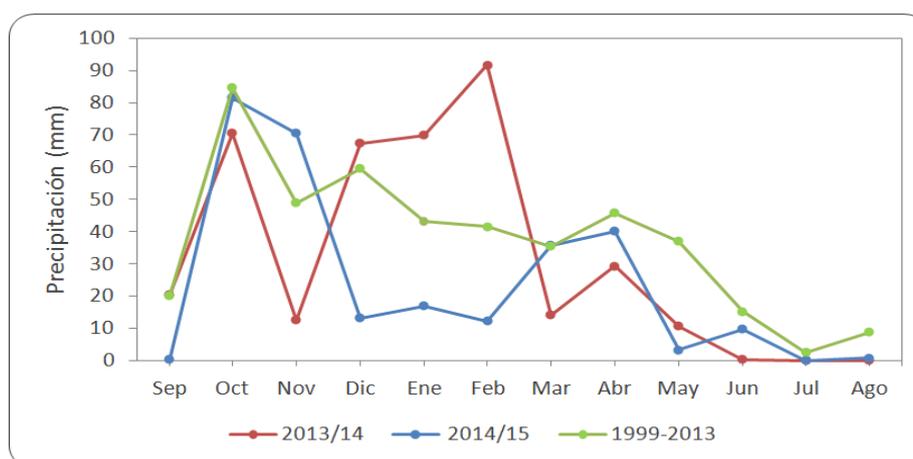


Figura 5. Precipitación mensual (mm) de los períodos de estudio 2013/14 y 2014/15 y valor medio del período 1999-2013. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos del Servicio de Asesoramiento al Regante de Castilla - La Mancha (SIAR) en la Estación Vegas de San Antonio (La Pueblanueva).

En cuanto a las temperaturas medias (Figura 6), el segundo año (2014-15) presentó un invierno más frío que el primero (2013-14). Otro hecho destacable es el prolongado periodo con altas temperaturas que se registraron en abril del primer año (Figura 6 inserta).

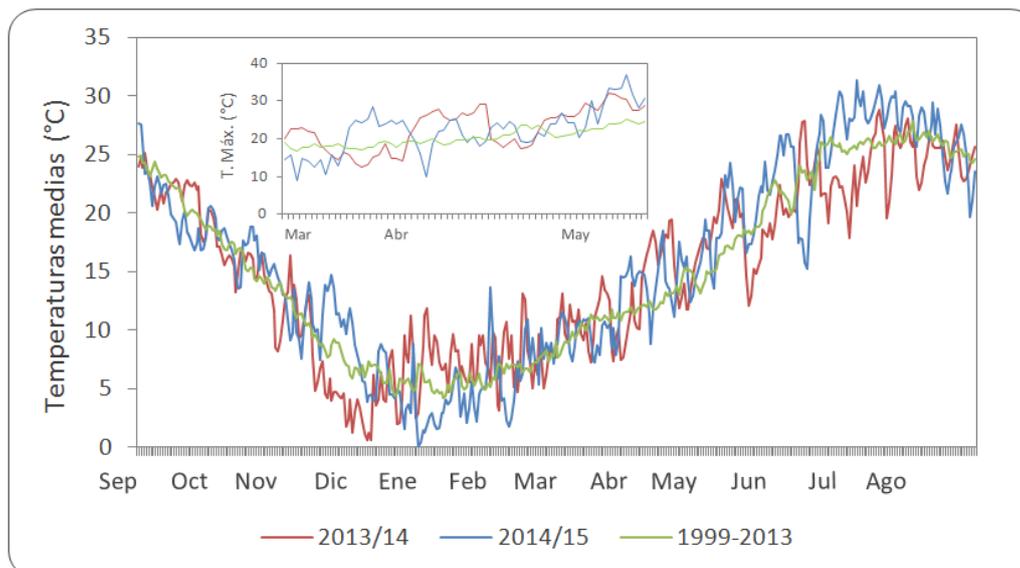


Figura 6. Temperaturas medias diarias (°C) durante los periodos de estudio 2013/14 y 2014/15 y valor medio del periodo 1999-2013. En Figura inserta Temperaturas máximas diarias (°C) durante el mes de abril en los mismos periodos de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos del SIAR en la Estación Vegas de San Antonio (La Pueblanueva).

5. Discusión

5.1. Rendimiento en biomasa de los cereales

El segundo año de estudio, la producción media de biomasa de trigo y cebada fue de 6,56 t ha⁻¹, significativamente menor que la del primer año, con 7,65 t ha⁻¹. La biomasa se forma, en su mayoría, en la primera parte del ciclo vegetativo, cuando el agua no es tan limitante, mientras que la producción de grano se determina en gran medida por la biomasa asimilada en la última parte del ciclo (ASSENG y SAVIN, 2012). Por otro lado, el estrés hídrico durante el ahijado reduce el número de hijos (PASSIOURA & ANGUS, 2010). En este sentido, en el primer año de estudio se produjeron mayores precipitaciones invernales (228,1 mm) que en el segundo (42,1 mm), que fue muy seco (Figura 5). Así mismo, el primer año las temperaturas medias en enero y febrero fueron de 8-10 °C, superiores a las del segundo año, que estuvieron en torno a los 5 °C (Figura 6). Estas circunstancias pudieron determinar que la producción de biomasa fuera un 15% inferior el segundo año.

El sistema agroforestal produjo, en conjunto, significativamente mayor biomasa que el control. Se sabe que el árbol tiene un efecto amortiguador sobre las temperaturas máximas y mínimas en ambientes mediterráneos (GEA-IZQUIERDO et al., 2009; PARDINI et al., 2010; DE MIGUEL et al., 2013), pudiendo acercarlas a las óptimas para su desarrollo vegetativo en la primera fase de cultivo de los cereales, cuando la planta elabora $\frac{3}{4}$ partes de su materia seca total entre el ahijado y la floración (GUERRERO, 1999). Además, el arbolado mejora las condiciones edafoclimáticas del cultivo (JOSE et al., 2004). En el primer año el invierno fue muy lluvioso (Figura 4) produciendo más biomasa tanto en trigo como en cebada.

El arbolado juega un papel fundamentalmente positivo antes de su brotación (mejora edafoclimática), que puede tornarse negativo tras su brotación (competencia por luz y en su caso por

agua/nutrientes), por lo que resulta más positivo para las especies/variedades precoces. La cebada, por su desarrollo temprano (LÓPEZ-BELLIDO, 1991), se vio favorecida por la presencia del arbolado.

5.1.2. Rendimiento en grano de los cereales

El segundo año el trigo y la cebada presentaron estadísticamente mayor rendimiento en grano que el primero (47 % más), estando las producciones de ambos años dentro del rango habitual mediterráneo (1 a 3 t ha⁻¹) (ASSENG y SAVIN, 2012). Esta diferencia puede explicarse por las precipitaciones, ya que aunque fueron inferiores las acaecidas el segundo año (284 mm frente a 387 mm del primero) estuvieron mejor repartidas, concentrándose en otoño y primavera (Figura 5), favoreciendo la producción de grano (OSCA, 2007).

El sistema agroforestal nogal-cereal se comportó comparativamente respecto al control mejor el primer año que el segundo, tanto para cebada como para trigo. El segundo año fue más seco, especialmente por las escasas precipitaciones invernales, ejerciendo el arbolado una mayor competencia por el agua al ser menor la humedad en las capas más profundas. Por otro lado el primer año existió un largo periodo de altas temperaturas (máximas diarias > 25 °C) en el mes de abril, cuando se produce la floración y formación de grano del cereal. Algunos autores (SAVIN, 1990; CALDERINI et al., 2001; UGARTE, 2007) entre otros autores han demostrado la importancia de la temperatura en fases claves para la formación del grano (desde espigado hasta polinización). ROMERO y GERMÁN (2001) señalan que por encima de 25°C la traslocación de los carbohidratos disponibles hacia al grano se ve dificultada. La *ola de calor* primaveral del primer año coincidió con la brotación del nogal, por lo que el cereal bajo arbolado se pudo beneficiar de la sombra parcial ejercida por las hojas del árbol. En cambio el segundo año no se alcanzaron temperaturas tan altas en ese periodo, por lo que el efecto positivo de la sombra parcial no fue tan evidente.

El trigo tiene un ciclo más tardío que la cebada y el llenado del grano lo realiza cuando la hoja del nogal está plenamente desarrollada (mes de mayo), Se sabe que el trigo es planta de plena luz (GUERRERO, 1999), por lo que la interceptación de la radiación solar por parte del arbolado, junto con la competencia por agua en una fase de gran demanda por ambos estratos, justifican el efecto negativo del arbolado en el rendimiento de grano, especialmente el segundo año, que fue más seco. Este rendimiento menor de grano ocurrió a pesar de que en la fase vegetativa el arbolado no había manifestado ningún efecto negativo. HOFFMAN y VIEGA (2011) encontraron que la producción de grano de trigo harinero variedad Nogal presentó mayor producción en condiciones de humedad superiores a las óptimas habituales en el trigo. En nuestro ensayo la variedad Nogal produjo significativamente menos grano en el cultivo intercalar del segundo año. Este resultado indica la importancia de la competencia por el agua entre estratos en las condiciones de clima mediterráneo, donde los años secos son frecuentes. Se han observado resultados similares respecto a la reducción de la producción de grano de trigo duro (*Triticum durum* L.) en sistema agroforestal con nogal híbrido *Juglans x intermedia* Ng23xRa (DUFOR et al., 2013) y de grano de trigo harinero con *Juglans regia* L. (HE et al., 2012).

Por otra parte, la cebada, además de ser más precoz, presenta una maduración rápida y un período corto de llenado del grano en comparación con el trigo (COSSANI et al., 2009). Por ello cuando el nogal acaba de desarrollar sus hojas, la cebada se encuentra en un estado más avanzado en su proceso de llenado de grano que el trigo, sufriendo así menos competencia con el árbol. Además, el ángulo de inclinación de las hojas y estructura del follaje le permite una mayor interceptación de la radiación solar (MUURINEN & PELTONEN-SAINIO, 2006), por lo que podría ser menos sensible al sombreado del árbol. Además, la cebada responde mejor al estrés por sequía que el trigo (SETTER & WATERS, 2003; HOFFMAN y VIEGA, 2011). Las aristas de la espiga incrementan el intercambio de calor sensible y disminuyen la evapotranspiración, haciendo que tolere mejor la sequía en la etapa de maduración. Por todo ello parece que la cebada podría beneficiarse más tiempo de los efectos positivos del árbol (espigado, floración y formación de grano) y verse menos

afectada por el efecto competitivo con el árbol (fases de llenado y maduración de grano). Por tanto, la cebada se beneficia más que el trigo de la combinación con el arbolado, aumentando y estabilizando su producción en un contexto de cambio climático, donde se espera una reducción del rendimiento de los cereales, principalmente en climas templados, por el estrés térmico y sequías primaverales (BRISSON et al., 2010).

5.2. Crecimiento del arbolado

En ambos años de estudio el incremento de diámetro fue significativamente mayor en el control que en el sistema agroforestal. Las necesidades hídricas del nogal son elevadas, necesitando un mínimo de 700 mm de precipitación anual, llegando a los 1000-1200 mm en plantación intensiva (LUNA, 1979). En la zona de estudio, con una precipitación anual media de 437 mm, se recurre durante el verano al riego para conseguir un desarrollo normal. Se ha observado que el crecimiento del tronco en nogales sin riego es significativamente menor que el de aquellos regados (MARTIN et al., 1980) y que una mayor dosis de riego provoca un mayor crecimiento en diámetro (LUI et al., 2005).

El agua disponible durante la primera mitad del verano es de gran importancia para el crecimiento de las ramas y del tronco (FERREYRA et al., 2001). En este sentido, se puede afirmar que la competencia por agua del nogal con los cereales empieza en el invierno, puesto que aunque el nogal no brote hasta finales abril, los cereales de invierno consumen parte del agua del suelo procedente de las precipitaciones invernales. Más tarde, dicha competencia coincide en el tiempo durante la primavera hasta la maduración de los cereales. Estas competencias redujeron el crecimiento del tronco en el sistema agroforestal en ambos años, similar a lo reportado por ZHANG et al. (2015) en un sistema agroforestal de *Juglans regia* L. y trigo harinero.

El primer año, más húmedo, el arbolado del tratamiento control creció más en diámetro que en el segundo año. Sin embargo para los árboles con cultivo intercalar el resultado fue el contrario, con menor crecimiento el primer año. Este resultado aparentemente contradictorio puede explicarse por el hecho de que el primer año el cereal ejerció mayor competencia hacia el arbolado que el segundo año. De hecho el primer año la producción de biomasa del cereal fue mayor que el segundo año, lo que conlleva también un mayor consumo de agua y nutrientes de suelo.

6. Conclusiones

Las combinaciones de cereales de ciclo corto con nogales de brotación tardía pueden incrementar el rendimiento del cereal respecto a los monocultivos, como se ha observado en la cebada. No obstante, existe una reducción en el incremento del diámetro del arbolado con cereal asociado. Las facilitaciones generadas en el sistema agroforestal dependen de las variedades de los cereales, tradicionalmente seleccionadas para condiciones de plena luz. Este trabajo se ha desarrollado en dos años agrícolas con características climatológicas muy diferentes, por lo que para extraer conclusiones es necesario seguir estudiando las interacciones generadas entre el arbolado y los cereales durante un mayor período de tiempo. Nuestros resultados sugieren que los programas de selección de cereales adaptados a sombra parcial podrían ser una estrategia de adaptación al cambio climático, en la medida en que el árbol puede estabilizar las producciones interanuales, al amortiguar los efectos de eventos climatológicos extremos. Aunque para avanzar en esta estrategia es fundamental estudiar tanto las variedades de cereal, presumiblemente mejor las más precoces, como al material vegetal de nogal, preferentemente el más tardío en brotación.

7. Agradecimientos

El trabajo se enmarca en el proyecto *AGFORWARD: AGroFORestry that Will Advance Rural Development*, financiado por la Unión Europea en el 7º Programa Marco (Referencia KBBE-CALL-7-

613520). Los autores agradecen la colaboración de la empresa Bosques Naturales S.A., por ceder la plantación de nogal híbrido. La primera autora también quiere agradecer al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte el soporte económico recibido a través del Programa Nacional de Formación de Profesorado Universitario (FPU).

8. Bibliografía

- ALETÀ, N.; VILANOVA, A.; 2006. El nogal híbrido. *Navarra Forestal* 13: 18-21.
- ALETÀ, N.; VILANOVA, A.; 2011. Evaluación del crecimiento y la producción de nogal. *Navarra Forestal* 28: 11-16.
- ANDRIANARISOA, K.S.; DUFOUR, L.; BIENAIMÉ, S.; ZELLER, B.; DUPRAZ, C.; 2015. The introduction of hybrid walnut trees (*Juglans nigra x regia* cv. Ng23) into cropland reduces soil mineral N content in autumn in southern France. *Agrofor. Syst.* 90: 193-205.
- ASSENG, S.; SAVIN, R.; 2012. Cultivos herbáceos. En: STEDUTO, P.; HSIAO, T.H., FERERES, E., RAES, D. (eds.): Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua: 94–148. FAO. Roma.
- BOMMARCO, D.V.; KLEIJN, D.; POTTS, S.G.; 2013. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends Ecol. Evol.* 28: 230-238.
- BRISSON, N.; GATE, P.; GOUSCHE, D.; CHARMET, G.; OURY, F.X.; HUARD, F.; 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *F. Crop. Res.* 119: 201–212.
- CALDERINI, D.F.; SAVIN, R.; ABELEDO, L.G.; REYNOLDS, M.P.; SLAFER, G.A.; 2001. The importance of the immediately preceding anthesis period for grain weight determination in wheat. *Euphytica* 119: 199–204.
- CARDINAEL, R.; MAO, Z.; PRIETO, I.; STOKES, A.; DUPRAZ, C.; KIM, J.H.; JOURDAN, C.; 2015. Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. *Plant Soil* 391: 219–235.
- CARSAN, S.; STROEBEL, A.; DAWSON, I.; KINDT, R.; MBOW, C.; MOWO, J.; JAMNADASS, R.; 2014. Can agroforestry option values improve the functioning of drivers of agricultural intensification in Africa? *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 6: 35-40.
- CASSMAN, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96: 5952–5959.
- COELLO, J.; BECQUEY, J.; GONIN, P.; ORTISSET, J.P.; BAIGES, T.; PIQUÉ, M.; 2009. El nogal híbrido (*Juglans x intermedia*) y el nogal común (*J.regia*) para madera de calidad. Centro de la Propiedad Forestal. Generalitat de Catalunya.
- COSSANI, M.C.; SLAFER, G.A.; SAVIN, R.; 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *F. Crop. Res.* 112: 205–213.
- DE MIGUEL, J.M.; ACOSTA-GALLO, B.; GÓMEZ-SAL, A.; 2013. Understanding Mediterranean pasture dynamics: general tree cover vs. specific effects of individual trees. *Rangel. Ecol. Manag.* 66: 216–223.
- DORÉ, T.; MAKOWSKI, E.M., MUNIER-JOLAIN, N.; TCHAMITCHIAN, M., TITTONELL, P.; 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge. *Eur. J. Agron.* 34: 197–210.

DUFOUR, L.; METAY, A.; TALBOT, G.; DUPRAZ, C.; 2013. Assessing light competition for cereal production in temperate agroforestry systems using experimentation and crop modelling. *J. Agron. Crop Sci.* 199: 217–227.

EU; 2013. A new EU Forest Strategy: for forests and the forest-based sector. European Commission. COM(2013) 659 final. https://ec.europa.eu/agriculture/forest/strategy_en (consultada el 20/12/2016).

EU; 2014. Strategy on adaptation to climate change. European Commission. DOI:10.2834/5599 https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/eu_strategy_en.pdf (consultada el 20/12/2016).

EUROSTAT; 2016. Forestry. Production and trade in primary products. Sawntwood trade by species. <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> (consultada el 06/01/2017, última actualización el 28/04/2016).

FAO; 1996. Enseñanzas de la revolución verde: hacia una nueva revolución verde. Cumbre mundial sobre la alimentación. <http://www.fao.org/docrep/003/w2612s/w2612s06.htm> (consultada el 20/12/2016).

FAO; 2009. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Foro de Expertos de Alto Nivel: Cómo alimentar al Mundo 2050. Roma. http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf (consultada el 20/12/2016).

FAO; 2013. Climate-Smart Agriculture Sourcebook. <http://www.fao.org/docrep/018/i3325e/i3325e.pdf> (consultada el 06/01/2017).

FERREYRA, R.; SELLÉS, G.; SELLÉS, I.; 2001. Riego deficitario en nogales. Estrategias de riego para enfrentar situaciones de escasez de agua en frutales. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Santiago (Chile). *Boletín INIA* 58.

GARCÍA, A.; PANIAGUA, L.L.; LÓPEZ, F.; COLETO, J.M.; 2010. Producción de maderas de calidad en Extremadura. En COLETO, J.M.; MUSLERA, E.; GONZÁLEZ, R.; PULIDO, F.; (eds.): La agricultura y la ganadería extremeñas: 153-163. Fundación Caja de Badajoz. Badajoz.

GEA-IZQUIERDO, G.; MONTERO, G.; CAÑELLAS, I.; 2009. Changes in limiting resources determine spatiotemporal variability in tree-grass interactions. *Agrofor. Syst.* 76: 375–387.

GUERRERO, A.; 1999. Cultivos herbáceos extensivos. 6ª ed. Mundi Prensa. 833 pp. Madrid.

HE, C.; MENG, P.; ZHANG, J.; GAO, J.; SUN, S.; 2012. Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China. *Acta Ecol. Sin.* 32: 2047–2055.

HERNÁNDEZ, C.; 2005. Cambio climático y cultivos. *Agricultura* 74: 126–131.

HOFFMAN, E.; VIEGA, L.; 2011. Caracterización preliminar de cultivares de trigo y cebada por su comportamiento al estrés hídrico. En CASTRO, A.; HOFFMAN, E.; VIEGA L.; (eds.): Limitaciones para la productividad de trigo y cebada: 53-57. Departamento de Publicaciones de la Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Montevideo (Uruguay).

IPCC; 2015. Climate change 2014. Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group III Technical Support Unit. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume.pdf (consultada el 20/12/2016).

- JOSE, S.; GISLLESPIE, A.R.; PALLARDY, S.G.; 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agrofor. Syst.* 61: 237–255.
- LASCO, R.D.; JANE, R.; DELFINO, P.; ESPALDON, M.L.; 2014. Agroforestry systems: helping smallholders adapt to climate risks while mitigating climate change. *Wires Clim Change*, 5:825–833.
- LINK, C.M.; THEVATHASAN, N.V.; GORDON, A.M.; ISAAC, M.E.; 2015. Determining tree water acquisition zones with stable isotopes in a temperate tree-based intercropping system. *Agrofor. Syst.* 89: 611–620.
- LÓPEZ-BELLIDO, L., 1991. Cultivos herbáceos Vol. I.: Cereales. Mundi Prensa. 539 pp. Madrid.
- LORENZ, K.; LAL, R.; 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34: 443–454.
- LUI, E.N.; BOUHIER, R.A.; GALLO, S.; MARTÍNEZ, R.M.; MERG, C.; FRAILE, A.; 2005. Riego por goteo del nogal (*Juglans regia* L.) en la Barda de Patagones. *Rev. Pilquen - Sección Agron.* 7: 1-10.
- LUNA, F.; 1979. El nogal. Ministerio de Agricultura. Publicaciones de Extensión Agraria. 117 pp. Madrid.
- MAPYA; 2003. Libro Blanco de la Agricultura y el Desarrollo Rural. Tomo I, 2ª Parte: Agricultura y medio ambiente. Capítulo 10: Aspectos ambientales de la agricultura: 526-527. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid.
- MARTIN, G.; URIU, K.; NISHIJIMA, C.; 1980. The effect of drastic reduction of water input on mature walnut trees. *HortScience* 15: 157–158.
- MORENO, G.; BARTOLOMÉ, J.W.; GEA-IZQUIERDO, G.; CAÑELLAS, I.; 2013. Overstory–understory relationships. En CAMPOS, P.; HUNTSINGER, L.; OVIEDO, J.L.; STARRS, P.F.; DIAZ, M.; STANDIFORD, R.B.; MONTERO, G; (eds.) Mediterranean oak woodland working landscapes. Landscape Series 16: 145-179. Springer. Berkeley.
- MUURINEN, S.; PELTONEN-SAINIO, P.; 2006. Radiation-use efficiency of modern and old spring cereal cultivars and its response to nitrogen in northern growing conditions. *F. Crop. Res.* 96: 363–373.
- OSCA, J.M.; 2007. Cultivos herbáceos extensivos: Cereales. Universidad Politécnica de Valencia. 252 pp. Valencia.
- PASSIOURA, J.B.; ANGUS, J.F.; 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Adv. Agron.* 106: 37–75.
- PARDINI, A.; MORI, S.; RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.; MOSQUERA-LOSADA, M.R.; 2010. Efecto del arbolado en la producción de pasto y trigo ecológicos en la Maremma Toscana (Italia Central). *Pastos* 40: 211–223.
- RAY, D.K.; RAMANKUTTY, N.; MUELLER, N.D.; WEST, P.C.; FOLEY, J.A.; 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat. Commun.* DOI: 10.1038/ncomms2296.
- ROMERO, R.; GERMAN, S.; 2001. Consideraciones sobre el clima y el desarrollo fenológico de la cebada cervecera. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Montevideo (Uruguay). http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/ambiente/clima_fenol_cebada.pdf (consultada el 06/01/2017).

- SAVIN, R; 1990. Duración y tasa de crecimiento de granos en trigo; efecto de la fecha de siembra. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Pergamino (Argentina).
- SCHOENEBERGER, M.; BENTRUP, G.; GOOIJER, H.D.; SOOLANAYAKANAHALLY, R.; SAUER, T.; BRANDLE, J.; ZHOU, X.; CURRENT, D.; 2012. Branching out: agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agricultura. *J. Soil Water Conserv.* 67: 128-136.
- SETTER, T.L.; WATERS, I.; 2003. Review of prospect for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats. *Plant Soil* 253: 1-34.
- TITTONELL, P.; 2014. Ecological intensification of agriculture – sustainable by nature. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 8: 53-61.
- UGARTE, C.; CALDERINI, D.F.; SLAFER, G.A.; 2007. Grain weigh and grain number responsiveness to pre-anthesis temperature in wheat, barley and triticale. *F. Crop. Res.* 100: 240-248.
- VERCHOT, L.V.; VAN NOORDWIJK, M.V.; KANDJI, S.; TOMICH, T.; ONG, C.; ALBRECHT, A.; MACKENSEN, J.; BANTILAN, C.; ANUPAMA, K.V.; PALM, C.; 2007. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 12: 901-918.
- ZHANG, W.; AHANBIEKE, P.; WANG, B.J.; GAN, Y.W.; LI, L.H.; CHRISTIE, P.; LI, L.; 2015. Temporal and spatial distribution of roots as affected by interspecific interactions in a young walnut/wheat alley cropping system in northwest China. *Agrofor. Syst.* 89: 327-343.