6º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

6CFE01-039

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Efectos estacionales y de sitio sobre la respiración del suelo en sabinares albares termófilos (*Juniperus thurifera* L.) de El Campo de Montiel

GARCÍA MOROTE, F.A.[1], LÓPEZ SERRANO, F.R.[1], MARTÍNEZ GARCÍA, E.[1], DADI, T.[1], LUCAS BORJA, M.E.[1], RUBIO, E.[2], CANDEL, D.[1] y ANDRES ABELLÁN, M.[1]

[1] Universidad de Castilla-La Mancha. Departamento de Ciencia y Tecnología Agroforestal y Genética. E.T.S.I. Agrónomos. Campus Universitario s/n. 02071. Albacete.
[2] Universidad de Castilla-La Mancha. Departamento de Física Aplicada. Escuela Politécnica Superior. Campus Universitario s/n. 02071. Albacete.

Resumen
El flujo de CO_2 del suelo (respiración del suelo) refleja la respiración autotrófica y heterotrófica, siendo un componente básico para el estudio del ciclo del C y la productividad de los bosques. En este trabajo se ha estudiado la influencia del sitio o tipo de sabinar (efecto conjunto de edad y calidad de suelo) y de la estación de crecimiento, en los flujos de CO_2 del suelo en los sabinares albares termófilos de El Campo de Montiel (Albacete). Para ello se midió con un equipo LICOR-6400 el flujo de CO_2 del suelo en dos tipos de sabinar: i) sabinar maduro de 170 años de edad media, que se desarrolla sobre suelos líticos, y ii) sabinar joven de 66 años de edad media, más productivo, que se desarrolla sobre cultivos agrícolas abandonados, en suelos más profundos. En total se tomaron mediciones del flujo de CO_2 del suelo en 17 días repartidos entre las distintas estaciones del año. También se midió la temperatura y humedad del suelo para comprobar su correlación con la respiración del suelo. Los resultados reflejaron un efecto significativo del sitio sobre la respiración del suelo, siendo mayor el flujo medio anual de CO_2 en el sabinar joven. Este mayor flujo puede asociarse a la mayor productividad, LAI y deposición de hojarasca de este sabinar. La dinámica de respiración del suelo en los sabinares estudiados resultó ser claramente estacional, con máximos en primavera y otoño, y mínimo en invierno. Dado que la temperatura y humedad del suelo resultaron explicar una escasa variabilidad del flujo de CO_2 del suelo, la significativa estacionalidad en la respiración del suelo indica, que esta variable estaría además muy influenciada por los procesos fisiológicos estacionales que regulan el crecimiento, la deposición de hojarasca y traslocación de C a la raíces.

Palabras clave
Flujos de CO_2, Balance de C, productividad, *Juniperus thurifera* L.

1. Introducción

La respiración del suelo es el mayor flujo respiratorio de C que se produce en los ecosistemas forestales hacia la atmósfera (JANSSENS et al., 2001). Se trata además de un componente clave del balance de C en cualquier ecosistema forestal, pues permite el análisis del comportamiento del ecosistema desde el punto de vista de la productividad, y de sus posibles respuestas frente al cambio climático (WARING & RUNNING, 1998). El flujo de CO_2 del suelo está producido mayoritariamente por la respiración subterránea, que se compone de la respiración de las raíces (autotrófica) y la de los organismos microbianos (heterotrófica) (WARING & RUNNING, 1998; HANSON et al., 2000).

La tasa de respiración del suelo parece depender en gran medida de la temperatura y humedad del suelo (WARING & RUNNING, 1998). Por tanto, los cambios estacionales microclimáticos del suelo deben jugar un papel importante en el funcionamiento del suelo (APONTE et al., 2007). A una mayor escala, la respiración del suelo varía entre distintos tipos de ecosistema, y diferentes tipos de comunidad vegetal frecuentemente muestran distintas tasas de respiración de suelo. El tipo de vegetación afecta a la respiración del suelo no sólo por su influencia en el microclima y la estructura del suelo, sino también por la cantidad de detritos que deposita en el suelo y por la respiración radical (RAICH & TUFEKCIOGLU, 2000).

A pesar de su importancia ecológica, información referente al flujo de C del suelo en ambientes mediterráneos sigue siendo escasa. En concreto, trabajos realizados en ecosistemas dominados por el género *Juniperus* en clima semiárido son prácticamente inexistentes. Los sabinares albares (*Juniperus thurifera* L.) termófilos ocupan las zonas más áridas de la distribución de esta especie en España (COSTA et al., 1993) y pueden ser clasificados en dos niveles de madurez: sabinares maduros, con árboles de edad superior a 150 años, y sabinares jóvenes, con árboles de menos de 100 años, y que se han formando por regeneración de cultivos y pastos abandonados. Los bosques maduros de sabina albar se encuentran fundamentalmente en suelos de escasa profundidad, presentando escasa cobertura vegetal (LÓPEZ, 2001), al haber sido roturados los sabinares de mejor suelo para cultivo agrícola. Al contrario, los sabinares más jóvenes de El Campo de Montiel crecen en mejores suelos, al haberse producido su regeneración en cultivos agrícolas abandonados, presentando mayor cobertura vegetal y productividad (GARCÍA MOROTE et al., 2012a).

Las diferentes características de los dos tipos de sabinar indicados, nos permite estudiar el flujo de CO_2 del suelo en dos masas con distinto grado de madurez y diferente productividad (debido a la edad y a la calidad de suelo), todo ello bajo clima mediterráneo semiárido. La principal hipótesis que puede formularse en este trabajo es que el tipo de sabinar (sitio), la estación de crecimiento y los cambios microclimáticos en el suelo (temperatura y humedad), deberían afectar significativamente al flujo de CO_2 del suelo.

2. Objetivos

Este trabajo trata de evaluar el comportamiento de la respiración del suelo en dos tipos de sabinar albar (*Juniperus thurifera* L.), que difieren en edad y tipo de suelo, a lo largo de las 4 estaciones de crecimiento del año. Los objetivos concretos del estudio son los siguientes:

i) Analizar el efecto del sitio o tipo de sabinar (efecto conjunto de la madurez de la masa y la calidad de suelo) en el flujo de CO_2 del suelo.
ii) Comprobar la variación estacional del flujo de CO_2 del suelo, en los dos tipos de sabinar estudiados.
iii) Investigar sobre los efectos instantáneos de la temperatura y la humedad del suelo sobre la respiración del suelo, en ambos tipos de sabinar.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El estudio se ha realizado en los sabinares albares de El Campo de Montiel, dentro de la provincia de Albacete. Estos sabinares son tipificados como termófilos por COSTA et al. (1993; ver Figura 1). El clima es semiárido frío (tipo BSk; KÖPPEN, 1936), con temperatura media anual de 12,8 ºC, y precipitaciones anuales y en las estaciones de crecimiento de 452 y 234 mm, respectivamente. Este clima es continental, con temperaturas extremas que varían entre 43 a -21 ºC (datos de la estación de El Bonillo: 38º 57´ N, 01º 09´ W; 1.068 m.s.m.; 30 años). Los suelos se desarrollan sobre material altamente carbonatado (dolomías Jurásicas).

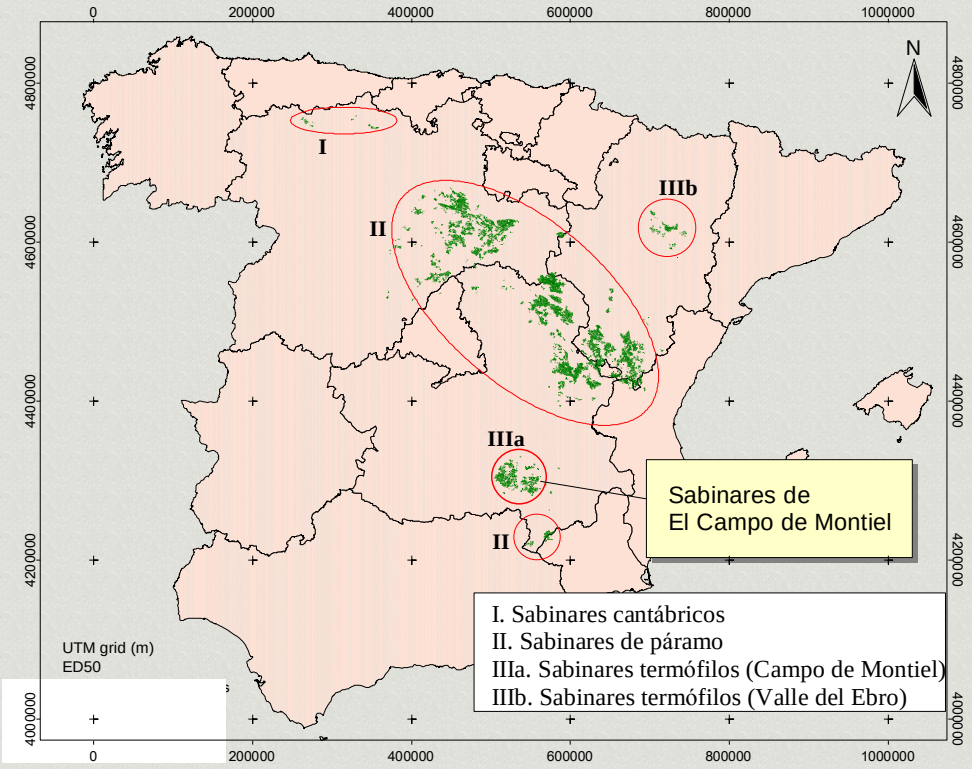

Figura 1. Situación de los sabinares de El Campo de Montiel dentro del resto de sabinares españoles. Fuente: elaboración propia con el Mapa Forestal de España en su versión digital proporcionada por el Banco de Datos de Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, y la información publicada en COSTA et al. (1993).

Los suelos donde fue medida la respiración se seleccionaron dentro de dos tipos de sabinar termófilo de distinto nivel de madurez y calidad de sitio: i) un sabinar maduro, de edad media de 170 años, que se desarrolla sobre suelos líticos (profundidad útil menor a 15 cm), con rodales de pendiente moderada (0-10%), y ii) un sabinar joven, de edad media de 66 años, que se desarrolla en antiguos cultivos agrícolas abandonados, con suelos más profundos y en terreno sin pendiente. En cada tipo de sabinar se fijó una zona experimental de aproximadamente 1 ha, representativa de la masa estudiada. Ambas zonas distan menos de 1 km, para asegurar que las masas crecen bajo las mismas condiciones climáticas. Las características de la vegetación de los dos tipos de sabinar se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los 2 tipos de sabinares estudiados (GARCÍA MOROTE, 2008). Errores: error estándar

Características de la vegetación	**Sabinar joven**	**Sabinar maduro**
Edad media (años)	66 ± 4	170 ± 5
Densidad de sabinas (pies ha^{-1})	308 ± 40	95 ± 12
Cobertura de *Juniperus thurifera* (%)	65 ± 23	32 ± 14
Productividad Primaria Neta (Mg ha^{-1} $año^{-1}$)	1,91 ± 0,14	0,44 ± 0,01
Hojarasca (Mg ha^{-1} $año^{-1}$)	0,98 ± 0,13	0,24 ± 0,05
LAI (m^2/m^2)	1,03	0,32

Los dos tipos de sabinar estudiados se desarrollan sobre suelos típicamente calizos (dolomías Jurásicas) presentando por ello un pH básico (Tabla 2). Los suelos del sabinar joven tienen mayor profundidad y mayor contenido en arcillas, siendo la densidad aparente mayor en el bosque maduro. Es destacable la existencia de mayor cantidad de C orgánico en el sabinar maduro, consecuencia de la mayor deposición acumulativa de materia orgánica a lo largo de los años (Tabla 2).

Tabla 2. Características edáficas de los suelos (± error estándar) en cada sabinar estudiado (GARCÍA MOROTE et al., 2012b)

Características del suelo	**Sabinar joven**	**Sabinar maduro**
Profundidad media (m)	0,42 ± 0,04	0,10 ± 0,02
Suelo dominante (FAO, 1988)	Calcaric cambisol	Lithic leptosol
Arena (%)	50 ± 5	58 ± 5
Arcilla (%)	28 ± 1	12 ± 1
pH	8,3 ± 0,1	8,5 ± 0,1
Carbonatos (g 100 g^{-1})	15,7 ± 0,65	38,4 ± 0,64
C orgánico total (%)	2,7 ± 0,8	3,7 ± 1,1
N Kjeldahl (%)	0,35 ± 0,25	0,36 ± 0,18
P disponible Olsen (mg kg^{-1})	33 ± 31	27 ± 21
Densidad aparente (g cm^{-3})	1,37 ± 0,04	1,54 ± 0,02

3.2. Medición de la respiración del suelo

Las mediciones de respiración del suelo fueron realizadas entre marzo de 2010 y mayo de 2012, repartidas en las cuatro estaciones de crecimiento. En total fueron realizadas medidas en 17 días: 3 en invierno, 4 en otoño, 4 en verano y 6 en primavera. Dentro del área experimental ubicada en el sabinar joven, fueron instalados en el suelo 6 cilindros metálicos de medición de respiración de suelos, debajo de otros tantos pies de sabina representativos de esta masa. Los cilindros se colocaron entre el tronco y el límite de proyección de la copa. En el sabinar maduro, y debido a que presentaba una mayor heterogeneidad topográfica, se colocaron el doble de cilindros de medición, debajo de otras 12 sabinas representativas de la masa. La respiración del suelo fue medida empleando el equipo portátil de medición de flujos de CO_2 LI-6400, al que se acopló la cámara de medición de suelo 6400-09 (LI-COR, Inc. Lincoln NE, EEUU). En cada medida se tomaron 3 repeticiones de flujo de CO_2, siendo la media de las medidas el valor tomado para realizar el tratamiento de datos.

3.3. Medición de la temperatura y la humedad del suelo

La temperatura y la humedad del suelo fueron medidas instalando 3 registradores de medidas climáticas HOBBO (ONSET COMPUTER, 2002-2010) en cada zona experimental, en las mismas condiciones de medición de respiración (bajo sabinas tipo). Los sensores de temperatura y humedad de cada registrador fueron colocados a unos 10 cm de la superficie del suelo, por ser la zona de mayor actividad edáfica y por el escaso perfil útil del sabinar maduro. En el caso del sensor de humedad, fue necesario convertir las medidas de voltaje a humedad gravimétrica, utilizando curvas patrón ajustadas con suelo de las zonas experimentales. El suelo muestra fue secado en estufa (105 ºC, 24^h) y humedecido con distintas cantidades de agua, siendo anotado el correspondiente voltaje de referencia.

3.4. Análisis de datos

Para detectar los efectos del sitio y de la estación sobre las variables medidas, se realizó un análisis de varianza multifactorial (MANOVA; $P<0.05$) con dos factores fijos (sitio o tipo de sabinar, y estación) y una interacción, siendo las variables de respuesta la respiración del suelo, la temperatura del suelo y la humedad del suelo. Adicionalmente, se analizó el efecto del sitio sobre las variables de respuesta dentro de cada estación ($P<0.05$).

Para comprobar el efecto de la temperatura del suelo (*Ts*) sobre la respiración del suelo (*Rs*) a lo largo de las estaciones, se ajustó mediante regresión múltiple un modelo parabólico, dado que para las temperaturas más altas la respiración del suelo no puede seguir aumentando indefinidamente. A este modelo se añadió una variable dummy (*S; S*=0 para sabinar maduro en suelo lítico, y *S*=1 para el sabinar joven) para considerar el posible efecto del sitio en la relación. Esta variable dummy explica el efecto conjunto de la calidad de suelo y la edad, dado que ambos efectos están confundidos en nuestro estudio, representando el tipo de sabinar estudiado (sitio).

$$Rs = (\alpha + \alpha' S) + (\beta_1 + \beta_1' S) \times Ts + (\beta_2 + \beta_2' S) \times Ts^2 + \varepsilon \qquad \text{(Modelo 1)}$$

Finalmente, para observar el efecto conjunto de la temperatura del suelo y la humedad del suelo (*Hs*) sobre la respiración del suelo, y para comprobar si el modelo anterior era mejorado con la inclusión de la humedad, el Modelo 1 fue reformulado siendo incluida como nueva variable predictora la combinada ($Hs \times Ts$).

La selección de parámetros significativos en el Modelo 1 fue realizada mediante regresión por pasos (procedimiento "forward selection"), siendo considerados significativos los coeficientes de los parámetros ajustados con un valor de $P<0.05$ (NETER et al., 1996). La significación del modelo y la bondad de ajuste fue valorada de acuerdo a la F ratio calculada (y su P valor), al R^2 ajustado y al error estándar de la estimación (SEE). Para ajustar los modelos de regresión se utilizaron los datos de todas las estaciones, recogiéndose toda la variabilidad de temperatura y humedad de suelo medidas. Todos los análisis estadísticos fueron realizados usando el software Statgraphics Centurion XV (STAT POINT, 1982-2006).

4. Resultados

El factor sitio afectó significativamente (P<0,00) a las variables respiración del suelo (*Rs*) y humedad del suelo (*Hs*), siendo mayor *Rs* en el sabinar joven, y más elevada *Hs* en el sabinar maduro (Tablas 3 y 4). El factor estación mostró un efecto significativo (P<0,00) sobre las 3 variables de respuesta analizadas (Tabla 3). Las interacciones significativas fueron obtenidas para las variables *Rs* y *Hs* (Tabla 3 y Figura 2).

Tabla 3. Resultado del ANOVA multivariante realizado para evaluar diferencias entre las respiraciones de suelo (Rs; µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), temperaturas del suelo (Ts; ºC) y humedades del suelo (Hs; %), en los dos sabinares y a lo largo de las 4 estaciones. Se representan los grados de libertad (g.l.), las F-ratio y los valores de P para los 2 efectos principales analizados (sitio, estación) y su interacción, así como el efecto del sitio dentro de cada estación. Los efectos deben ser considerados significativos si P<0,05.

Variable	Efectos	g.l.	Valores anuales		Estación							
					Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
			F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
Rs	Sitio	1	8,3	<0,00	<0,00	0,99	10,4	<0,00	7,4	<0,00	0,01	0,09
	Estación	3	20,9	<0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sitio × Estación	3	3,8	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-
Ts	Sitio	1	0,01	9,33	1,04	0,31	0,08	0,78	0,17	0,68	0,48	0,49
	Estación	3	360	<0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sitio × Estación	3	0,48	0,697	-	-	-	-	-	-	-	-
Hs	Sitio	1	18,5	<0,00	18,1	<0,00	0,49	0,48	17,0	<0,00	17,0	<0,00
	Estación	3	112	<0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sitio × Estación	3	5,6	<0,00	-	-	-	-	-	-	-	-

Para *Rs* los mayores valores medidos se obtuvieron en primavera y otoño, y los menores en invierno. Para la variable *Ts* se obtuvo el mayor valor en verano y el menor en invierno, mientras que los máximos de *Hs* se registraron en otoño e invierno, siendo la estación con menor humedad edáfica el verano (Tabla 4).

Tabla 4. Valores medios (± error estándar) para la respiración del suelo (Rs), temperatura del suelo (Ts) y humedad del suelo (Hs) medidos en los dos sabinares tipo y en las 4 estaciones. Medias de los niveles dentro de cada efecto seguidas de letras distintas, reflejan diferencias significativas en el ANOVA realizado (Test LSD de Fisher; P<0,05).

Efectos	Niveles	Variables		
		Rs (µmol $C0_2$ m^{-2} s^{-1})	Ts (ºC)	Hs (%)
Sitio	Sabinar joven	2,03±0,12a	11,46±0,34a	21,98±0,57b
	Sabinar maduro	1,01±0,08b	11,50±0,24a	25,95±0,40a
Estación	Primavera	2,34±0,09a	11,93±0,25b	24,75±0,41b
	Verano	1,73±0,14b	22,58±0,41a	14,24±0,55c
	Otoño	2,35±0,14a	9,81±0,42c	26,5±0,99ab
	Invierno	0,86±0,18c	1,60±0,52d	28,37±0,70a

El factor sitio mostró un efecto significativo sobre *Rs* en las estaciones de verano y otoño (Tabla 3), siendo en este caso mayor la respiración en el sabinar joven (Figura 2). No obstante, tanto en primavera como en invierno no se observaron tales diferencias. Al contrario, *Ts* no varió en función del tipo de sabinar en ninguna de las estaciones (Tabla 3 y Figura 2). Finalmente, *Hs* varió significativamente en función del sitio en todas las estaciones, salvo en verano (Tabla 3), siendo siempre mayor en el suelo del sabinar maduro (Figura 2).

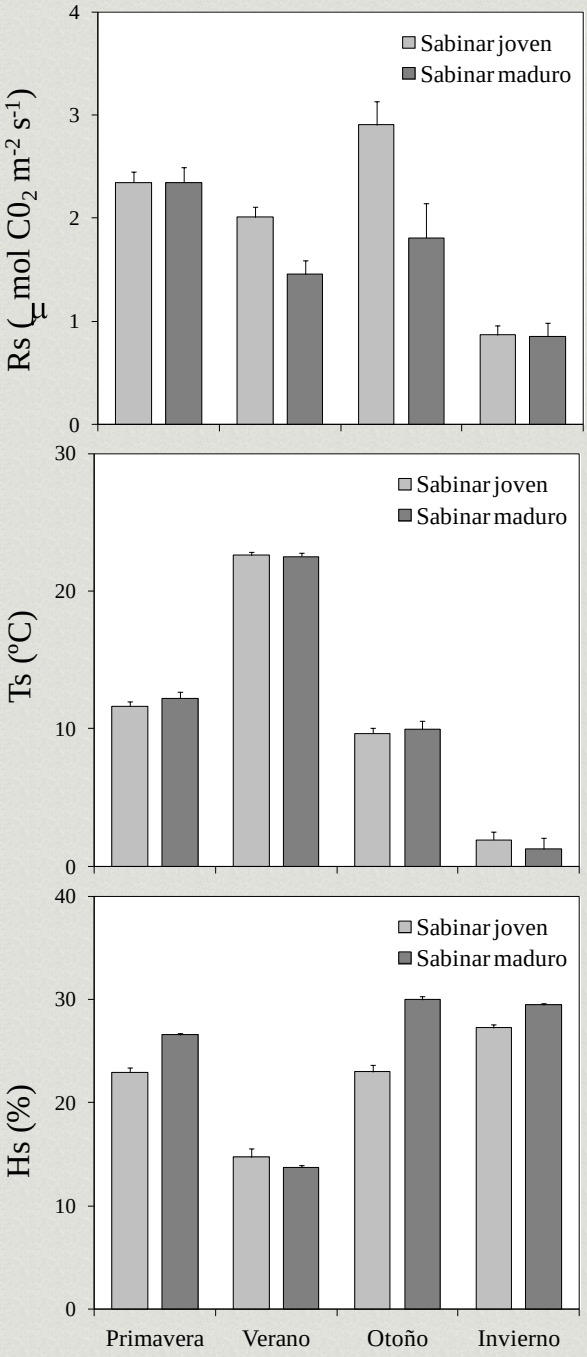

Figura 2. Valores medios de respiración del suelo (Rs), temperatura del suelo (Ts) y humedad del suelo (Hs) por sitio, y para cada estación. Barras de error: error estándar.

Al ajustar el modelo de regresión de *Rs* en función de *Ts* y del sitio (*S*), se comprobó que la variable dummy (*S*) afectó significativamente a la constante del modelo, generándose un modelo parabólico independiente para cada sabinar, pero no afectó significativamente a la pendiente, siendo eliminada en su interacción con *Ts* en el proceso de selección de variables (Tabla 5). Aunque este modelo resultó ser significativo (F= 19,9; P<0,00), los estadísticos de

bondad del ajuste reflejaron que la variabilidad de *Rs* fue explicada en un bajo porcentaje por *Ts* (R^2 ajustado = 15,36%), obteniéndose un SEE relativamente elevado (1,07).

Tabla 5. Coeficientes ajustados, errores estándar y estadísticos de los coeficientes (T y P valor) en el modelo de predicción de Rs en función de Ts y del sitio (S).

Parámetros	Estimación	Error estándar	T	P
Constante(α)	0,678	0,189	3,58	<0,00
S	0,294	0,128	2,28	0,023
Ts	0,222	0,0302	7,34	<0,00
Ts^2	-0,00773	0,00115	-6,68	<0,00

El modelo reflejó que para una determinada temperatura de suelo, la respiración del suelo es ligeramente mayor en el sabinar joven. Asimismo, la validez del modelo parabólico confirmó que a partir de un determinado instante la respiración del suelo de los sabinares no podría seguir aumentando (disminuiría), para las mayores temperaturas del suelo (Figura 3).

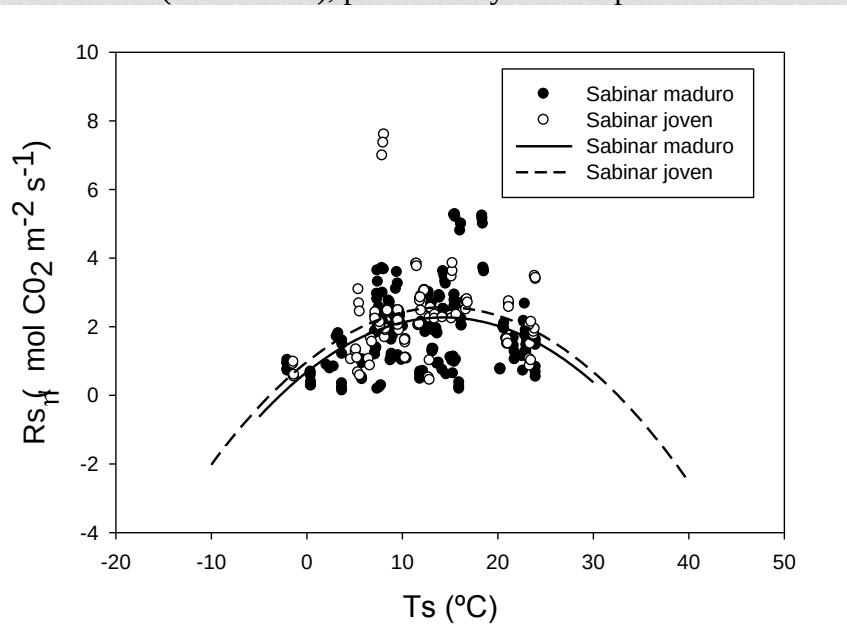

Figura 3. Modelo parabólico ajustado para la respiración del suelo en función de la temperatura del suelo, por sitio.

Al incluir a *Hs* como variable combinada con *Ts*, se generó un nuevo modelo que resultó ser significativo (F=68,2; P<0,00). En este caso la variable dummy no resultó ser significativa (no afectó ni a la constante, ni a la pendiente del modelo), generándose un modelo rectilíneo con constante, de pendiente la variable combinada (*Hs*×*Ts*) (Tabla 6). En el modelo de variable combinada la bondad del ajuste mejoró aunque ligeramente (R^2 ajustado = 23,4%), obteniéndose un SEE menor al anterior (0,91).

Tabla 6. Coeficientes ajustados, errores estándar y estadísticos de los coeficientes (T y P valor) en el modelo de predicción de Rs en función de Ts y Hs.

Parámetros	Estimación	Error estándar	T	P
Constante(α)	1,009	0,128	7,84	<0,00
Hs×*Ts*	0,00344	0,000417	8,25	<0,00

5. Discusión

5.1. Efectos del sitio sobre la respiración del suelo

Nuestros resultados confirman la hipótesis de que en el sabinar más productivo (sabinar joven), es mayor la tasa media anual de flujo de CO_2 del suelo, y por tanto existiría mayor liberación anual de C hacia la atmósfera. Analizando las características de la vegetación de ambos tipos de sabinar, se puede indicar que no sólo la productividad, sino también el valor del LAI y la deposición de hojarasca, son factores que podrían ser utilizados para justificar una mayor respiración en el suelo. Resultados de estudios recientes han demostrado la fuerte correlación existente entre LAI y flujo de CO_2, consecuencia de que una mayor fotosíntesis y producción de materia orgánica para organismos heterótrofos, aumentan significativamente la respiración del suelo (HIBBARD et al., 2005). La respiración del suelo se correlaciona positivamente en ecosistemas forestales con la producción de hojarasca, tal y como apuntan RAICH & NADELHOFFER (1989).

Otro factor influyente en los resultados obtenidos es la edad de la masa. Aunque este factor está confundido con el tipo de suelo en nuestro estudio, a las edades más avanzadas la productividad forestal decrece (WARING & RUNNING, 1998). No obstante, algunos trabajos revisados (por ejemplo SAIZ et al., 2006) sugieren que con el aumento de edad la respiración autotrófica disminuye, pero no sucede lo mismo con la heterotrófica. ALLISON et al. (2007) y GUO-MEI JIA et al. (2005) indican que la madurez de la vegetación es un factor relevante que influye en mayor actividad microbiana en el suelo. Una mayor edad del sabinar maduro lleva implícita una mayor actividad microbiológica (GARCÍA MOROTE et al., 2012b), lo que explicaría en parte las pocas diferencias encontradas en respiración entre ambos tipo de sabinar en algunas estaciones.

Otros estudios han encontrado una relación directa entre contenido de C en el suelo y respiración del suelo, por ejemplo INCLÁN et al. (2007) en ecosistemas mediterráneos. El mayor contenido de C en el suelo del sabinar maduro también podría explicar una mayor actividad de microorganismos en este suelo (respiración heterotrófica), pues la deposición de hojarasca se ha ido produciendo durante mucho más tiempo, proporcionando más sustrato a microorganismos en forma de C orgánico (GARCÍA MOROTE et al., 2012b). No obstante, el mantenimiento de una tasa de respiración de suelo elevada, bajo una producción de hojarasca tan reducida, podría determinar que en el suelo del sabinar maduro se produjese una paulatina pérdida de C, pasando de ser almacén a fuente de C hacia la atmósfera. La contribución de la descomposición del C más recalcitrante en la respiración heterotrófica es determinante en las tendencias de almacenamiento o pérdida de C a largo plazo (GRACE & RAYMENT, 2000).

5.2. Efectos estacionales sobre la respiración del suelo

Nuestros resultados confirman la hipótesis de existencia de una gran estacionalidad en el flujo de CO_2 del suelo en ambos sabinares. La estacionalidad en el clima en los ecosistemas mediterráneos parece ser decisiva para que la actividad del suelo y vegetación sea también estacional (APONTE et al., 2009). En nuestro trabajo se ha comprobado como en verano e invierno la actividad respiratoria del suelo es ralentizada, habiéndose alcanzado los mínimos en los muestreos de invierno, coincidiendo con el parón más importante en el crecimiento.

No obstante, es destacable que en verano se mantengan ciertos niveles de respiración de suelo, con escaso contenido de humedad del suelo. Aún cuando la respiración de las raíces fuera reducida, este comportamiento puede ser debido a que en esta estación se mantenga la respiración heterotrófica, dado que es a finales de primavera cuando se produce el mayor aporte de C al suelo del sabinar por la caída de hojarasca (GARCÍA MOROTE et al., 2012b). Además, en los suelos calizos de escasa profundidad de medios semiáridos, tanto las raíces como los propios microorganismos podrían obtener agua de capas más profundas, aprovechando las fisuras que suelen presentar las rocas calizas (QUEREJETA et al., 2007).

5.3. Efectos de la temperatura y humedad del suelo sobre la respiración del suelo

A pesar de que la temperatura del suelo puede ejercer el control de la respiración del suelo en los ecosistemas forestales (HANSON et al., 2000), el flujo de CO_2 del suelo no ha mostrado tener una fuerte respuesta a la temperatura del suelo, ni a la humedad del suelo, por la baja correlación encontrada en los modelos ajustados. DAVIDSON et al. (2006) indican que tanto temperatura como humedad del suelo influyen sobre la respiración del suelo de una manera muy compleja, afectando también a la deposición de hojarasca, lo que directamente también influye en el flujo de CO_2 del suelo. IRVINE & LAW (2002) encontraron que la humedad del suelo solamente era significativa en la respiración del suelo de los bosques jóvenes, y HÖGBERG et al. (2001) observaron que la relación entre la respiración y la temperatura del suelo era más debida a la respiración autotrófica que heterotrófica.

Al contrario, las variaciones de la respiración del suelo parecen ser más claras a nivel estacional. En nuestro trabajo no se han encontrado diferencias significativas en la temperatura del suelo entre los tipos de sabinar, lo que nos indica que la productividad, la producción de hojarasca y las estrategias de crecimiento estacional, serían factores muy influyentes para explicar las diferencias en las tasas de respiración del suelo entre los sabinares. Esta hipótesis se fundamenta en que la mayor productividad genera un mayor crecimiento radicular (una mayor respiración autotrófica), y mayor deposición de hojarasca (mayor respiración heterotrófica). Tanto la actividad de la parte aérea del árbol (fotosíntesis, respiración foliar, y conductancia estomática) como el aumento de la respiración de las raíces (debido a la traslocación de fotosintatos para el crecimiento radicular), ejercerían una gran influencia sobre el flujo de C del suelo. Por tanto, nuestros resultados estarían en la línea de lo apuntado por SAMPSON et al. (2007), que indican que cambios estacionales de respiración del suelo atribuidos a la temperatura del suelo, estarían estrechamente correlacionados con la estacionalidad de la fotosíntesis, lo que se traduciría en distintos grados de aporte de C a las raíces. Dado que las diferencias significativas de respiración de suelo entre sabinares sólo se producen en verano y otoño, los mecanismos de crecimiento y traslocación de C de ambos sabinares en esas estaciones serían significativamente distintos, quedando esa diferencia reflejada en el flujo de CO_2 subterráneo.

6. Conclusiones

1. El flujo de CO_2 del suelo en los sabinares estudiados depende del sitio, siendo mayor en el sabinar más productivo, el sabinar joven, que se desarrolla en una mayor profundidad de suelo, y que presenta mayor LAI y deposición de hojarasca.

2. La dinámica de respiración del suelo en los sabinares estudiados es claramente estacional, con máximos en primavera y otoño, y mínimo en invierno. Ello permite

indicar que la respiración del suelo en los dos sabinares viene controlada en gran medida por procesos fisiológicos del crecimiento estacional (fotosíntesis, deposición de hojarasca y traslocación de C a la raíces para crecimiento radicular).

3. Aunque la temperatura del suelo estimula la respiración del suelo, ello sólo se produce en un intervalo de temperaturas concreto, a partir del cual la respiración del suelo disminuiría. Por ello, el ajuste entre ambas variables debe realizarse en los sabinares estudiados con modelos curvilíneos (por ejemplo, el parabólico). La humedad del suelo añade a la predicción de la respiración muy poco porcentaje de variabilidad explicada, como variable combinada con la temperatura del suelo.

4. La baja correlación encontrada entre temperatura del suelo y respiración del suelo, y el hecho de que la temperatura del suelo no varíe significativamente en ninguna estación entre sabinares, indicaría que la respiración del suelo obedece en gran medida, aparte de al efecto instantáneo de la temperatura y humedad del suelo, a las estrategias de crecimiento estacionales apuntadas.

7. Agradecimientos

Este trabajo se ha podido realizar con fondos proporcionados por el Plan Regional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico e Innovación en Castilla-La Mancha (PEIC11-0170-8185), por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (CSD2008-00040; AGL2011-27747) y por la Universidad de Castilla-La Mancha (Proyecto 0111011601). El Ministerio de Educación, Cultura y Deporte ha financiado a Eduardo Martínez-García bajo el programa FPU.

8. Bibliografía

ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; DOUGHERTY, P. M.; KRESS, L. W. & KING, J. S.; 1998. Leaf area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. *Forest Sci.* 44(2) 317–328.

ALLISON, V.J.; CONDRON, L.M.; PELTZER, D.A.; RICHARDSON, S.J. & TURNER, B.L.; 2007. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef Chronosequence, New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 39(7) 1770–1781.

APONTE, C.; MARAÑÓN, T. y GARCÍA, L.; 2010. Microbial C, N and P in soils of Mediterranean oak forests: influence of season, canopy cover and soil depth. *Biogeochemistry* 101 77–92.

COSTA, M.; GÓMEZ, F.; MORLA, F. & SAINZ, H.; 1993. Caracterización fitoecológica de los sabinares albares de la Península Ibérica. *Orsis* 8 79–93.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. & LUO, Y.; 2006. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q10. *Global Change Biol.* 12(2) 154–164.

FAO; 1988. Soil Map of the World, Revised Legend. World Soil Resources Report Nº 60. FAO–UNESCO–ISRIC. Rome.

GARCÍA MOROTE, F.A.; 2008. Biomasa y productividad de la sabina albar (Juniperus thurifera L.) en El Campo de Montiel (Albacete). Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha. 388 páginas. Albacete.

GARCÍA MOROTE, F.A.; LÓPEZ SERRANO, F.R.; ANDRÉS, M.; RUBIO, E.; GONZÁLEZ JIMÉNEZ, J.L. & de las HERAS, J.; 2012a. Allometries, biomass stocks and biomass allocation in the thermophilic Spanish juniper woodlands of Southern Spain. *For. Ecol. Manage.* 270 85–93.

GARCÍA MOROTE, F.A.; LÓPEZ SERRANO, F.R.; ANDRÉS, M.; MARTÍNEZ GARCÍA, E.; LUCAS BORJA, M.; DADI, T.; CANDEL, D. & WIC, C.; 2012b. Effects of woodland maturity, vegetation cover and season on enzymatic and microbial activity in thermophilic Spanish Juniper woodlands (*Juniperus thurifera* L.) of southern Spain. *Eur. J. Soil Sci.* 63 579–591.

GRACE, J. & RAYMENT, M.; 2000. Respiration in the balance. *Nature* 404 819–820

GUO-MEI JIA, J.; CHUNYAN, W. & WANG, G.; 2005. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, northwest China. *For. Ecol. Manage.* 217 117–125.

HANSON P.J.; EDWARDS N.T.; GARTEN C.T. & ANDREWS J.A.; 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48 (1) 115–146

HIBBARD, K. A.; LAW, B. E. ; REICHSTEIN, M. & SULZMAN, J.; 2005. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry* 73(1) 29–70.

HÖGBERG, P.; NORDGREN, A.; BUCHMANN, N.; TAYLOR, A.F.; EKBLAD, A.; HÖGBERG, M.N.; NYBERG, G.; OTTOSSON-LÖFVENIUS, M. & READ, D.J.; 2001. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature* 411 789–92.

INCLÁN, R.; DE LA TORRE, D.; BENITO, M. & RUBIO, A.; 2007. Soil CO_2 Efflux in a Mixed Pine-Oak Forest in Valsaín (Central Spain). *The Scientific World Journal* 7 166–174.

IRVINE, J. & LAW, B. E.; 2002. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Global Change Biol.* 8(12) 1183–1194.

JANSSENS, I.A.; KOWALSKI, A.S. & CEULEMANS, R.; 2001. Forest floor CO_2 fluxes estimated by eddy covariance and chamber based model. *Agr. Forest Meteorol.* 106 61–69.

KÖPPEN, W.; 1936. Das geographische System der Klimate. En W. Köppen & R. Geiger (eds.): Handbuch der Klimatologie, Vol. 1, Part C. Páginas C1–C44. Gebrüder Borntraeger Verlag. Berlín.

LÓPEZ, G.; 2001. Los árboles y arbustos de la Península Ibérica e Islas Baleares (Tomo I). Editorial Mundi-Prensa. 861 páginas. Madrid.

NETER, J.; KUTNER, M.; WASSERMAN, W. & NACHTSHEIM, C.; 1996. Applied linear statistical models, 4th ed. McGraw-Hill/Irwin. 1.408 páginas. Chicago.

ONSET COMPUTER; 2002–2010. HOBO Data Loggers & Data Logging Logger Software. Onset Computer Corporation, Cape Cod, Massachusetts (USA).

QUEREJETA, J. I.; EGERTON-WARBURTON, L. M. & ALLEN, M. F.; 2007. Hydraulic lift may buffer rhizosphere hyphae against the negative effects of severe soil drying in a California Oak savanna. *Soil Biol. Biochem.* 39 409–417.

RAICH, J. W. & NADELHOFFER, K. J.; 1989. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends. *Ecology* 70 1346–1354.

RAICH, J.W. & TUFEKCIOGLU, A.; 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry* 48 71–90.

SAIZ, G.; BYRNE, K.A.; BUTTERBACH-BAHL, K.; KIESE, R.; BLUJDEA, V. & FARRELL, E.P.; 2006. Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland. *Global Change Biol.* 12(6) 1007–1020.

SAMPSON, D. A.; JANSSENS, I. A.; CURIEL YUSTE, J. & CEULEMANS, R.; 2007. Basal rates of soil respiration are correlated with photosynthesis in a mixed temperate forest. *Global Change Biol.* 13 (9) 2008–2017.

STAT POINT; 1982–2006. Stat point, Inc., STATGRAPHICS Centurion XV, vers. 15.1.02.

WARING, R. & RUNNING, S.; 1998. Forest Ecosystems. Analysis at Multiples Scales. Academic Press. 370 páginas. San Diego.