

Trabajo Final de Carrera

*Efecto de los usos del suelo en la emisión
de dióxido de carbono del suelo a la
atmósfera en un agroecosistema
semiárido del Valle del Ebro.*

Sarah Mendiara Co

**Ingeniería Técnica Agrícola, Especialidad de Industrias Agrarias y
Alimentarias**

Director: Jorge Álvaro Fuentes. Estación Experimental de Aula Dei (CSIC)
Vic, septiembre de 2012

INDICE GENERAL

Índice de figuras	4
Índice de tablas	6
Resumen.....	8
Agradecimientos	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS	13
3. ANTECEDENTES	14
3.1. Cambio climático y usos del suelo	14
3.2. Respiración del suelo	16
3.2.1. Procesos que intervienen en la respiración del suelo.....	17
3.2.2. Factores que controlan la descomposición.....	17
4. DISEÑO EXPERIMENTAL	22
4.1. Entorno geográfico y sus características	22
4.1.1. Climatología.....	22
4.1.2. Geología y litología	24
4.2. Usos del suelo: estudio de la respiración del suelo en campo	24
4.2.1. Características de las parcelas de estudio	24
4.2.2. Análisis de parámetros.....	26
4.3. Usos del suelo: estudio incubación en laboratorio	29
4.4. Fertilización nitrogenada: estudio de la respiración del suelo en campo a corto plazo.....	30
5. RESULTADOS	32
5.1. Usos del suelo: estudio de la respiración del suelo en campo.....	32
5.1.1. Temperatura del suelo	32
5.1.2. Humedad del suelo.....	34
5.1.3. Carbono orgánico soluble del suelo.....	36
5.1.4. Nitrógeno orgánico soluble del suelo	37
5.1.5. Carbono de la biomasa microbiana del suelo	38

5.1.6. Carbono orgánico total del suelo	39
5.1.7. Respiración del suelo.....	40
5.1.8. Relaciones entre los parámetros estudiados.....	42
5.2. Usos del suelo: estudio de incubación en laboratorio	50
5.3. Fertilización nitrogenada: estudio de la respiración del suelo en campo a corto plazo.....	54
5.3.1. Temperatura del suelo	54
5.3.2. Humedad del suelo.....	56
5.3.3. Carbono orgánico soluble del suelo.....	58
5.3.4. Nitrógeno orgánico soluble del suelo	60
5.3.5. Respiración del suelo.....	61
5.3.6. Relación entre los parámetros estudiados	63
6. DISCUSIÓN.....	70
6.1. Usos del suelo: estudio de la respiración del suelo en campo.....	70
6.2. Usos del suelo: estudio de incubación en laboratorio	73
6.3. Fertilización nitrogenada: estudio de la respiración del suelo en campo a corto plazo.....	74
7. CONCLUSIONES	76
7.1. Usos del suelo: estudio de la respiración del suelo en campo.....	76
7.2. Usos del suelo: estudio de incubación en laboratorio	77
7.3. Fertilización nitrogenada: estudio de la respiración del suelo en campo a corto plazo	78
8. BIBLIOGRAFÍA	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la ubicación de Senés de Alcubierre	22
Figura 2. Temperatura media mensual, máximas y mínimas de la zona de estudio	23
Figura 3. Precipitación media mensual, máximas y mínimas de la zona de estudio	23
Figura 4. Vista aérea y delimitación de las parcelas de estudio	25
Figura 5. Analizador de gases modelo EGM-4.....	26
Figura 6. Cámara abierta modelo CFX-1.....	27
Figura 7. Muestras de suelo en incubación	29
Figura 8. Temperatura del suelo media para cada uso	33
Figura 9. Temperatura media del suelo para cada día de muestreo	33
Figura 10. Temperatura media del suelo por uso y día	34
Figura 11. Humedad del suelo media para cada uso	35
Figura 12. Humedad del suelo media para cada día de muestreo.....	35
Figura 13. Humedad del suelo media por uso y día.....	36
Figura 14. Carbono orgánico disuelto para cada uso.....	37
Figura 15. Nitrógeno orgánico disuelto del suelo para cada uso.....	38
Figura 16. Carbono de la biomasa media para cada uso	39
Figura 17. Carbono de la biomasa media para cada día de muestreo.....	39
Figura 18. Carbono orgánico total del suelo para cada uso.....	40
Figura 19. Respiración del suelo media para cada uso	41
Figura 20. Respiración del suelo para cada día de muestreo.....	41
Figura 21. Respiración del suelo por uso y día	42
Figura 22. Relación entre la respiración del suelo y temperatura del suelo.....	43
Figura 23. Relación entre la respiración del suelo y la humedad del suelo.....	44
Figura 24. Relación entre la respiración del suelo y temperatura del suelo en uso NT	45
Figura 25. Relación entre la respiración del suelo y humedad del suelo en uso NT	45
Figura 26. Relación entre la respiración del suelo y temperatura del suelo en uso AC	46
Figura 27. Relación entre la respiración del suelo y la humedad del suelo en uso AC	47
Figura 28. Relación entre la respiración del suelo y temperatura del suelo en uso AU ...	48
Figura 29. Relación entre la respiración del suelo y humedad del suelo en uso AU	48
Figura 30. Relación entre la respiración del suelo y temperatura del suelo en uso FR	49

Figura 31. Relación entre la respiración del suelo y humedad del suelo en uso FR	50
Figura 32. Emisión de CO ₂ media diaria para cada suelo incubado	50
Figura 33. Valores diarios de emisión de CO ₂ en incubación	51
Figura 34. Emisión de CO ₂ por uso y día de incubación	51
Figura 35. Emisión de CO ₂ acumulada por uso y día de incubación	52
Figura 36. Temperatura del suelo media para cada aplicación	54
Figura 37. Temperatura media del suelo para los diferentes momentos de muestreo	55
Figura 38. Temperatura media del suelo por aplicación y hora	55
Figura 39. Humedad media del suelo para cada aplicación.....	55
Figura 40. Humedad media del suelo en los diferentes momentos de muestreo.....	57
Figura 41. Humedad media del suelo por aplicación y hora.....	58
Figura 42. Carbono orgánico soluble del suelo para cada aplicación	59
Figura 43. Carbono orgánico soluble del suelo por aplicación y hora	59
Figura 44. Nitrógeno orgánico soluble del suelo para cada aplicación.....	60
Figura 45. Nitrógeno orgánico soluble del suelo por aplicación y hora	61
Figura 46. Respiración media del suelo para cada aplicación	62
Figura 47. Respiración del suelo media en los diferentes momentos de muestreo	62
Figura 48. Respiración del suelo media para cada aplicación y hora	63
Figura 49. Relación entre la respiración del suelo y la humedad del suelo	64
Figura 50. Relación entre la respiración del suelo y el carbono orgánico disuelto del suelo	65
Figura 51. Relación entre la respiración del suelo y el nitrógeno orgánico disuelto del suelo	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales características del purín aplicado	31
Tabla 2. Análisis de varianza de la temperatura del suelo para los diferentes usos y fechas	32
Tabla 3. Análisis de varianza de la humedad del suelo para los diferentes usos y fechas.	34
Tabla 4. Análisis de varianza de carbono orgánico disuelto del suelo para los diferentes usos y fechas	36
Tabla 5. Análisis de varianza de nitrógeno orgánico soluble del suelo en los diferentes usos y fechas.....	37
Tabla 6. Análisis de varianza del carbono de la biomasa microbiana para los diferentes usos y fechas.....	38
Tabla 7. Análisis de varianza de carbono orgánico total del suelo para los diferentes usos y fechas	40
Tabla 8. Análisis de varianza de la respiración del suelo para los diferentes usos y fechas.....	40
Tabla 9. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los diferentes parámetros estudiados	43
Tabla 10. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en uso NT	44
Tabla 11. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en uso AC	46
Tabla 12. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en uso AU.....	47
Tabla 13. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en uso FR.....	49
Tabla 14. Cociente metabólico, cociente de mineralización, carbono potencialmente mineralizable, ratio de mineralización de carbono, carbono potencialmente mineralizable en relación con el carbono orgánico total.....	53
Tabla 15. Análisis de varianza de la temperatura del suelo para las distintas aplicaciones y horas	54
Tabla 16. Análisis de varianza de la humedad del suelo para las distintas aplicaciones y horas.....	56
Tabla 17. Análisis de varianza de carbono orgánico soluble del suelo para las distintas aplicaciones y horas	58

Tabla 18. Análisis de varianza del nitrógeno orgánico disuelto para las distintas aplicaciones y horas	60
Tabla 19. Análisis de varianza de la respiración del suelo para las distintas aplicaciones y horas	61
Tabla 20. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados	64
Tabla 21. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados 1 hora antes de la aplicación de los distintos fertilizantes nitrogenados	66
Tabla 22. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados 1,50 h después de la aplicación de los distintos fertilizantes nitrogenados	66
Tabla 23. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados 5 horas después de la aplicación de los distintos fertilizantes nitrogenados	67
Tabla 24. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados 71 h después de la aplicación de los distintos fertilizantes nitrogenados	67
Tabla 25. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en la parcela control	68
Tabla 26. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en la parcela con aplicación de nitrógeno mineral	68
Tabla 27. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en la parcela con aplicación de purín	69

Resumen de Trabajo Final de Carrera
Ingeniería Técnica Agrícola, Especialidad de Industrias Agrarias y Alimentarias

Título: Efecto de los usos del suelo en la emisión de dióxido de carbono del suelo a la atmósfera en un agroecosistema semiárido del Valle del Ebro.

Palabras clave: respiración del suelo, secuestro de carbono, usos del suelo, dióxido de carbono.

Autor: Sarah Mendiara Co

Dirección: Jorge Álvaro Fuentes

Avalador: Xavier Serra Jubany

Fecha: Septiembre de 2012

Resumen

Los cambios en los usos del suelo han contribuido de manera importante al incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, especialmente de dióxido de carbono, aumentando sus emisiones desde 1970 en un 80%. Estos cambios causan la alteración de los suelos provocando un impacto sobre el ciclo del carbono, aumentando las tasas de descomposición de la fracción orgánica creando así un flujo de CO₂ a la atmósfera.

Entre las recomendaciones del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, en inglés), y contemplado en el Protocolo de Kyoto, se encuentra el proceso de secuestro de carbono en suelos, que implica la eliminación del CO₂ atmosférico por parte de las plantas y su almacenamiento como materia orgánica del suelo. Para poder favorecer dicho proceso, en un determinado tipo de ecosistema, es fundamental conocer cuáles son los factores que gobiernan la respiración del suelo y el impacto que tienen los diferentes usos en la emisión de CO₂. En el presente trabajo se han estudiado 4 usos del suelo representativos del secano aragonés: un monocultivo de cebada en siembra directa (NT), un suelo abandonado labrado (AC), un suelo abandonado no alterado (AU) y un suelo forestal (FR) con el objetivo de conocer sus tasas de respiración, la influencia de diferentes parámetros edáficos en ellas, y proponer cambios en el uso del suelo que ayuden a mitigar estas emisiones. Además, se ha dedicado un apartado para conocer cómo influyen diferentes técnicas de fertilización nitrogenada (mineral y orgánica) en la respiración de un monocultivo de cebada en siembra directa.

En cuanto a los usos, los resultados obtenidos tanto *in situ* como en laboratorio muestran una mayor respiración en AC, siendo los valores más bajos los de NT y FR. Una de las principales conclusiones es que la supresión del laboreo y del periodo de barbecho largo, así como la conversión de tierras abandonadas y marginales a cultivos y zonas forestales se presentan en este tipo de ecosistemas como prácticas de secuestro de carbono.

En el estudio de aplicación de fertilizantes, no se observó ningún cambio en la respiración del suelo después de la aplicación de nitrógeno mineral. En cambio, el suelo fertilizado con purín sí que mostró picos de emisión durante las siguientes horas a la incorporación de éste, debido fundamentalmente a su alto contenido de carbono lábil.

Final Degree Project Summary
Agricultural Engineering, Farming and Food Industries

Title: Land use Effects on carbon dioxide emissions from soil to the atmosphere in a semiarid agroecosystem of Ebro river valley.

Keywords: soil respiration, soil carbon sequestration, land use, carbon dioxide.

Author: Sarah Mendiara Co

Director: Jorge Álvaro Fuentes

Guarantor: Xavier Serra Jubany

Date: Septiembre de 2012

Summary

Land use changes have contributed significantly to increase the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, especially carbon dioxide, whose emissions have grown since 1970 by 80%. These changes cause an alteration of soil inducing an impact on the global carbon cycle that accelerates the soil organic matter decomposition rates generating CO₂ fluxes to the atmosphere.

A process recommended by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), and recognized in the Kyoto Protocol, is the carbon sequestration that implies removal of atmospheric CO₂ by plants and storage as soil organic matter. In order to implant this practice in a particular ecosystem, studies are necessary to understand the factors that govern soil respiration and the impact of different land uses on CO₂ emissions. In this study, it was studied 4 different types of land uses representative of semiarid rainfed Aragón: a cropping system of barley under no-tillage (NT), an abandoned agricultural plowed field (AC), an abandoned uncultivated field (AU) and a forest area (FR). The objective of the present study was to evaluate the respiration rates, the environmental factors that influence these rates and to propose land use changes to mitigate CO₂ emissions. Additionally, it is included a section to explore the response of soil respiration to nitrogen fertilization (mineral and organic) in a barley system.

In the study of land uses, the obtained results *in situ* as well as in laboratory have shown the highest soil respiration in AC and the lowest in NT y FR. Thus, one of the main conclusions is that the suppression of tillage and the fallow period, and the conversion from abandoned and marginal soils to forest areas or crops are carbon sequestration practices in this ecosystem.

In the study of nitrogen fertilization, there was no change in soil respiration rates after application of mineral nitrogen. In contrast, soil fertilized with manure showed peaks in CO₂ emissions during the hours following the addition, mainly due to the high content of labile carbon of the manure.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Estación Experimental de Aula Dei (Zaragoza) las facilidades que me dio para poder realizar este trabajo en sus instalaciones. También a todos los compañeros de laboratorio por estar siempre dispuestos a ayudarme y enseñarme, en particular, a Pepa que ha amenizado las horas de laboratorio y a Ana, que además me contagió su entusiasmo por ir al campo desde el primer día.

En especial, a Jorge Álvaro por la ayuda, medios y apoyo que me ofreció desde el primer momento. Por compartir conmigo su experiencia y sus conocimientos, y alisar los baches que me encontraba en el camino de la realización de este trabajo. Ha conseguido que se trate de algo más que de un trabajo final de carrera convirtiéndolo en una grata experiencia, que además, ha servido para aclarar los siguientes pasos en mi formación. Muchas gracias.

A *mi familia*, que ha estado muy pendiente del desarrollo del trabajo. Y por último, a mis amigos y a “las chicas”, que me han escuchado y animado todo este tiempo.

1. INTRODUCCIÓN

El efecto invernadero es un fenómeno natural causado por el diferente comportamiento de los componentes de la atmósfera frente a la radiación solar y la radiación terrestre. La atmósfera es muy transparente a la radiación de onda corta, pero en cambio presenta bandas de absorción muy amplias de radiación de onda larga. De esta manera, la radiación solar puede atravesar la atmósfera sin sufrir grandes atenuaciones, y la radiación terrestre (de onda larga) es absorbida en cantidades muy considerables por los gases de efecto invernadero.

En la actualidad existe un consenso social y científico, casi generalizado, en torno a la idea de que nuestro modo de producción y consumo energético está generando una alteración climática global debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Durante las tres últimas décadas las concentraciones de los principales GEI, dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4), han aumentado su concentración un 80% (IPCC, 2007).

La agricultura es una de las principales actividades emisoras de gases de efecto invernadero. Según datos del IPCC del 2006, el sector agrícola emitió el 14% de total de GEI, y en España este porcentaje fue del 10%. En la Comunidad Autónoma de Aragón las emisiones de GEI se encuentran un 40% por encima de los objetivos establecidos en el Protocolo de Kyoto para esta comunidad, y más del 20% de las emisiones provienen del sector agrícola.

El papel de los suelos agrícolas en la dinámica de emisión de los GEI está fuertemente condicionado por los cambios en los usos del suelo (Guo y Gifford, 2002).

La dinámica de los ecosistemas terrestres depende de las interacciones entre diversos ciclos biogeoquímicos. La transferencia de carbono (tanto de CO_2 como de carbono orgánico e inorgánico) entre la biosfera, litosfera, océanos y atmósfera, constituye el ciclo de carbono (Sigman y Boyle, 2000) y depende de las interrelaciones entre una serie de sumideros y fuentes y opera a corto como a largo plazo de tiempo.

Los sistemas ecológicos de la Tierra, por medio de los cuales el carbono queda retenido en la biomasa viva, en la materia orgánica en descomposición y en el suelo, desempeñan un papel importante en el ciclo del carbono mundial. El carbono es intercambiado de manera natural entre estos sistemas y la atmósfera mediante los procesos de fotosíntesis, respiración y descomposición.

En el suelo el CO_2 se produce fundamentalmente a través del metabolismo de los microorganismos y de las raíces de las plantas, siendo la descomposición microbiana de compuestos orgánicos el proceso más importante que lo genera. Durante la descomposición una parte del carbono es devuelto a la atmósfera en forma de CO_2 , mientras que otra se transforma en otros compuestos más sencillos o se almacena en las propias estructuras microbianas.

La humanidad está ya manipulando la biosfera terrestre a escala global y la influencia de esta modificación en la concentración de CO₂ es importante. El efecto sobre el ciclo del carbono de las intervenciones realizadas hasta el momento no ha sido tenido en cuenta, a pesar de que la mayor parte de esas intervenciones han provocado la disminución de carbono en diferentes reservorios de los ecosistemas terrestres. En particular, la biomasa forestal y la materia orgánica del suelo han sido las reservas más afectadas por el cambio de uso del suelo y la transformación agrícola, debido a su relativamente bajo periodo de renovación (entre 30 y 100 años). Sin embargo, esta disminución del carbono terrestre sugiere la oportunidad de que a través de un correcto manejo se pueda incrementar en el futuro el carbono de los ecosistemas terrestres y, de hecho, esta posibilidad está siendo ya contemplada en las recomendaciones actuales del IPCC que indican que las prácticas de reforestación y aforestación (plantación de nuevos bosques en tierras donde históricamente no los había habido) serán claves para paliar el incremento del CO₂ atmosférico. Por consiguiente, es importante examinar en qué medida varían los flujos de carbono y la capacidad de los diferentes suelos para emitir o actuar como sumideros de CO₂.

En el presente trabajo se evaluará el papel que desempeñan diferentes usos de suelo representativos del secano aragonés en la emisión de dióxido de carbono. Para ello, se realizarán medidas sucesivas de CO₂, tanto en la zona de estudio como en el laboratorio, así como de los principales parámetros que influyen en su dinámica. También se dedicará un apartado para analizar el efecto que tiene la aplicación de distintos fertilizantes en las emisiones del suelo.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio es determinar el impacto de diferentes usos del suelo en la emisión de dióxido de carbono del suelo a la atmósfera. Así, una vez obtenidos los resultados se propondrán cambios de uso del suelo que podrían minimizar las emisiones de CO₂ del suelo a la atmósfera. Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos a cumplir:

- Cuantificar los flujos de dióxido de carbono *in situ* de 4 suelos representativos del secano aragonés: monocultivo de cebada bajo siembra directa, suelo labrado abandonado, suelo abandonado inalterado y suelo forestal.
- Determinar la influencia de diferentes parámetros edáficos y climáticos en la respiración del suelo y conocer cuáles de ellos son los que controlan dichos flujos.
- Cuantificar las emisiones de dióxido de carbono en el laboratorio, para determinar el potencial de mineralización de los distintos usos bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad.

Además, se estudiará qué efecto tienen distintos sistemas de fertilización en la producción por parte del suelo del mencionado gas, con el objetivo de analizar qué impacto produce la aplicación de dos tipos de fertilizante nitrogenado (nitrógeno mineral y nitrógeno orgánico) a corto plazo en distintas parcelas cultivadas con cebada.

3. ANTECEDENTES

3.1. CAMBIO CLIMÁTICO Y USOS DEL SUELO

Para el IPCC el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana.

Este significado difiere del utilizado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, en inglés), que describe el cambio climático como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparables.

Ya en el año 2001 el Tercer Informe de Evaluación del IPCC ponía de manifiesto la evidencia proporcionada por las observaciones de los sistemas físicos y biológicos que mostraba que los cambios regionales en el clima, en concreto los aumentos de las temperaturas, estaban afectando a los diferentes sistemas y en distintas partes del globo terráqueo. En promedio, la temperatura ha aumentado aproximadamente 0,6°C en el siglo XX. El resumen del IPCC *Fourth Assessment Report* relativo al año 2007 empieza declarando que el calentamiento global puede considerarse como algo inequívoco, tal como lo ponen en evidencia las observaciones de incrementos en la temperatura media del aire y del océano, en la fusión de las zonas cubiertas por la nieve y el hielo, y por el incremento paulatino que está sufriendo el nivel del mar.

El intervalo de años comprendido entre 1995-2006, se ha catalogado dentro de los 12 años más calurosos de los que se tiene noticia desde que existe el registro instrumental de temperaturas (desde 1850). La tendencia de incremento de los últimos cien años (1906-2005) de 0,74 °C es sensiblemente superior a la tendencia que se había obtenido para periodo de 1901-2000 publicado en el tercer informe del IPCC. El incremento de temperaturas se produce en todo el globo y es mayor cuanto mayor es la latitud, al menos en el Hemisferio Norte. Además, las zonas continentales han sufrido un calentamiento más intenso que las zonas oceánicas.

En promedio, las temperaturas del hemisferio norte durante la segunda mitad del siglo XX fueron superiores a las de cualquier otro período de 50 años de los últimos 500 años, y probablemente las más altas a lo largo de, como mínimo, los últimos 1.300 años.

Desde 1900 al año 2005 la precipitación se ha incrementado significativamente en las zonas orientales de Norte y Sur América, en el norte de Europa y en el Norte y Centro de Asia, pero ha disminuido de forma apreciable en la región del Sahara y alrededores, la cuenca mediterránea europea y África del Sur. Globalmente, se estima que el área afectada por la sequía se ha incrementado desde 1970.

La variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera, y las variaciones de la cubierta terrestre alteran el equilibrio energético del sistema climático. Las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, desde 1970 en un 80%. Entre estas emisiones, el dióxido de carbono (CO₂) es el GEI antropogénico más importante.

Las concentraciones atmosféricas de CO₂ en 2005 (379 ppm) excedieron con mucho el intervalo natural de valores de los últimos 650.000 años. Los aumentos de la concentración mundial de CO₂ se deben principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una parte menor pero apreciable, a los cambios de uso de la tierra. Desde 1970 las emisiones directas debidas a cambios en el uso del suelo se han incrementado un 40%. Los cambios de uso del suelo mediante la conversión de bosques y prados en terrenos agrícolas han contribuido de forma substancial al incremento de la concentración de CO₂ atmosférico en los últimos siglos. La deforestación mundial que se produjo entre 1850-1985 contribuyó con la emisión, aproximadamente, de 120 Gt de carbono a la atmósfera.

El Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IEEE, 2000) proyecta un aumento de las emisiones mundiales de GEI de entre 25% y 90% de CO₂ entre 2000 y 2030, suponiendo que los combustibles de origen fósil mantengan su posición dominante en el conjunto mundial de fuentes de energía hasta 2030 como mínimo. De proseguir las emisiones de GEI a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento aumentaría y el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy probablemente mayores que los observados durante el siglo XX.

Cuando se produce el cambio de uso forestal o praterse a agrícola, la mayor parte de pérdidas de carbono se producen en los primeros años, particularmente en las zonas tropicales (Pausian *et al*, 1997). Aunque a un ritmo más lento, la disminución del carbono edáfico puede continuar durante décadas, sobre todo en los suelos ricos en materia orgánica, particularmente en las regiones templadas. La erosión por el viento y el agua es un factor significativo en las pérdidas locales de carbono y en la redistribución de este elemento.

Por otro lado, los terrenos cuyo uso se modifican consiguiendo una cubierta vegetal perenne, bien sea a través del abandono del suelo agrícola y la sucesión natural o como resultado de una decisión del manejo del suelo tienden a incrementar los niveles de carbono orgánico del suelo (Paustian *et al.*, 1997). En regiones templadas, donde la transformación a nuevas tierras agrícolas está muy limitada o en zonas donde existe una sobre-producción agrícola, es normal que las tierras agrícolas marginales se transformen en terrenos forestales o praterse, lo que representa una opción para conseguir un secuestro de carbono atmosférico (Cole *et al.*, 1996). La velocidad de acumulación de carbono en estos casos varía considerablemente dependiendo de las condiciones de suelos, clima, vegetación y grado de manejo soportado por el suelo.

El potencial de secuestro de carbono por los suelos no es infinito, al menos para un ecosistema en particular. Una vez iniciado, el secuestro de carbono continuará hasta que se alcance una situación de estabilidad o equilibrio, periodo de tiempo que se estima en función de los datos bibliográficos, de entre 50 y 100 años (Cole *et al.*, 1996). De todas maneras, el potencial de secuestro de carbono orgánico y el subsecuente efecto paliativo sobre el incremento del CO₂ atmosférico, son tan importantes que hoy en día uno de los principales puntos para la mitigación del cambio climático se basa en el fomento de las prácticas de aforestación-reforestación.

En los sistemas agrícolas también existe potencial para conseguir un incremento de secuestro del carbono atmosférico. Este potencial se basa en el uso de prácticas de manejo adecuadas incluyendo un mejor manejo de la fertilización, una reducción de periodos de barbecho y un uso de cultivos más productivos (Cole *et al.*, 1996).

3.2. LA RESPIRACIÓN DEL SUELO

La descomposición terrestre es un proceso de degradación físico-química de la materia orgánica del suelo (MOS) proveniente de restos de plantas, animales y material microbiano. Este proceso causa un descenso en el contenido de detritos conforme los materiales son transformados a CO₂ y nutrientes inorgánicos, que podrán ser utilizados para producción vegetal y microbiológica del sistema.

El dióxido de carbono generado se almacena en el espacio poroso del suelo y se va liberando, en mayor o menor medida, desde la superficie del suelo hacia la atmósfera mediante un proceso de difusión entre zonas del suelo con diferente concentración. Este proceso de descomposición de la MOS está controlado por una serie de factores:

- Condiciones climáticas del suelo: temperatura y humedad
- Propiedades del suelo, como pH y contenido de arcillas.
- Alteraciones del suelo.
- Calidad y cantidad del material orgánico
- Características de la comunidad microbiana.

Por tanto, las consecuencias de la descomposición son, por un lado, la mineralización de la materia orgánica, por lo que se producen compuestos inorgánicos (nutrientes minerales, agua y dióxido de carbono), por otro lado la transformación de materia orgánica en componentes orgánicos recalcitrantes y, por último, la emisión de dióxido de carbono.

3.2.1. Procesos que intervienen en la respiración del suelo

Los principales procesos que influyen en la descomposición de la materia orgánica son la lixiviación, la fragmentación y la alteración química.

La lixiviación es el proceso físico por el que los minerales y compuestos orgánicos de menor tamaño se disuelven en el agua y se mueven a través de los diferentes perfiles del suelo. Este proceso produce pérdidas importantes de nutrientes y en menor medida de carbono orgánico, y son mayores en ambientes lluviosos, y despreciables en ambientes secos.

La fragmentación del suelo crea nuevas superficies para la colonización microbiana y aumenta la proporción de la cantidad de residuos que quedan accesibles al ataque. Los detritos frescos se encuentran normalmente protegidos por diferentes materiales, como la corteza de lignina en vegetales y los exoesqueletos animales. Los mayores responsables de la fragmentación en ecosistemas naturales son los distintos animales vertebrados e invertebrados del suelo.

Por último, en la alteración química cabe mencionar los principales agentes que la producen, que son los hongos, las bacterias y los animales propios del suelo, que componen la microfauna (ej. protozoos y amebas), la mesofauna (de 0,1 a 2 mm de medida) y la macrofauna (ej. gusanos y termitas). Gran parte de la descomposición ocurre cerca de la superficie del suelo.

3.2.2. Factores que controlan la descomposición

3.2.2.1. Temperatura del suelo

A escala global, la respiración del suelo está influenciada por las temperaturas y precipitaciones medias anuales, y la interacción entre estas dos variables (Raich *et al.*, 1992).

La temperatura del suelo es uno de los factores que tiene mayor importancia sobre el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos edáficos. Así, a medida que se eleva la temperatura se aceleran las reacciones químicas y enzimáticas, por lo que el crecimiento y el metabolismo de la biomasa serán más rápidos en general. Por tanto, un aumento en la temperatura del suelo incrementa la tasa de mineralización con el siguiente descenso de las reservas de carbono orgánico del suelo.

La temperatura afecta a la descomposición directamente promoviendo la actividad microbiana e indirectamente alterando la humedad del suelo y la calidad de los *inputs* de materia orgánica. La actividad microbiana del suelo normalmente responde de manera exponencial a la temperatura duplicando, aproximadamente, la actividad por cada 10 grados de incremento (Sinclair, 1992). Además, los procesos de congelación y deshielo estimulan la descomposición por rotura física de los agregados del suelo.

Los estudios de campo que se han realizado para investigar estas relaciones normalmente relacionan la variación diaria y/o estacional de la respiración con las variaciones de la temperatura (Boone *et al.*, 1998; Davidson *et al.*, 1998; Leirós *et al.*, 1998; Rey *et al.*, 2002).

3.2.2.2. Humedad del suelo

El contenido de agua del suelo es otra importante variable para predecir la descomposición de la materia orgánica y la formación de gases de efecto invernadero asociada a ella. La sequía en el suelo limita la actividad fisiológica de los microorganismos y la difusión de nutrientes en el espacio poroso del suelo (Harris, 1981; Robertson *et al.*, 1997). De forma general puede indicarse que la actividad metabólica disminuye en el suelo cuanto éste se seca por debajo de un determinado límite, y que cuando hay un exceso de agua la actividad metabólica también desciende debido a la sustitución de las poblaciones aeróbicas por anaerobios facultativos/obligados y a la limitación de la difusión del oxígeno (Rodrigo *et al.*, 1997).

La relación entre agua del suelo y procesos microbianos es compleja, ya que las características de los suelos van a afectar de manera importante a los distintos procesos físicos (movimiento de agua, difusión de gases, difusión de solutos, supervivencia y movimiento de la microbiota).

En general, la acumulación de carbono es mayor en suelos muy húmedos ya que la descomposición está restringida por altos valores de humedad. Tanto los organismos descomponedores como las plantas son más productivos bajo condiciones de humedad intermedias, donde cuentan con disponibilidad de suficiente oxígeno. La tasa de descomposición generalmente decae a valores menores de 30 a 50% de humedad del suelo (Haynes, 1986), debido a una reducción en el espesor de las películas de humedad sobre la superficie del suelo y, por tanto, una disminución en la velocidad de difusión de los sustratos a los microbios.

En zonas áridas, la actividad microbiana está frecuentemente limitada por la humedad (Austin *et al.*, 2004), por lo que la tasa de mineralización está ligada a los pulsos de precipitación (Fisher *et al.*, 1987) y entrada de materia orgánica; las sequías periódicas resultan en biomasa microbiana muerta que sirve a su vez de reservorio (Whitford, 2002) y dejan disponibles nutrientes para las plantas u otros organismos.

Episodios de cambios en la humedad, como pueden ser tormentas, o la formación y evaporación del rocío, pueden influir en la descomposición, estimulándola si los ciclos son infrecuentes. Por el contrario, si estos episodios se repiten asiduamente, la población de microorganismos del suelo se reduce (por agotamiento de oxígeno), por lo que la velocidad de descomposición también (Schimel, 1994). Una periodicidad baja de cambios en la humedad tiende a su vez a estimular la descomposición de sustratos lábiles (ej. hemicelulosa), retardando la descomposición de materiales recalcitrantes como la lignina (Haynes, 1986).

3.2.2.3. Propiedades del suelo

a) pH

En las mismas condiciones, la descomposición ocurre más rápidamente en suelos neutros que en ácidos, debido a diferentes factores. El aumento en la cantidad de bacterias y en la descomposición a valores de pH altos refleja la complejidad de la interacción de los factores, incluyendo cambios en las especies vegetales, y por tanto, en la cantidad y calidad del mantillo. Pero, independientemente de las especies vegetales y las causas de acidificación del suelo, bajos valores de pH tienden a estar asociados con bajas tasas de descomposición.

b) Contenido de arcillas

Los materiales arcillosos reducen la tasa de degradación de materia orgánica, incrementando el contenido orgánico en el suelo. Además, con un nivel humedad moderada, los materiales arcillosos mejoran la acumulación de la MOS, capturándola y quedando menos accesible al ataque de enzimas microbianas y aprisionando dichas enzimas, reduciendo su efectividad para degradar sustratos.

Esta captura se produce por la alta densidad de zonas cargadas negativamente en los minerales arcillosos, que atraen las cargas positivas de la materia orgánica, reduciendo la velocidad de descomposición.

3.2.2.4. Alteraciones del suelo

Los cambios en el suelo promueven la descomposición aireando y exponiendo nuevas superficies al ataque microbiano. El mecanismo de alteración se produce a diferentes escalas, desde el movimiento de gusanos hasta la labranza de suelos agrícolas. La ruptura de los agregados del suelo deja la materia orgánica expuesta al oxígeno y la colonización microbiana.

La conversión de tierras forestales y pastos a superficie arable ha supuesto una pérdida significativa del carbono orgánico previamente almacenado en el suelo y una liberación a la atmósfera de CO₂. En las últimas décadas se ha demostrado que determinadas prácticas agrícolas pueden ayudar en gran medida a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. El laboreo de conservación es una práctica con un impacto beneficioso en la fijación de carbono, una de las prácticas agronómicas más representativa dentro de la agricultura de conservación es la siembra directa, en ella la supresión de las labores mecánicas sobre el suelo es total. La inversión del suelo por la acción del laboreo altera las condiciones microclimáticas del suelo modificando la temperatura y el contenido de humedad e incrementando la capacidad de aireación. Por tanto, el laboreo crea mejores condiciones para la actividad de los microorganismos heterótrofos causantes de la descomposición del carbono orgánico del suelo, además, es causa principal de la rotura de los agregados del suelo por lo que se libera el carbono orgánico que estaba protegido del ataque de los microorganismos.

3.2.2.5. Composición de la materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo (MOS) comprende una acumulación de materiales vegetales y restos animales parcialmente desintegrados junto con otros compuestos orgánicos sintetizados por los microorganismos edáficos.

La calidad del carbono de los sustratos del suelo puede condicionar las tasas de descomposición. Así, estas tasas de descomposición pueden verse incrementadas hasta 10 veces en un determinado clima por diferencias en la calidad del sustrato. Por ejemplo, las carcasas de los animales se descomponen más rápidamente que las plantas, y las hojas más rápidamente que la madera, a su vez, las hojas de vegetación caduca tienen una tasa de descomposición mayor que las de hoja perenne.

Tanto la calidad como la edad de la materia orgánica del suelo influyen en la velocidad de la descomposición. Conforme los residuos presentes se descomponen, la tasa decae porque los microorganismos consumen primero los sustratos más lábiles, dejando progresivamente más componentes recalcitrantes en el resto. A través de la fragmentación y estas alteraciones químicas, dichos residuos se convierten en MOS. Conforme los microbios mueren, la quitina y otras sustancias recalcitrantes procedentes de su pared celular pasan a formar parte del mantillo aumentando su proporción y produciendo compuestos húmicos recalcitrantes. La descomposición de la materia orgánica aumenta en respuesta a la adición de nitrógeno, principalmente cuando la materia orgánica consiste en carbono lábil.

La MOS, a grandes rasgos, tiene un tiempo de residencia de 20 a 50 años, aunque puede variar de 1 a 2 en suelos cultivados a cientos de años en ambientes de lenta descomposición.

En la rizosfera, microambiente formado por la interacción entre raíces de las plantas y microorganismos del suelo, la descomposición es más rápida ya que las raíces secretan carbohidratos y absorben nutrientes, por lo que el proceso se acelera. El crecimiento de los microorganismos en la zona de exudación se facilita por la disponibilidad de carbono. La descomposición de la rizosfera, a su vez, se produce más rápido en suelos con bajos niveles de lignina.

La comparación del stock de carbono en suelos bajo uso agrícola y forestal ha mostrado, generalmente, que los suelos forestales contienen más carbono que los suelos agrícolas (Lettens *et al.*, 2005).

Entre las actividades que pueden afectar a la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo es la aplicación de residuos orgánicos en los suelos agrícolas (Lal 1999, 2004; Smith *et al.* 2000), aumentando a la vez el nivel de materia orgánica.

En el caso del CO₂, el tipo de fertilizante (orgánico o inorgánico) tiene gran influencia en los flujos (Ding *et al.*, 2007). La aplicación de nitrógeno mineral generalmente incrementa el flujo de CO₂ (Iqbal *et al.*, 2009), aunque varios autores han demostrado que con una tasa

alta de fertilización los flujos de CO₂ disminuyen, probablemente porque provoca una menor actividad de enzimas (DeForest *et al.*, 2004).

Los fertilizantes nitrogenados orgánicos, como los purines, incorporan nitrógeno y carbono, que generalmente incrementan las emisiones de CO₂, aunque la tasa de mineralización y por tanto, los flujos de CO₂ también dependen de la composición. Los purines, debido a su alto porcentaje de carbono orgánico lábil, generalmente incrementan las emisiones justo después de su aplicación (Chadwick *et al.*, 1998; Flessa and Beese 2000; Chantigny *et al.*, 2001; Bol *et al.*, 2003).

3.2.2.6. Comunidad microbiana

La actividad enzimática del suelo depende de la composición de la comunidad de microorganismos que lo habita y de la naturaleza del suelo. Ya se ha visto anteriormente que los animales afectan fuertemente a la descomposición cambiando la estructura del suelo y fragmentándolo, pero también la composición de la comunidad bacteriana es importante por la producción enzimática, afectando por tanto a la velocidad a la que los sustratos son degradados. La celulosa es el constituyente más abundante del residuo vegetal, y para degradarla se necesitan diferentes tipos de sistemas enzimáticos (Paul y Clark, 1996). Según el consorcio microbiano se ganará energía para realizar una descomposición más efectiva.

La degradación de la lignina se realiza solo por algunos organismos, principalmente hongos, que producen los enzimas necesarios, y solo cuando otras sustancias no lábiles no están disponibles. Por ello se trata de un proceso mucho más lento.

A su vez, el ritmo al que el CO₂ del suelo se transfiere a la atmósfera está controlado por:

- La tasa de producción de CO₂ del suelo (la respiración del suelo).
- La fuerza del gradiente de concentración entre el suelo y la atmósfera.
- Las propiedades del suelo.

A escala global, la respiración del suelo en los ecosistemas terrestres está estimada en 50-75 Pg C/año (Houghton and Woodwell, 1989; Schelesinger, 1977). Las tasas medias de respiración varían entre los diferentes biomas. Las tasas más bajas se encuentran en los biomas más fríos y secos (tundras y desiertos), y las mayores ocurren en los bosques húmedos tropicales, donde la temperatura y la disponibilidad de humedad son altas todo el año.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL

4.1. ENTORNO GEOGRÁFICO Y CARACTERÍSTICAS

La zona donde se centra el estudio se encuentra en el término municipal de Senés de Alcubierre, en la parte noroeste de la comarca de Los Monegros, en el sur de la provincia de Huesca, a una altitud de 390 sobre el nivel del mar. Sus coordenadas son $41^{\circ} 54' 17,08''$ N y $0^{\circ} 30' 1,38''$ W.

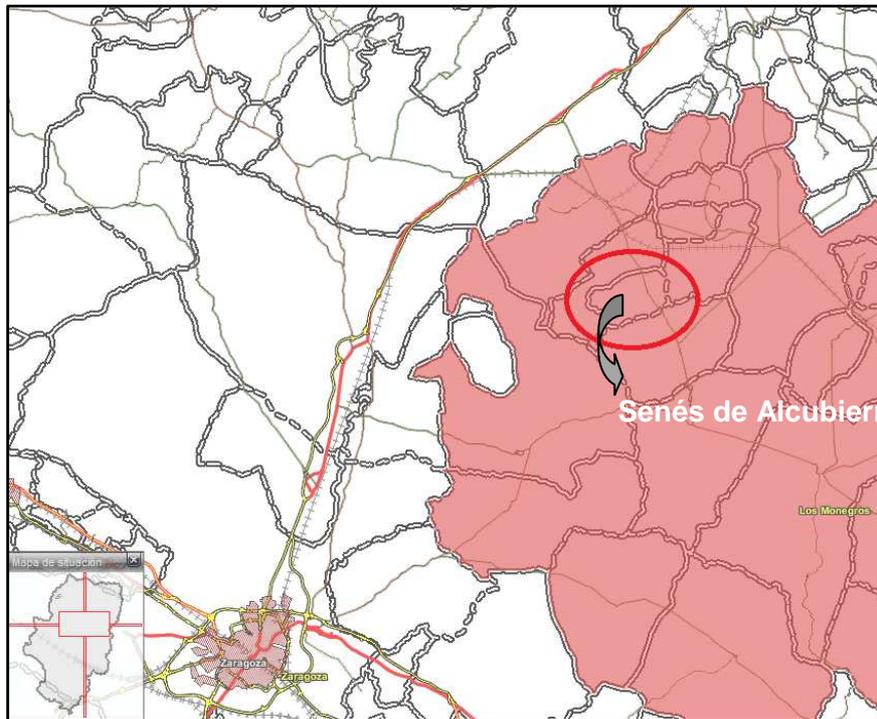


Figura 1. Mapa de la ubicación de Senés de Alcubierre (Fuente: *Sitar*).

4.1.1. Climatología

El clima que engloba a Senés de Alcubierre es un clima continental de influencia mediterránea. La temperatura media anual es de $13,5^{\circ}\text{C}$. Una de sus características es el régimen térmico extremado. Los inviernos suelen ser fríos, con temperaturas que pueden bajar de los -10°C y con veranos calurosos que llegan a rozar los 40°C (Fig.2).

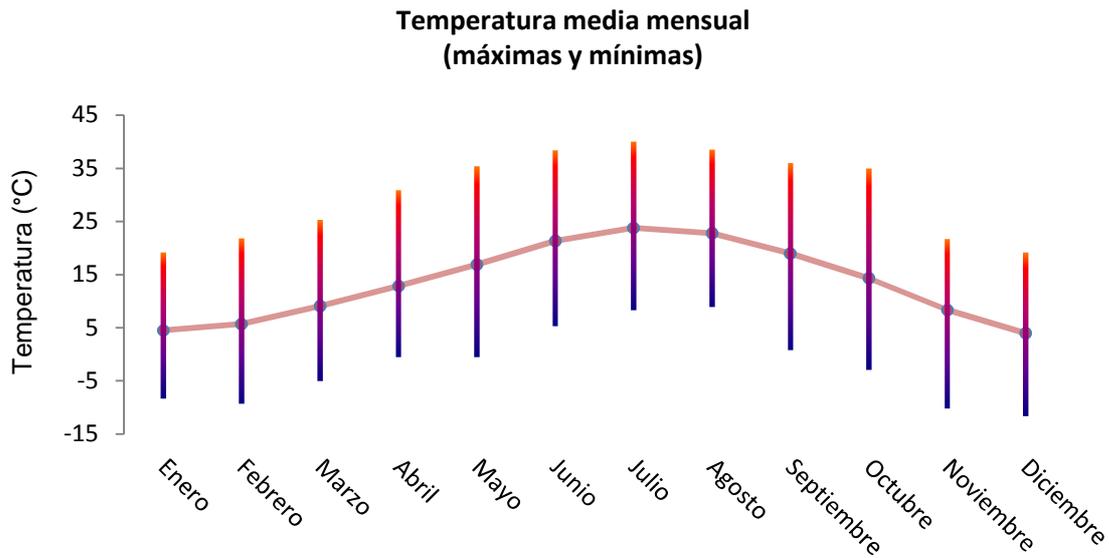


Figura 2. Temperatura media mensual, máximas y mínimas de la zona de estudio.

Por la influencia mediterránea comentada su régimen de precipitaciones es irregular, y se caracteriza generalmente por un déficit hídrico. La media anual de precipitaciones es de 328 mm, centrándose la mayoría de éstas en las estaciones de otoño y primavera (Fig. 3). Por tanto, se trata de una zona en donde las situaciones de sequía y déficit hídrico para los cultivos se pueden alargar varios meses.

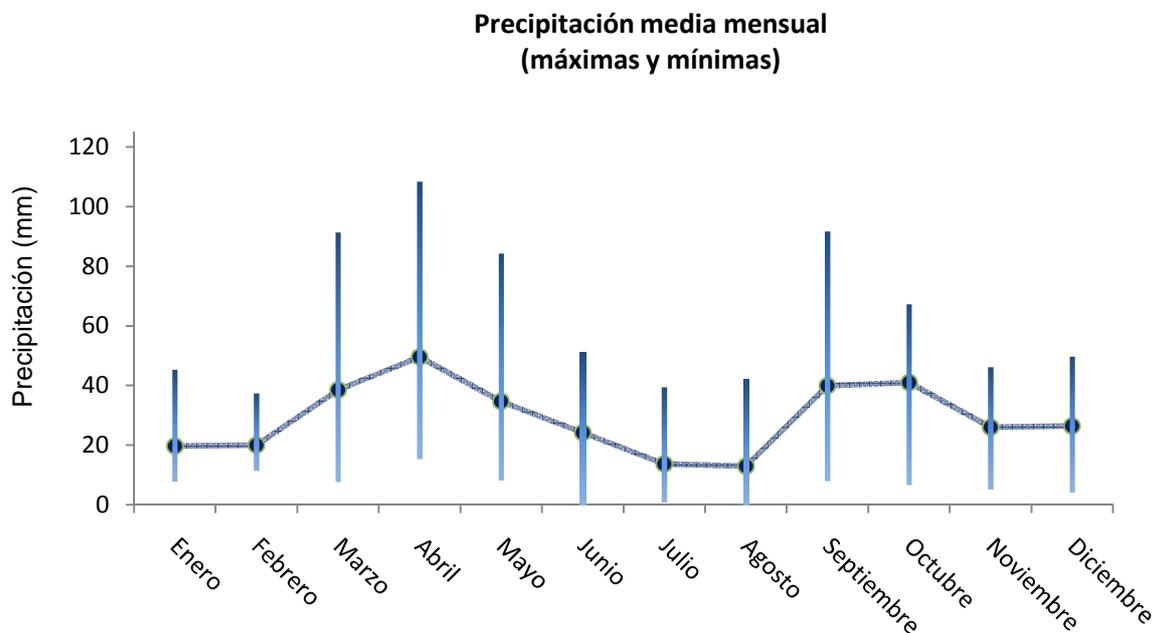


Figura 3. Precipitación media mensual, máximas y mínimas de la zona de estudio

A las débiles lluvias y las grandes diferencias térmicas se une el efecto del viento. El viento más frecuente e intenso es el cierzo, que sopla la mitad de los días del año con dirección

NO-SE y que puede alcanzar los 100 km/hora. Su velocidad facilita la insolación dispersando las nieblas, activando la evaporación y favoreciendo la aridez. La evapotranspiración de referencia media mensual es de 106 mm.

4.1.2. Geología y litología

La región de los Monegros ocupa la parte central de la Depresión del Ebro. Se trata de una zona topográficamente deprimida entre los Pirineos al norte, la Cordillera Ibérica al sur y las Cordilleras Costeras Catalanas al Este. Los materiales dominantes son de edad terciaria y cuaternaria.

Las rocas de Monegros se formaron a partir de sedimentos de carácter continental, depositados en ambientes lacustres, fluviales o de abanicos aluviales, procedentes de las cordilleras que rodeaban la cuenca. Entre las rocas de origen lacustre hay que destacar la abundancia de margas, calizas y yesos.

Los suelos pertenecen a las series de tipología desértica o subdesértica debido a la escasez de precipitaciones, aridez del clima, viento, temperaturas extremas y litología. Todos estos factores se traducen en unos suelos pobres y salinos. Son en general poco permeables dadas las características del sustrato y la fertilidad natural escasa.

4.2. USOS DEL SUELO: ESTUDIO DE RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CAMPO

4.2.1. Características de las parcelas de estudio

Para realizar el estudio de impacto de los diferentes usos del suelo en las emisiones de CO₂ se contó con un mosaico de usos característico de los secanos aragoneses.

- La textura de los suelos de las diferentes parcelas está definida como Franca, Franca limosa con contenido de arcillas que varía entre 20% y 30% y arena menor a 20%. El pH es elevado (mayor de 7,5) debido a un elevado contenido en carbonato cálcico, más del 30%.
- Las conductividades son menores a 2 dS/m mayoritariamente, si bien se pueden encontrar algunas zonas donde estos valores pueden superarse llegando hasta 3 dS/m, siendo zonas ligeramente salinas. Este incremento en la salinidad se produce debido a la presencia de acumulaciones de yeso en zonas concretas del paisaje.
- Los tipos de suelo, según el *Soil Taxonomy*, a los que pertenecen son: Entisoles, Aridisoles e Inceptisoles.

El mosaico de usos está formado por cuatro parcelas con las siguientes características:

- **Campo con cultivo, NT** (por sus siglas en inglés *No Tillage*): se trata de un monocultivo de cebada (*Hordeum vulgare*). Desde los últimos cinco años se realiza

agricultura de conservación bajo siembra directa. Cuenta con una superficie de 330 m².

- **Campo abandonado labrado, AC** (abandonado labrado): la extensión de la parcela es de 115 m² aproximadamente. Se labró en octubre de 2011 con una grada a 10 centímetros de profundidad. Se dejó de sembrar en 2003 y la vegetación crece de manera espontánea, con un 60% de superficie de gramíneas (principalmente *Bromus diandrus*).
- **Campo abandonado inalterado, AU** (por sus siglas en inglés *Uncultivated Abandoned*): en los últimos ocho años no se ha realizado ninguna acción en él; está cubierto en un 80% por diferentes especies de la familia de las Poáceas (principalmente *Hordeum murinum*). El área de la parcela es de 115 m².
- **Zona forestal, FR**: se trata de una zona en la que hace 60 años se realizó una reforestación de pino carrasco (*Pinus Halepensis*). Por debajo del dosel arbóreo no se encuentra apenas vegetación. La superficie forestal es de 330 m².

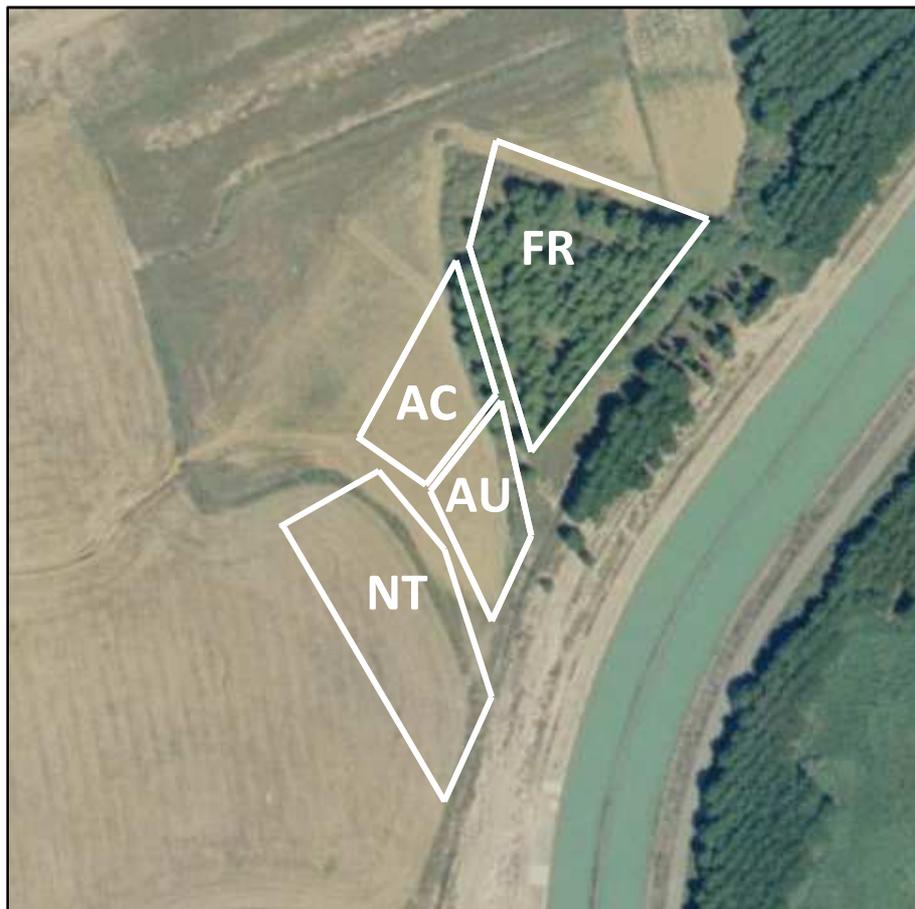


Figura 4. Vista aérea y delimitación de las parcelas.

4.2.2. Análisis de parámetros

Para el estudio de usos del suelo se realizaron un total de diez muestreos en campo, repartidos entre los meses de febrero a mayo del 2012. Los parámetros que se han estudiado son los siguientes:

- Respiración del suelo
- Temperatura del suelo
- Humedad del suelo
- Carbono y nitrógeno orgánico disuelto del suelo
- Carbono de la biomasa microbiana del suelo
- Carbono orgánico del suelo

En cada parcela se tomaron 4 repeticiones, cogiendo siempre datos de emisión de CO₂ del suelo, temperatura y humedad.

4.2.2.1. Respiración del suelo

Las emisiones de CO₂ del suelo fueron medidas mediante un sistema de cámara abierta (modelo CFX-1, PPsystems, Hitchin, Herfordshire, UK) conectado a un analizador de gas por infrarrojos (modelo EGM-4, PPsystems, Hitchin, Herfordshire, UK). Este equipo determina el flujo de salida desde el suelo por la diferencia de concentración de CO₂ entre el aire de entrada y de salida. El aire es aspirado hacia la cámara a través de un puerto en el centro de ésta, a continuación pasa por una chimenea vertical que contiene un medidor de caudal.

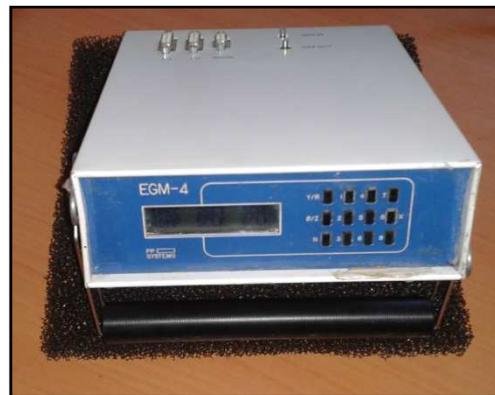


Figura 5. Analizador de gases modelo EGM-4

La cámara tiene un diámetro de 21 cm cubriendo una superficie de 350 cm². Se inserta directamente en el suelo, eliminando previamente la vegetación en el área que cubrirá la cámara, el flujo de aire a través de la cámara fue ajustado a 960 mL/min. Las lecturas de flujo se realizaron 3 minutos después de insertar la cámara en el suelo para evitar inestabilidades del flujo.



Figura 6. Cámara abierta modelo CFX-1

El analizador proporciona los valores de emisión de CO₂ en ppm por lo que son necesarios diferentes cálculos para obtener el resultado en flujo de gas (g C-CO₂/m² h). Estos cálculos son los siguientes:

Ecuación 1.

$$\frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \text{ min}} = \frac{C \times F \times 10000 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2}}{A \times Vm \times 1000 \frac{\text{ml}}{\text{l}}}$$

Donde:

C: concentración de CO₂ (μmol/mol)

F: flujo de la cámara = 960 ml/min.

A: área de la cámara = 350 cm².

Vm: volumen molar del gas ideal = 22,41 L/mol.

Ecuación 2.

$$\frac{\text{g CO}_2}{\text{m}^2 \text{ h}} = \frac{\mu\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \text{ min}} \times M \times \frac{10^{-6} \text{ mol}}{\mu\text{mol}} \times \frac{60 \text{ min}}{\text{h}}$$

Donde:

M: masa molecular CO₂ = 44,01 g/mol

Ecuación 3.

$$\frac{\text{g C} - \text{CO}_2}{\text{m}^2 \text{ s}} = \frac{\text{g CO}_2}{\text{m}^2 \text{ s}} \times \frac{12,01 \text{ g C}}{44,01 \text{ g CO}_2}$$

4.2.2.2. Temperatura del suelo

Las mediciones de temperatura del suelo se realizaron junto al punto de muestreo de la cámara de CO₂, con un termómetro digital TM-65 Crisom, a 5 cm de profundidad.

4.2.2.3. Humedad del suelo

En cada muestreo se tomó una muestra de suelo por repetición a 5 cm de profundidad. El método de determinación de la humedad utilizado fue el gravimétrico, pesando las muestras antes y después de su secado en la estufa durante 24 horas a 105 °C.

4.2.2.4. Carbono orgánico y nitrógeno orgánico disueltos del suelo

A lo largo del estudio se realizaron 3 analíticas de carbono orgánico disuelto (fracción lábil) y nitrógeno orgánico disuelto. Las muestras de suelo se tomaron en los primeros 5 cm de profundidad. El procedimiento para determinación consistió en pesar 10 gramos de suelo y añadirle 50 ml de agua, someterlo a agitación durante 2 horas y centrifugación durante 15 minutos y posteriormente a un filtrado con filtros Whatman nº 42. Por último se determinó su concentración mediante un analizador TOC-5050 A Shimadzu.

4.2.2.5. Carbono de la biomasa microbiana del suelo

La determinación del carbono de la biomasa microbiana se realizó mediante el método de Fumigación-Extracción según Vance *et al.* (1987).

La fumigación con cloroformo provoca la muerte de las células microbianas del suelo por la rotura de las membranas celulares, con lo que el contenido citoplasmático de las células microbianas es vertido al suelo, de donde puede ser extraído con K₂SO₄ (Powlson y Jenkinson, 1976) y ser cuantificados los distintos componentes. Por ello, este método consta de tres fases: fumigación con cloroformo libre de etanol, extracción con sulfato de potasio y determinación analítica del carbono de la biomasa.

Las muestras de suelo se pesan y se colocan dentro de un desecador de vacío en el que se introduce papel húmedo y un vaso con cloroformo libre de etanol. Se aplica vacío mediante una bomba para que el cloroformo empiece a hervir, se cierra la llave del desecador y se deja incubar durante 24 horas en la oscuridad. Tras la incubación se abre la llave del desecador y se aplica vacío en rondas unas 5 o 6 veces, hasta que desaparece el olor a cloroformo. Al mismo tiempo se preparan muestras control no fumigadas, en ellas la extracción se produce directamente, sin realizar incubación.

Las muestras de suelo (fumigadas y control) se transfieren a botes de plástico, a los que se añadirá 200 ml de K₂SO₄ y se agitarán durante 30 minutos, tras lo cual las suspensiones son filtradas con filtros Whatman realizando el vacío.

La determinación del carbono de la biomasa se realizó mediante un analizador TOC-5050 A Shimadzu. Por diferencia de valores se obtienen los correspondientes a la biomasa.

4.2.2.5. Carbono orgánico total del suelo

Los valores de carbono orgánico total se cuantificaron mediante un analizador elemental de carbono y nitrógeno LECO RC-612.

4.3. USOS DEL SUELO: ESTUDIO DE INCUBACIONES EN LABORATORIO

Paralelamente al estudio de los diferentes usos del suelo en el campo se realizó un estudio de los mismos bajo condiciones controladas en el laboratorio mediante incubaciones, con el fin de determinar el potencial de mineralización de cada uno de ellos.

Para ello, se tomaron muestras de suelo, que fueron tamizadas (2 mm), pesadas, humedecidas a capacidad de campo e introducidas en una incubadora a 25°C en diferentes botes de 500 ml de volumen.

La capacidad de campo representa el contenido de humedad del suelo cuando el agua que contiene deja de fluir por gravedad, ocurre cuando no existe agua libre en el suelo.

Para determinar dicha capacidad en primer lugar se tamizaron las muestras de suelo y se dejaron secar al aire. Una vez libres de humedad, se pesaron 50 gramos de cada una y se incorporaron en tubos de ensayo. A continuación, se añadió agua hasta que las columnas del suelo se encontraron totalmente humedecidas y se taparon con parafilm para dejarlas reposar durante 24 horas. Por último, se sacó una muestra de la parte media de la columna y se determinó su contenido de humedad por el método descrito en el punto 4.2.2.3. Este contenido de humedad es igual al valor de capacidad de campo.

El volumen de CO₂ producido por los suelos fue medido extrayendo una alícuota de 5 ml de gas de los botes tapados herméticamente, utilizando una jeringuilla e inyectándola directamente en el analizador de gases por infrarrojos descrito en el punto 4.2.2.1.,(modelo EGMM-4, PPSystems, Hitchin, Herfordshire, UK). Las alícuotas se tomaron 30, 90 y 150 minutos después de cerrar los botes, en un total de 19 muestreos durante 113 días.



Figura 7. Muestras de suelo en incubación y tapadas herméticamente.

Los parámetros necesarios para interpretar los resultados de las incubaciones son los siguientes:

- Respiración basal: indica la actividad microbiana total, se trata de la media del carbono mineralizado diariamente por kilogramo de suelo durante la incubación.
- Coeficiente metabólico (q_{CO_2}): se define como la tasa de respiración (medida como CO_2 desprendido) por unidad de biomasa microbiana (Anderson y Domsch, 1985). Es el cociente entre la respiración basal y el carbono de la biomasa.
- Coeficiente de mineralización (q_{mC}): indica la parte del carbono orgánico total que se ha mineralizado durante la incubación (Pinzari *et al.*, 1999). Se calcula dividiendo la respiración basal por el carbono orgánico total.
- Carbono potencialmente mineralizable (C_o) y tasa de mineralización (k): para describir la cinética del acumulación de CO_2 emitido se utilizó un modelo no lineal de primer orden utilizando el software Sigma Plot:

Ecuación 4.

$$C = C_o (1 - e^{-kt})$$

Donde:

C: carbono mineralizado (mg C- CO_2 /kg suelo seco).

C_o : carbono potencialmente mineralizable (mg C- CO_2 /kg suelo seco).

K: constante de mineralización ($días^{-1}$).

t: días de incubación.

4.4. FERTILIZACIÓN NITROGENADA: ESTUDIO DE LA RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CAMPO A CORTO PLAZO

Para realizar este estudio se utilizaron unas parcelas próximas a las utilizadas para el estudio de usos del suelo. El sistema de cultivo consistió en un monocultivo de cebada bajo siembra directa.

- Parcela 1: control. En ella no se aplicó ningún tipo de fertilizante.
- Parcela 2: nitrógeno mineral a razón de 75 kg N/ha y en forma de sulfato amónico (21,5%).
- Parcela 3: purín de cerdo de engorde a razón de 75 kg N/ha mediante calibrado previo de la cuba aplicadora de purín.

La composición del purín utilizado es la siguiente:

Tabla 1. Principales características del purín.

Materia seca	Nitrógeno Kjendahl	Nitrógeno amoniacal	Carbono total
2 % s.m.f.	3,42 % s.m.s.	12,31 % s.m.s.	38,7 %

Las medidas de emisiones de CO₂ se tomaron antes y después de la aplicación de los diferentes fertilizantes, acompañadas de muestreos de temperatura del suelo, humedad del suelo, carbono orgánico soluble y nitrógeno orgánico soluble del suelo. La secuencia temporal de los muestreos es la siguiente:

- 1 h antes de la aplicación
- 1,50 h después de la aplicación
- 5 h después de la aplicación
- 71 h después de la aplicación

5. RESULTADOS

Los diferentes datos obtenidos durante los muestreos, tanto en campo como en laboratorio, han sido procesados estadísticamente con el objetivo de comparar el comportamiento de los parámetros estudiados. En los siguientes apartados se muestran los resultados de los análisis de varianza que han sido realizados para conocer qué diferencias existen entre los distintos suelos (tanto en el estudio de usos del suelo como en el de las aplicaciones nitrogenadas). En los factores en los que se han encontrado diferencias significativas se ha realizado análisis de separación de medias mediante el método Tukey. Por último, se presentan las regresiones lineales que se han elaborado para conocer las posibles interacciones entre los distintos factores con la respiración del suelo.

5.1. USOS DEL SUELO: ESTUDIO DE LA RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CAMPO

5.1.1. Temperatura del suelo

El análisis de varianza realizado mostró diferencias significativas, a un nivel de significación de 0,05, de la temperatura del suelo entre los diferentes usos y fechas (tabla 2). El campo abandonado inalterado (AU) fue el que mayor temperatura alcanzó, con una media de aproximadamente 11 °C (figura 8). Entre el suelo correspondiente al monocultivo de cebada (NT) y el de barbecho labrado (AC) no existieron diferencias significativas, con una media de 9 °C. El suelo del uso forestal (FR) es el que mostró la menor temperatura de suelo con un valor medio de 8°C.

Tabla 2. Análisis de varianza de la temperatura del suelo para los diferentes usos y fechas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	3	$2,20^{-16}$
FECHA	9	$2,20^{-16}$
USO:FECHA	27	$2,20^{-16}$

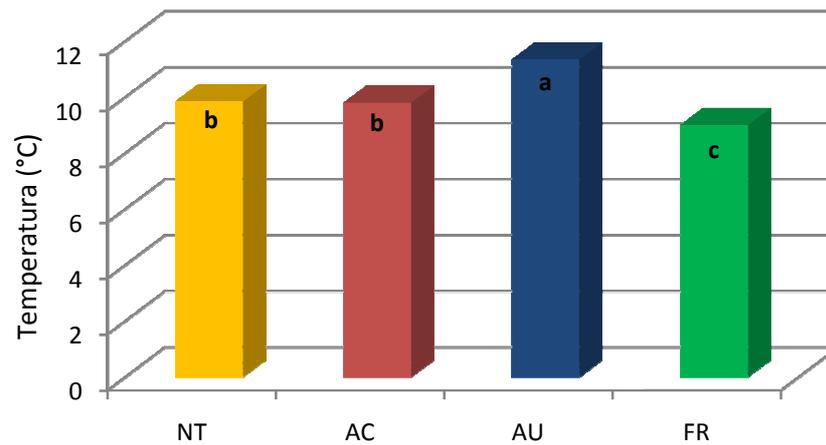


Figura 8. Temperatura del suelo media para cada uso (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

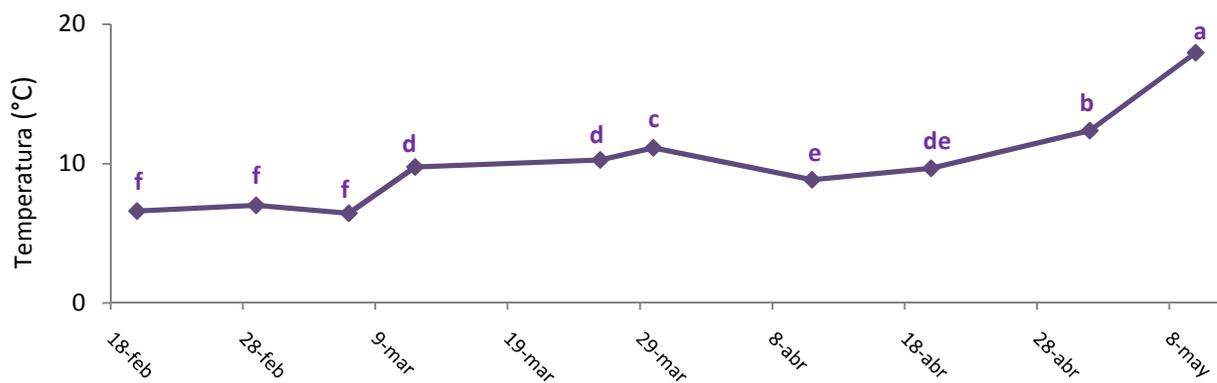


Figura 9. Temperatura media del suelo para cada día de muestreo. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre días, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

A su vez, se observaron diferencias significativas de la temperatura entre fechas de muestreo. Así, tal y como se observa en la figura 9, la temperatura se incrementó a lo largo de los meses.

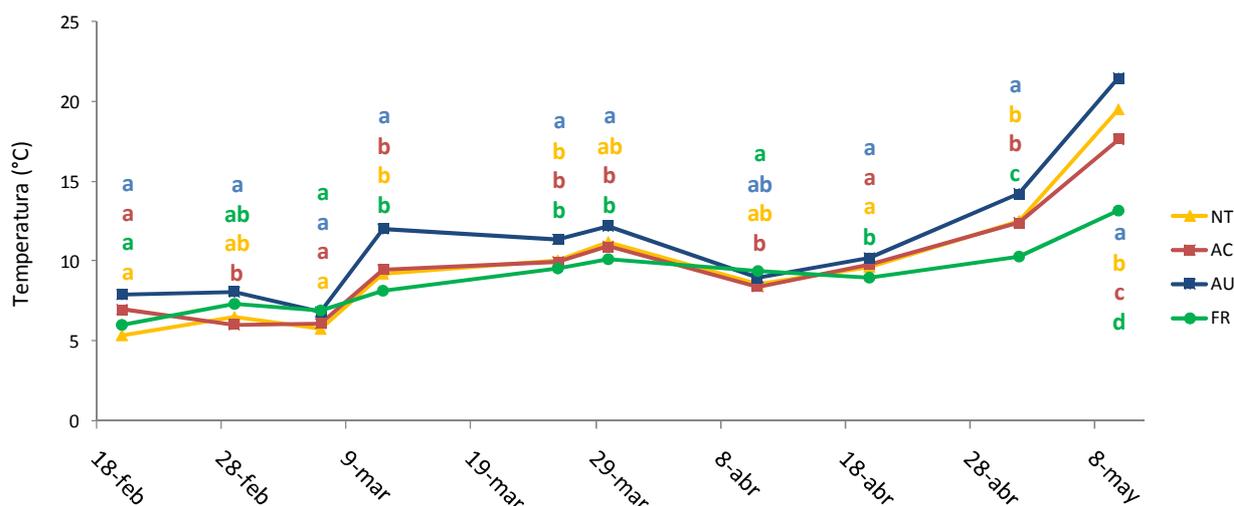


Figura 10. Temperatura media del suelo por uso y día (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre usos del suelo para cada fecha, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

En la figura 10 se pueden observar las diferencias entre días y usos del suelo. En la mayoría de los casos las temperaturas más altas correspondieron al uso AU y las más bajas a FR. Conforme pasaron los días de muestreo, las temperaturas en los distintos usos aumentaron, siendo el mes de mayo el que registró las temperaturas más altas, que se observaron en AU, AC y NT, mientras que el uso FR mostró un incremento menor y alcanzó menos temperatura.

5.1.2. Humedad del suelo

Para un nivel de significación de 0,05 se encontraron diferencias de humedad del suelo entre los diferentes usos y los distintos días de muestreo (tabla 3). El uso forestal es el que mostró un mayor contenido de humedad, con una media superior al 19%. El suelo destinado al cultivo de cebada obtuvo un valor de humedad del suelo menor (11,5 %), pero superando al resto de usos, AC y AU, que obtuvieron contenidos de humedad del 9,8 y 10,3%, respectivamente.

Tabla 3. Análisis de varianza de la humedad del suelo para los diferentes usos y fechas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	3	2,20 ⁻¹⁶
FECHA	9	2,20 ⁻¹⁶
USO:FECHA	27	5,01 ⁻⁰⁵

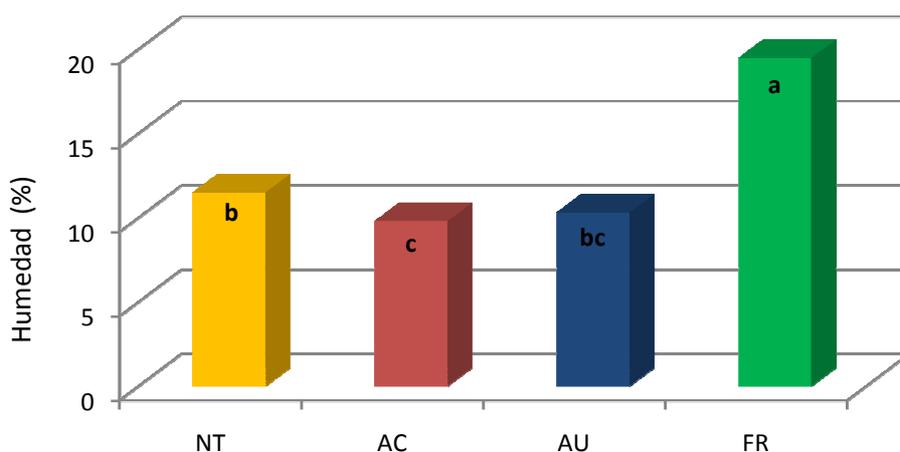


Figura 11. Humedad del suelo media para cada uso (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

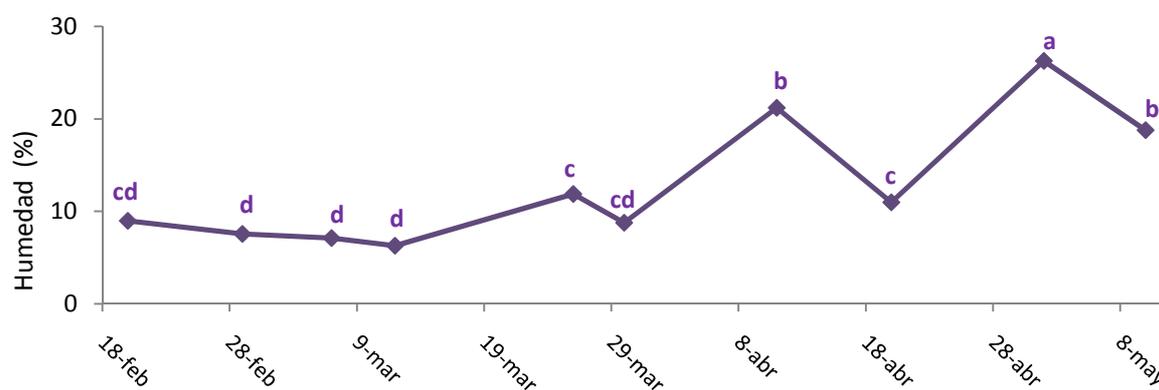


Figura 12. Humedad del suelo media de cada día de muestreo. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre días, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

El contenido de humedad de los diferentes usos fue constante los dos primeros meses del estudio, pero a partir de abril se observan picos (Figura 12) que muestran valores significativamente diferentes al resto, y que coinciden con diferentes episodios de precipitaciones propios del periodo primaveral (figura 3).

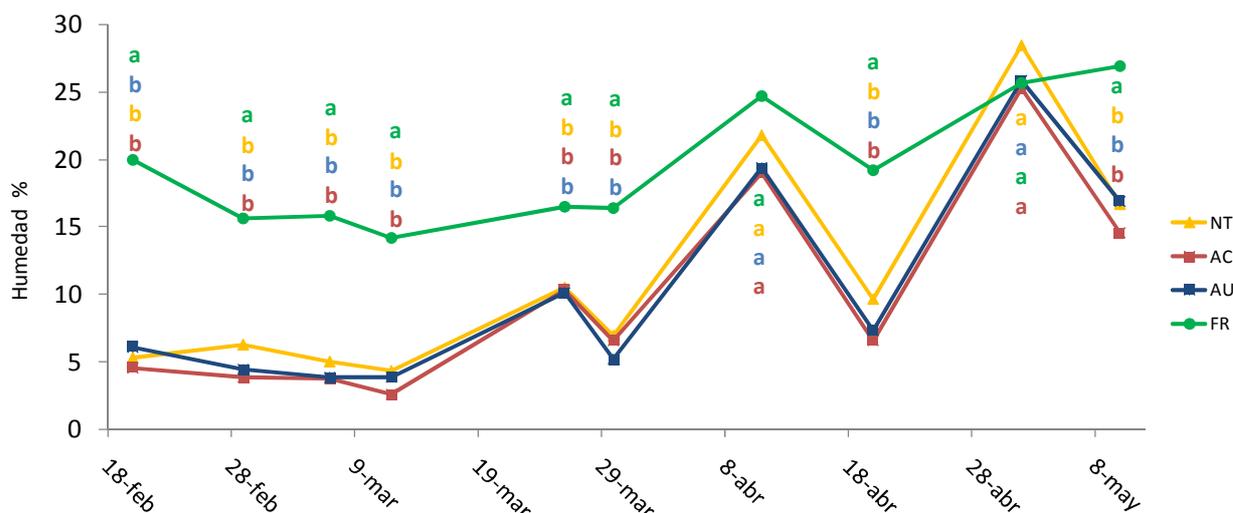


Figura 13. Humedad del suelo media por uso y día (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre usos del suelo para cada fecha, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

En la figura 13 se puede observar que el suelo forestal (FR) mostró variaciones menores en el contenido de humedad que el resto. Dicho suelo cuenta la mayoría de los días con un valor significativamente diferente y más alto que el resto de usos. NT, AC y AU no muestran diferencias en el contenido de humedad entre ellos en los diferentes días de muestreo.

5.1.3. Carbono orgánico disuelto del suelo

El análisis de varianza referente al carbono orgánico del suelo solo mostró diferencias significativas entre los diferentes suelos. A un nivel de significación de 0,05 su comportamiento es igual en las diferentes fechas (tabla 4). El suelo cultivado con cebada (NT), el suelo abandonado labrado (AC) y el abandonado inalterado (AU) mostraron contenidos de carbono orgánico disuelto similares entre ellos, de 0,08 mg C g⁻¹ suelo seco, siendo el suelo perteneciente al uso forestal el que presentó una cantidad de carbono orgánico disuelto mayor y significativamente diferente al resto, con un valor de 0,19 mg C g⁻¹ suelo seco (figura 14).

Tabla 4. Análisis de varianza de carbono orgánico disuelto para los diferentes usos y fechas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	3	3,097 ⁻⁰⁶
FECHA	2	0,7524
USO:FECHA	27	0,9458

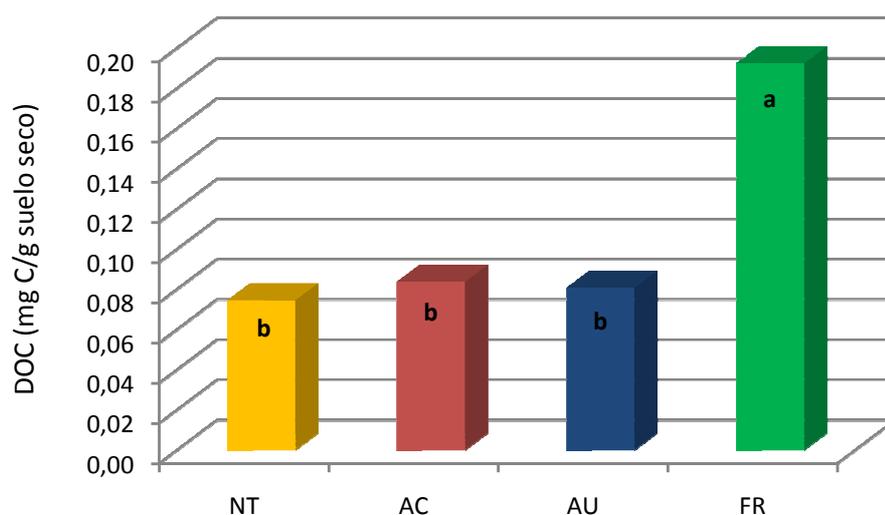


Figura 14. Carbono orgánico disuelto (DOC) para cada uso (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

5.1.4. Nitrógeno orgánico soluble del suelo

Entre los suelos estudiados solo existieron diferencias significativas en el contenido de nitrógeno orgánico soluble entre los diferentes usos. Por tanto, al igual que para el carbono soluble, no existieron diferencias en el nitrógeno orgánico soluble a lo largo del tiempo de estudio (tabla 5). El suelo con mayor nitrógeno soluble resultó el correspondiente al monocultivo de cebada, con valores medios de 0,022 mg N por g suelo seco; este valor es semejante al del uso AC (campo abandonado labrado), que a su vez mostró similitudes en los valores de nitrógeno orgánico disuelto con el uso forestal y el abandonado inalterado, con valores de medios de 0,01 mg de nitrógeno por gramo de suelo seco.

Tabla 5. Análisis de varianza de nitrógeno orgánico soluble del suelo para los diferentes usos y fechas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	3	0,007
FECHA	2	0,6605
USO:FECHA	27	0,3189

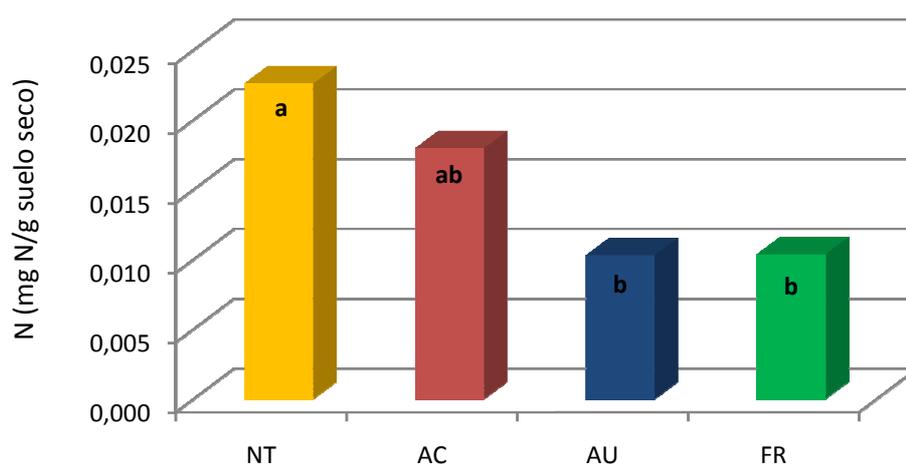


Figura 14. Nitrógeno orgánico disuelto (N) del suelo para cada uso (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

5.1.5. Carbono de la biomasa microbiana del suelo

Para un nivel de significación del 0,05 existieron diferencias entre las medias del carbono de la biomasa microbiana entre los diferentes suelos y las diferentes fechas (tabla 6). El mayor contenido de dicho carbono se observó en el suelo destinado al uso forestal, que contó con 0,42 mg C biomasa/g suelo seco. La parcela labrada y la abandonada mostraron un comportamiento similar, con valores de 0,35 mg C biomasa/g suelo seco. El valor más bajo fue el del campo de cebada, que mostró similitudes con los dos últimos (figura 16).

Tabla 6. Análisis de varianza del carbono de la biomasa microbiana para los diferentes usos y fechas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	3	0,079
FECHA	2	3,099 ⁻⁰⁵
USO:FECHA	27	0,1574

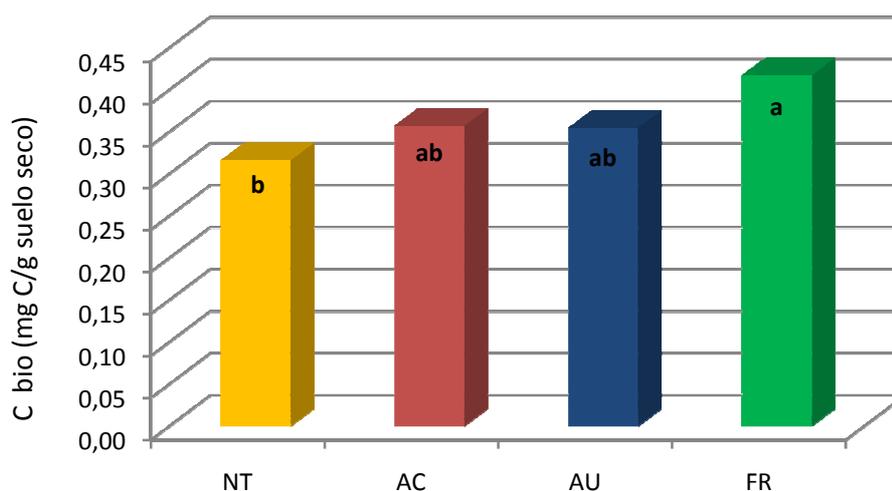


Figura 16. Carbono de la biomasa microbiana del suelo (C_{bio}) para cada uso (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

A su vez, el contenido de carbono de la biomasa microbiana mostró variaciones a lo largo de los días de muestreo, siendo los meses de marzo y abril los que muestran los valores más altos y similares entre sí (figura 17).

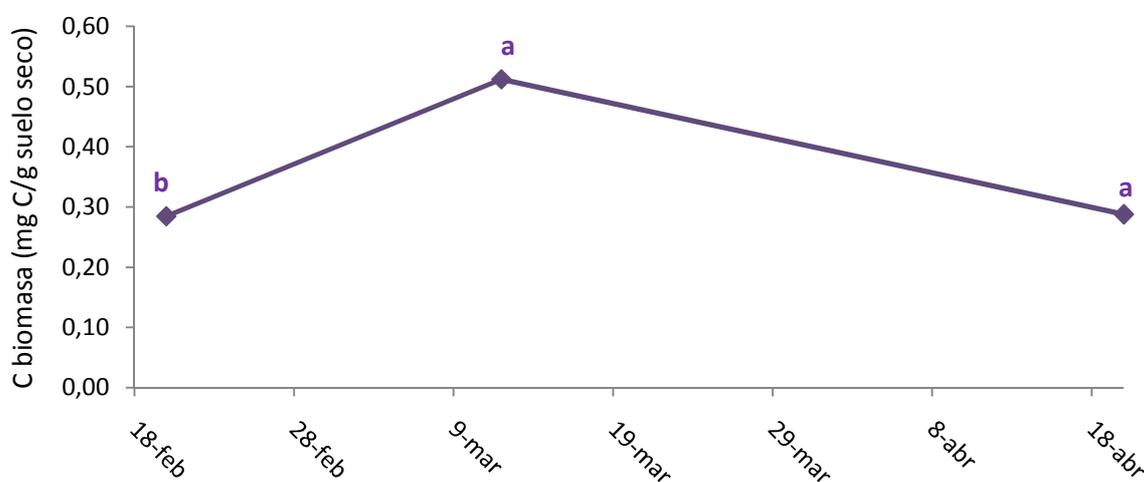


Figura 17. Carbono de la biomasa microbiana del suelo (C_{bio}) media para cada día de muestreo. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre días, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

5.1.6. Carbono orgánico total del suelo

Se observaron diferencias significativas en la cantidad de carbono orgánico total del suelo para los diferentes usos (tabla 7). La concentración de carbono orgánico total fue similar en los diferentes usos del suelo, con valores que oscilaron entre el 1 y el 1,6% exceptuando el

suelo forestal que mostró valores significativamente más altos que el resto de aproximadamente del 3,5% (figura 18).

Tabla 7. Análisis de varianza de carbono orgánico total del suelo para los diferentes usos.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	3	9,344 ⁻⁰⁴

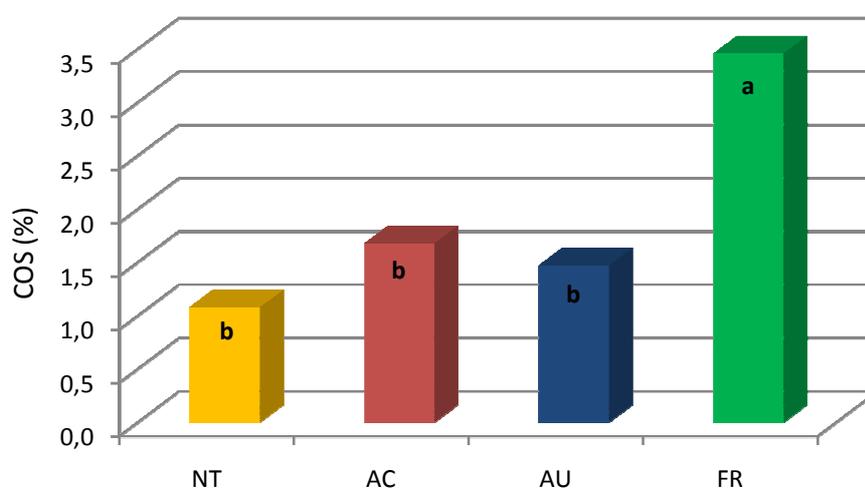


Figura 18. Carbono orgánico total del suelo (COS) para cada uso (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

5.1.7. Respiración del suelo

El test de varianza determinó diferencias significativas en la respiración del suelo entre los diferentes usos, los diferentes días de muestreo y a su vez en la interacción de estas dos, habiendo diferencias del comportamiento de los diferentes suelos entre las fechas en las que se realizó el estudio (tabla 8).

Tabla 8. Análisis de varianza de la respiración del suelo en los diferentes usos y fechas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	3	2,20 ⁻¹⁶
FECHA	9	2,20 ⁻¹⁶
USO:FECHA	27	2,20 ⁻¹⁶

En cuanto a las diferencias en la respiración del suelo entre los diferentes usos, el suelo abandonado labrado (AC) mostró una mayor respiración, siendo la media de emisión de $0,06 \text{ g de carbono de } \text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. El suelo perteneciente a la parcela en abandono inalterado (AU) obtuvo valores menores que el uso AC, pero significativamente superiores al resto de usos del suelo. Los dos suelos restantes, correspondientes al monocultivo de cebada (NT) y al forestal (FR), mostraron un comportamiento diferente a los demás usos pero similares entre ellos, contando con los niveles más bajos de emisión media (aproximadamente de $0,03 \text{ g C de } \text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) (figura 19).

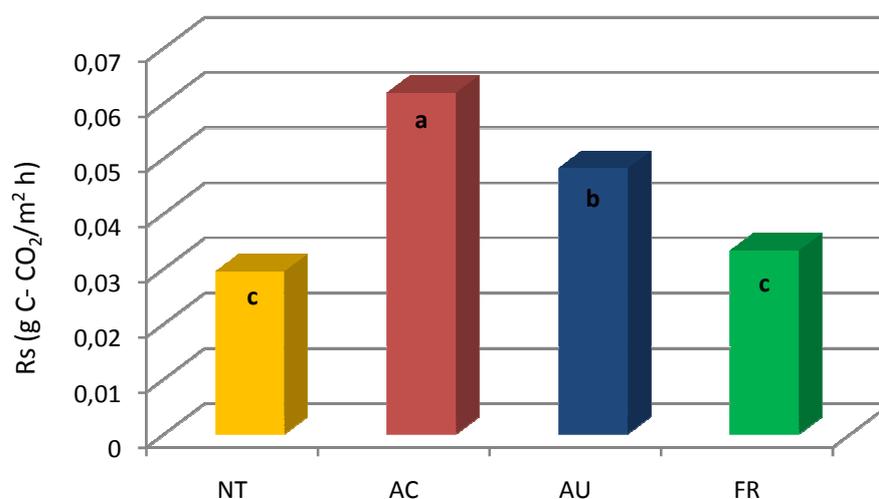


Figura 19. Respiración del suelo (Rs) media para cada uso (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

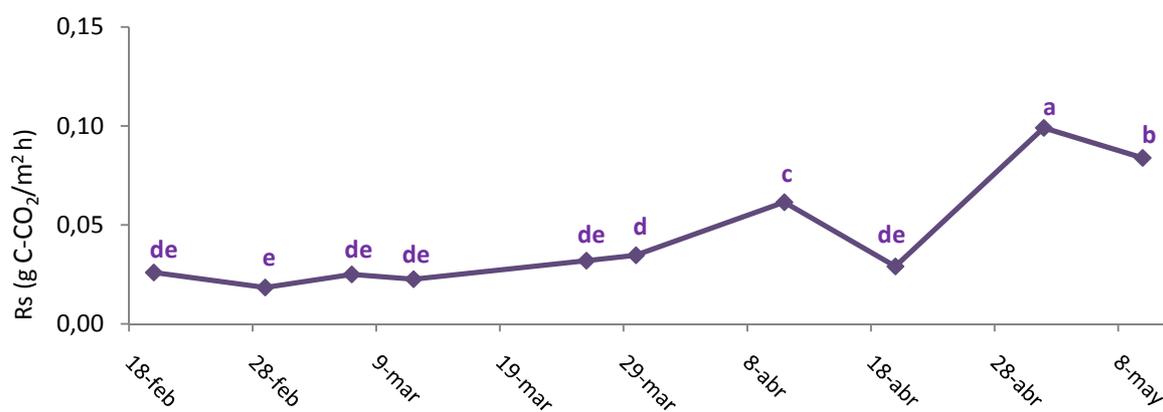


Figura 20. Respiración del suelo (Rs) media para cada día de muestreo. Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

En conjunto, las emisiones medias de dióxido de carbono fueron diferentes conforme avanzaron los días en el estudio, siendo en los últimos meses donde se encontraron los valores más elevados (figura 20).

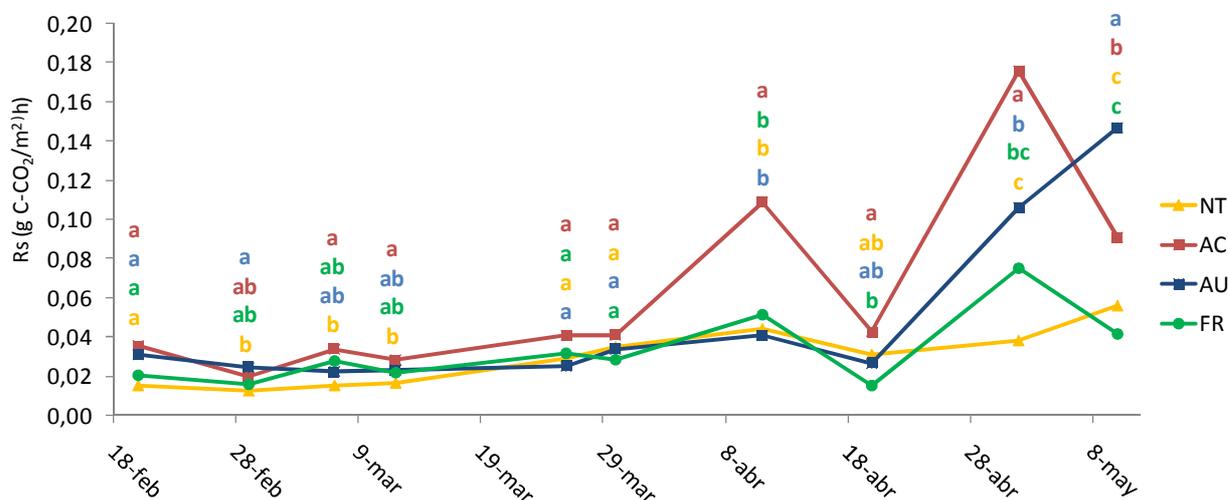


Figura 21. Respiración del suelo (Rs) media por uso y día (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre usos del suelo para cada fecha, por método Tukey para un nivel

En la mayoría de los días de muestreo el uso AC (suelo abandonado labrado) obtuvo las mayores emisiones de CO₂, que fueron en muchos casos diferentes a las de los demás usos. En la figura 21 se pueden observar que en los dos primeros meses de estudio las emisiones se mantienen similares entre usos y es a partir de marzo donde se obtienen valores diferentes, con dos picos de emisión claramente diferenciados en AC los días 11 de abril y 2 de mayo.

5.1.8. Relaciones entre parámetros estudiados

En el presente apartado se muestra las relaciones obtenidas entre las emisiones de CO₂ y el resto de parámetros estudiados.

Relaciones entre los valores totales obtenidos

Según la tabla 9, las emisiones de CO₂ del suelo se relacionaron tanto con la temperatura como con la humedad del suelo, con un nivel de significación menor del 0,001. En las siguientes figuras se muestran estas relaciones mediante diagramas de dispersión con la recta de regresión del modelo lineal en los casos significativos.

Tabla 9. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los diferentes parámetros estudiados.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R ²)	Significación
Temperatura del suelo	0,3228	***
Humedad del suelo	0,2168	***
Carbono orgánico disuelto del suelo	7,461 ⁻⁷	n.s
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,02417	n.s
Carbono de la biomasa microbiana	4,583 ⁻⁵	n.s
Carbono orgánico total del suelo	0,0086	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

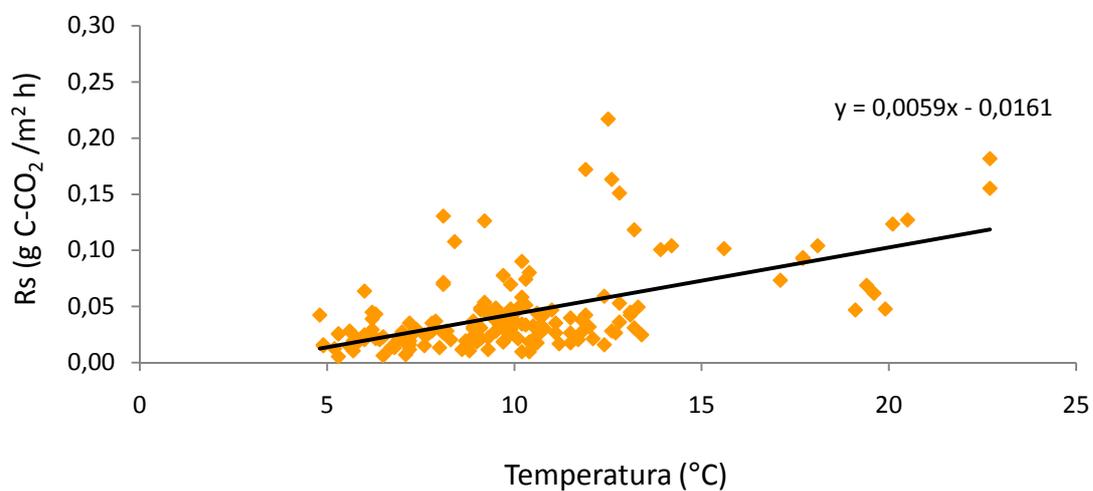


Figura 22. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la temperatura del suelo.

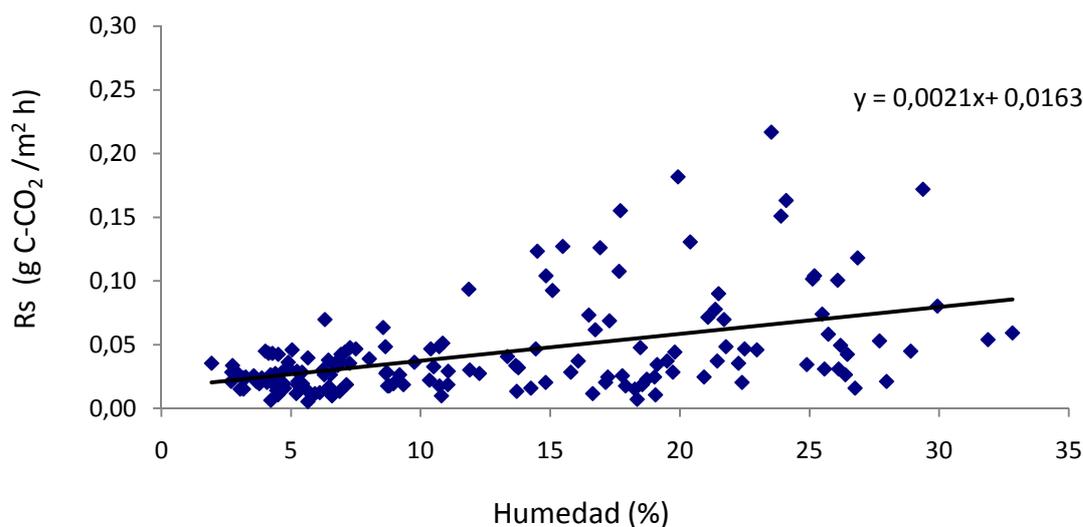


Figura 23. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la humedad del suelo.

Relaciones entre los valores obtenidos para cada uso del suelo

Cebada en siembra directa (NT)

Tabla 10. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en NT.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R ²)	Significación
Temperatura del suelo	0,4322	***
Humedad del suelo	0,3477	***
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,0916	n.s
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,0749	n.s
Carbono de la biomasa microbiana	4,58	n.s
Carbono orgánico total del suelo	0,353	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

En el caso del uso NT, los resultados del modelo de regresión lineal mostraron que la respiración del suelo se relacionó con la temperatura del suelo y la humedad del suelo, siendo los coeficientes de determinación de 0,43 y 0,35, respectivamente, y con un valor de significación menor de 0,001 en ambos casos (tabla 10).

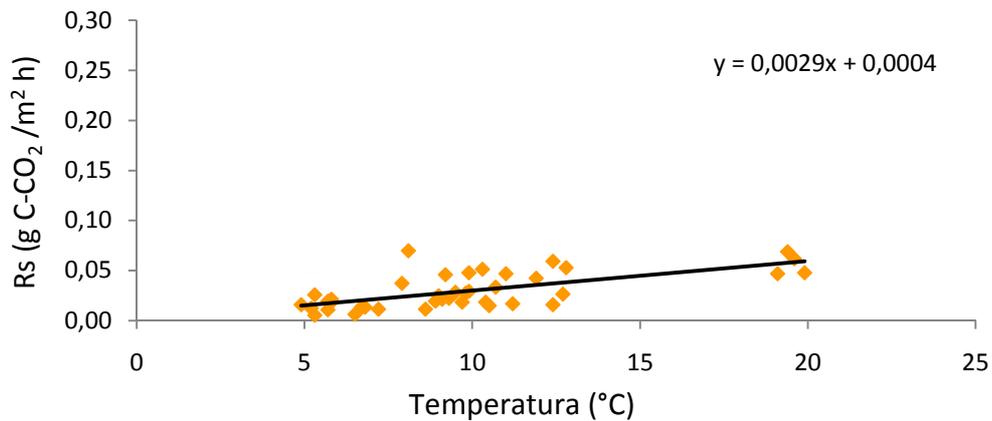


Figura 24. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la temperatura del suelo en el uso NT (cebada en siembra directa).

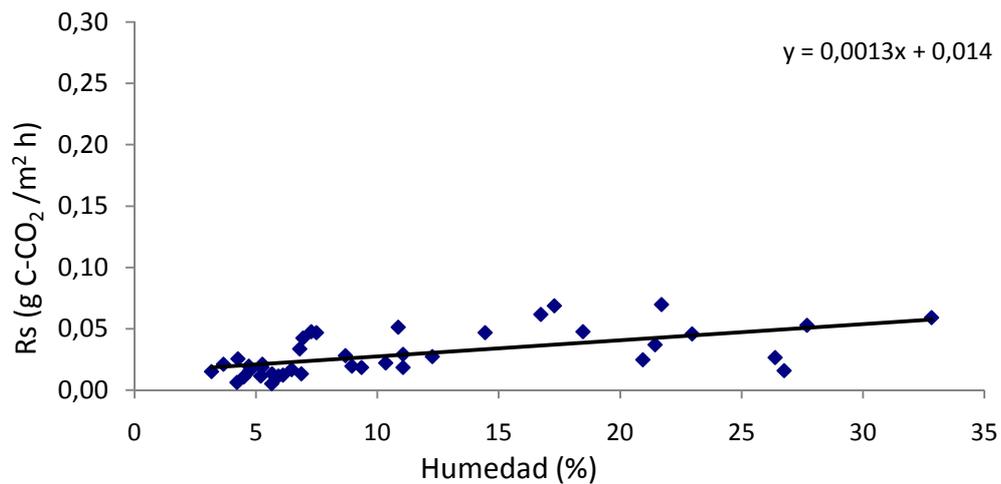


Figura 25. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la humedad del suelo en el uso NT (cebada en siembra directa).

Abandonado labrado (AC)

La emisión de CO₂ por parte del suelo abandonado labrado presentó una relación significativa con la temperatura y la humedad del suelo. Se observó una mayor relación con el parámetro humedad del suelo, siendo su coeficiente de determinación de 0,82 (tabla 11).

Tabla 11. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en AC.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R ²)	Significación
Temperatura del suelo	0,2284	**
Humedad del suelo	0,8225	***
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,0235	n.s
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,1798	n.s
Carbono de la biomasa microbiana	0,0870	n.s
Carbono orgánico total del suelo	0,1484	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

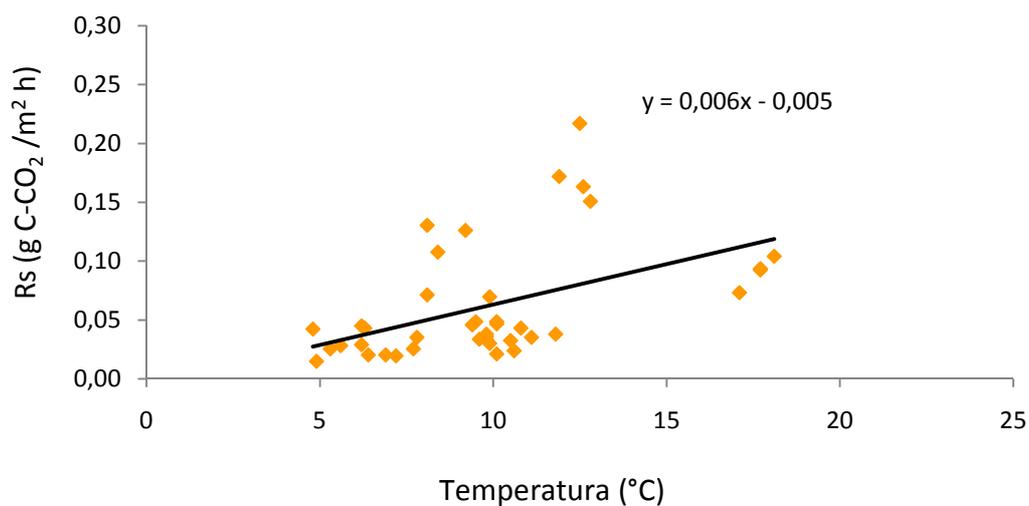


Figura 26. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la temperatura del suelo en el uso AC (abandonado labrado).

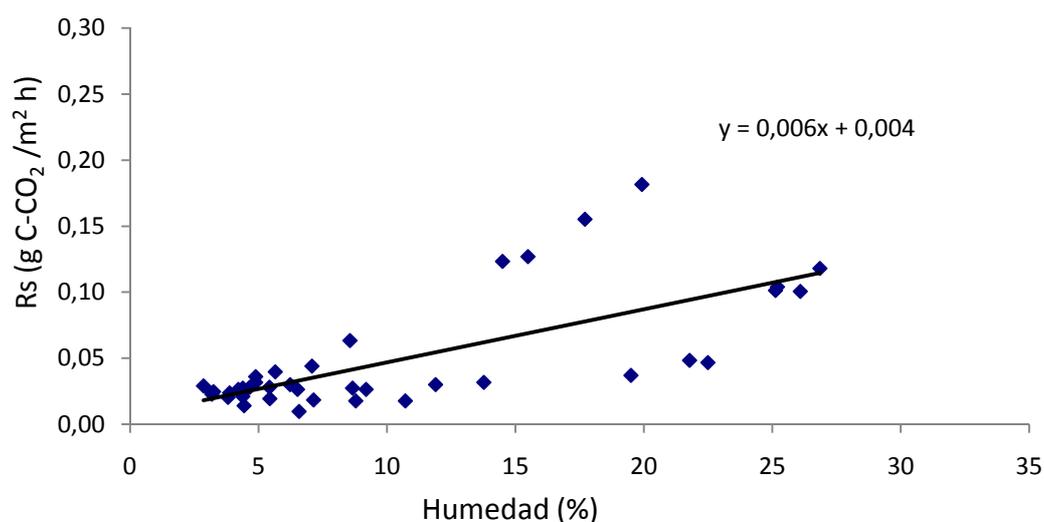


Figura 27. Relación entre la respiración del suelo (R_s) y la humedad del suelo en el uso AC (abandonado labrado).

Abandonado inalterado (AU)

Como en los anteriores usos, las únicas relaciones significativas de la respiración del suelo se produjeron con la temperatura y la humedad del suelo, con un nivel menor al 0,001 de significación. El coeficiente de determinación para la temperatura del suelo tiene un valor de 0,68 y el de la humedad del suelo de 0,51 (tabla 12).

Tabla 12. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en AU.

Parámetros	Coficiente de determinación (R^2)	Significación
Temperatura del suelo	0,6763	***
Humedad del suelo	0,5102	***
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,0322	n.s
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,0008	n.s
Carbono de la biomasa microbiana	0,05735	n.s
Carbono orgánico total del suelo	0,16	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

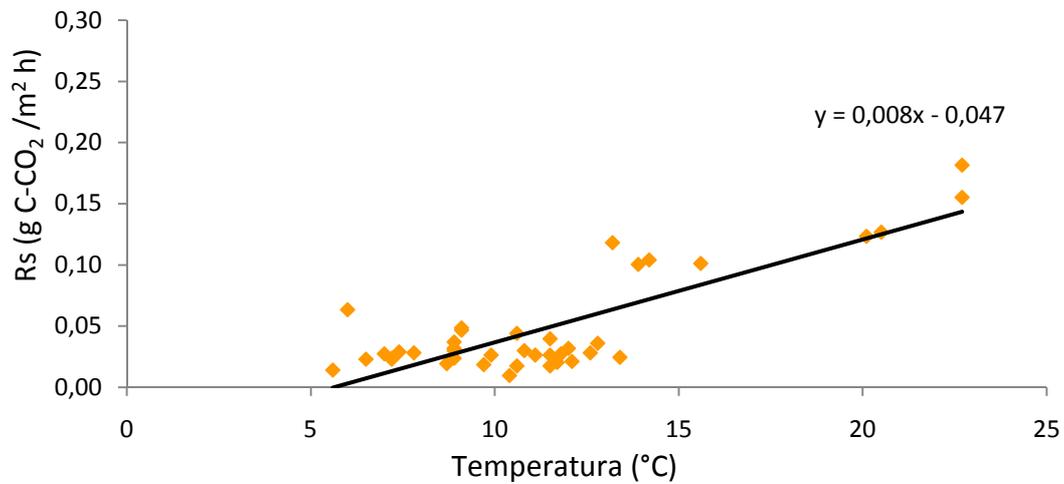


Figura 28. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la temperatura del suelo en el uso AU (abandonado inalterado).

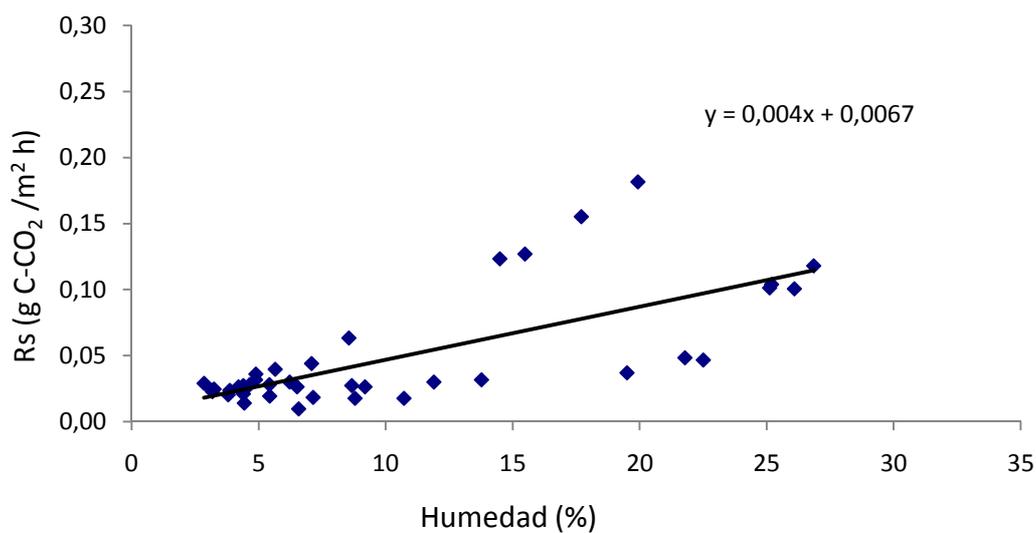


Figura 29. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la humedad del suelo en el uso AU (abandonado inalterado).

Forestal (FR)

En el caso del suelo forestal también se observó una relación entre la respiración del suelo con las variables temperatura y humedad del suelo, con un valor significativo aunque menor a los casos anteriores (entre 0,001 y 0,01). Los coeficientes de determinación también son menores con valores aproximados al 0,2 (tabla 13).

Tabla 13. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en uso forestal (FR).

Parámetros	Coefficiente de determinación (R ²)	Significación
Temperatura del suelo	0,2084	**
Humedad del suelo	0,2394	**
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,1525	n.s
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,2009	n.s
Carbono de la biomasa microbiana	0,114	n.s
Carbono orgánico total del suelo	0,0103	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

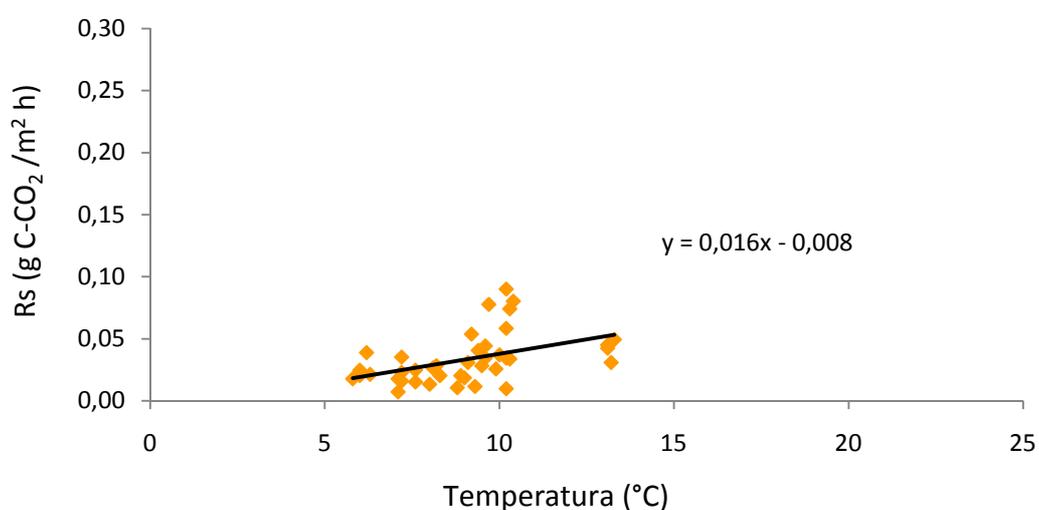


Figura 30. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la temperatura del suelo en el uso FR (forestal).

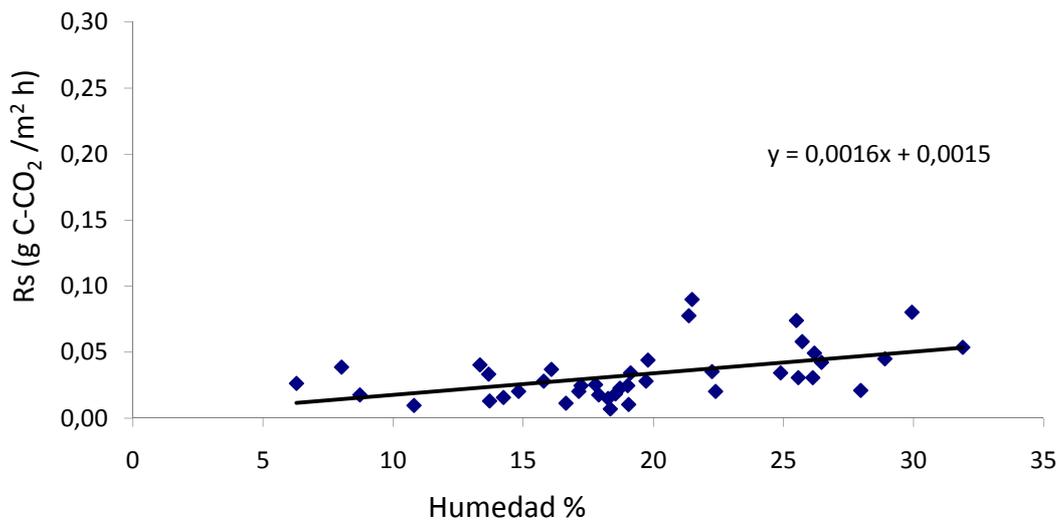


Figura 31. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la humedad del suelo en el uso FR (forestal).

5.2. USOS DEL SUELO: ESTUDIO DE INCUBACIÓN EN LABORATORIO

• Emisión diaria de CO₂

En el caso de los suelos sometidos a incubación los valores de emisión de CO₂ no son significativamente diferentes. A pesar de no ser significativo, el suelo abandonado labrado (AC), mostró una ligera superioridad en las emisiones de CO₂ con valores un 30% mayores que el resto de usos del suelo.

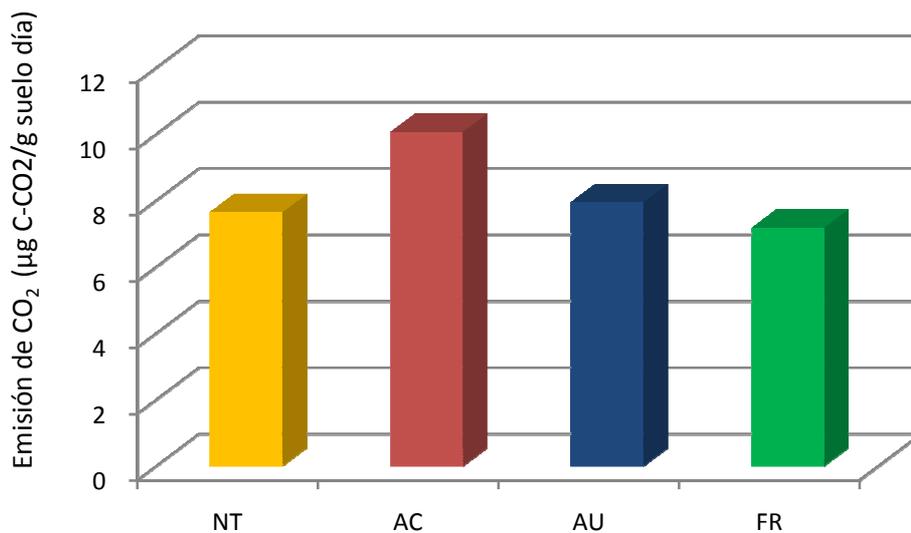


Figura 32. Emisión de CO₂ media diaria de cada uso de suelo incubado (respiración basal), (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

En general, el conjunto de las emisiones diarias disminuyó con el paso del tiempo de incubación, exhibiendo varios picos de emisión, siendo los valores de los primeros días significativamente superiores a los últimos días de experimento (figura 33 y 34).

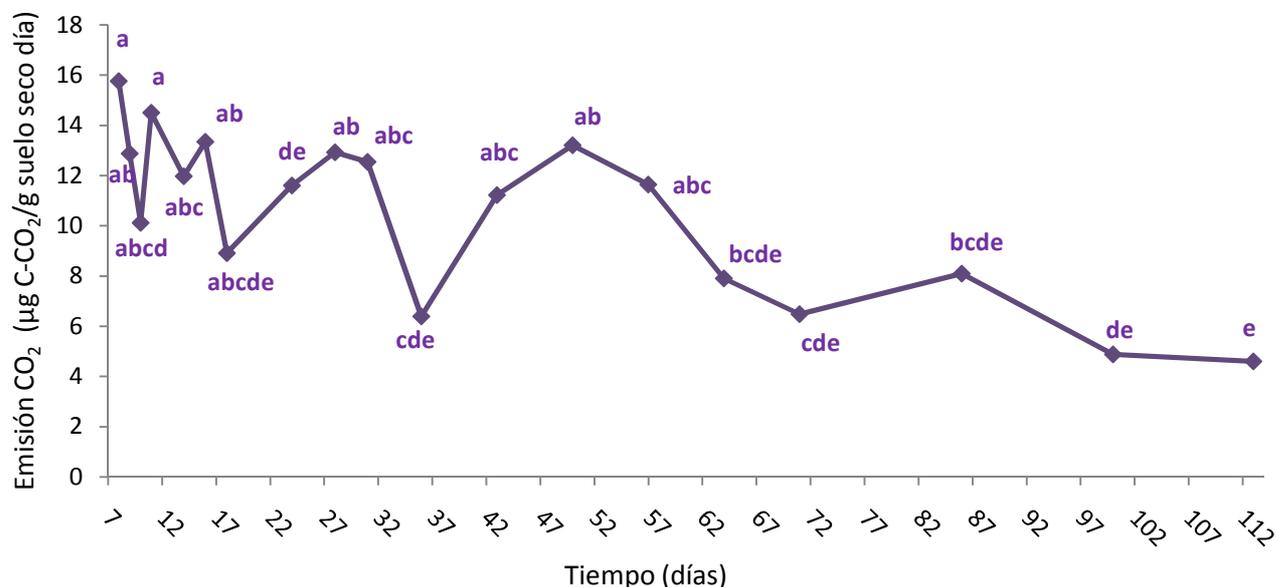


Figura 33. Valores diarios medios de emisión de CO₂ en incubación. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre días, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

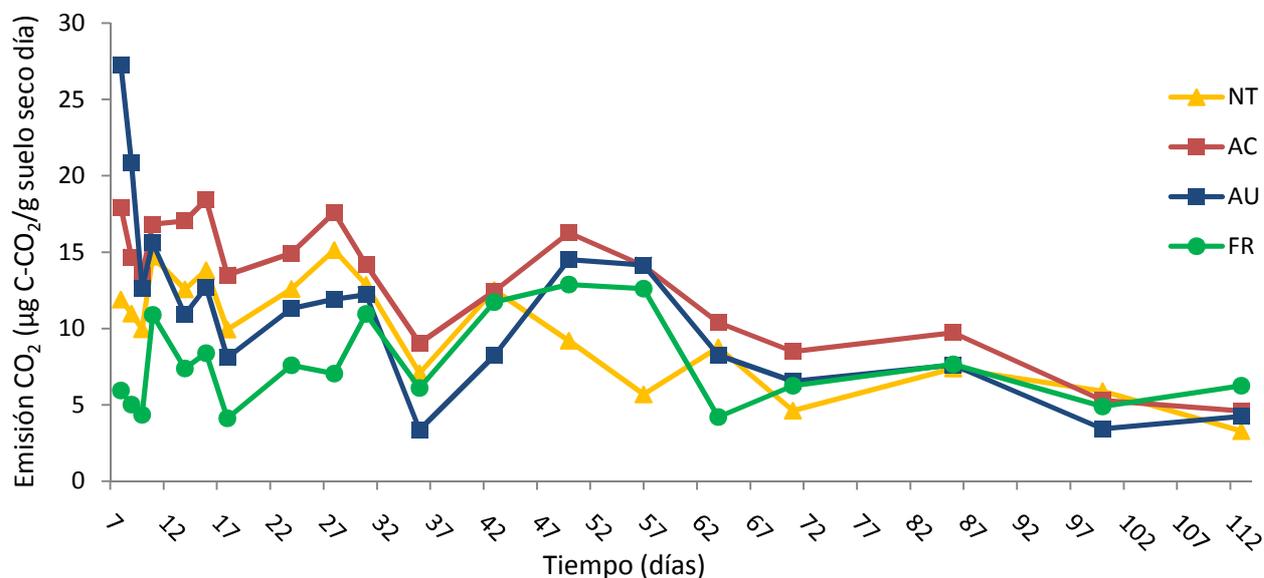


Figura 34. Emisión de CO₂ por uso y día de incubación (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre usos del suelo para cada fecha, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

En cuanto a las emisiones de dióxido de carbono a lo largo de todo el periodo de incubación, de los 4 usos de suelo objeto de estudio, solo se observaron diferencias significativas los primeros 10 días (datos no mostrados), siendo las muestras pertenecientes al suelo AC (abandonado labrado) las que presentaron los mayores valores de emisión en dicho periodo.

- Emisión acumulada

En la figura 35 se observa la gráfica que muestra los valores de emisiones de CO₂ acumulados en los 113 días de incubación. El suelo abandonado labrado (AC) alcanzó los valores más altos con cerca de 1130 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo seco. A este valor le siguen en orden decreciente los relativos a los usos AU (abandonado inalterado), NT (cebada en siembra directa) y FR (forestal), con valores aproximadamente de 892, 854 y 811 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo seco, respectivamente.

El test de varianza no mostró diferencias significativas entre los distintos suelos y días, salvo en el octavo día, en el que las muestras de suelo abandonado labrado (AC) emitieron más cantidad de dióxido de carbono respecto al resto.

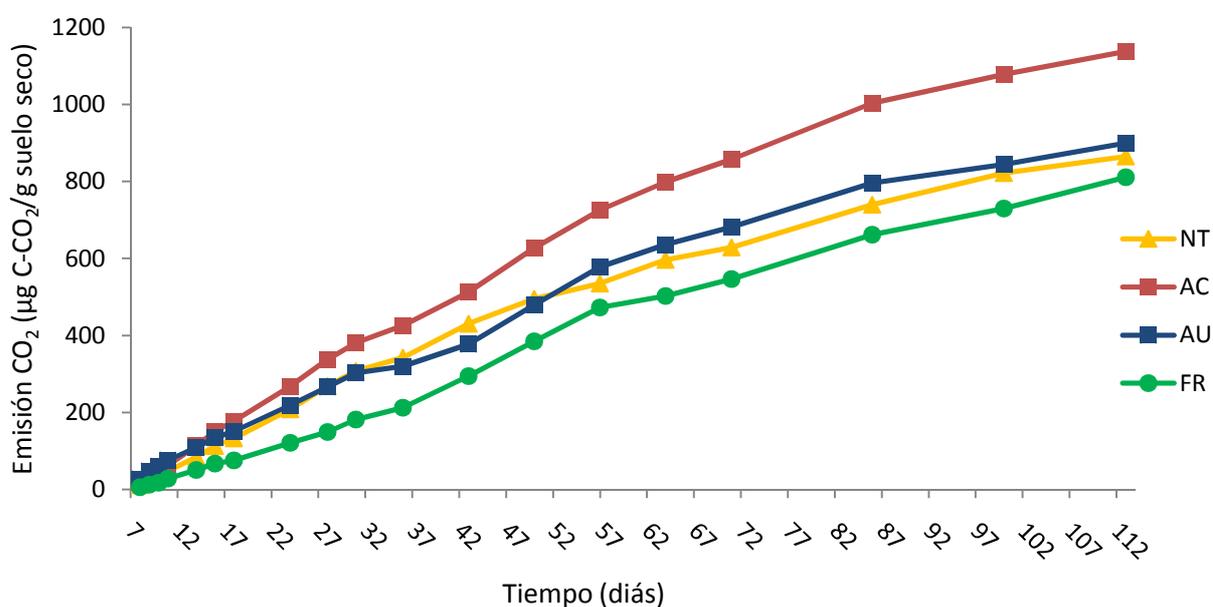


Figura 35. Emisión de CO₂ acumulada por uso y día (NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal). Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre usos del suelo para cada fecha, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

- Índices y cinética de mineralización del carbono

En cuanto a los cocientes metabólicos de los distintos usos de suelo (qCO_2), que informan sobre la respiración por unidad de biomasa microbiana, no fueron estadísticamente diferentes. No obstante, los usos de suelo NT y AC presentaron unos valores de entre el 40% y 70% superiores respecto los valores de los usos AU y FR (tabla 14).

Tabla 14. Cociente metabólico (qCO_2), cociente de mineralización (qmC), carbono potencialmente mineralizable (Co), ratio de mineralización de carbono (K), carbono potencialmente mineralizable en relación con el carbono orgánico total (Co/COS).

Uso	qCO_2 (μg C-CO ₂ /mg Cbio h)	qmC (μg C-CO ₂ /mg COS h)	Co (mg/kg)	K (d ⁻¹)	Co/COS (%)
NT	0,000841 a	0,0295 a	2355,81 b	0,0041 a	21,78 a
AC	0,000827 a	0,0250 a	4692,59 b	0,0031 a	27,94 a
AU	0,000589 a	0,0225 ab	3520,10 b	0,0037 a	23,88 a
FR	0,000499 a	0,0086 b	305200 a	2,38 ⁻⁵ b	-

(NT, cebada en siembra directa; AC, abandonado labrado; AU, abandonado inalterado; FR, forestal)
Las medias con la misma letra no difieren significativamente, por método Tukey para un nivel de 0,05.

Respecto al coeficiente de mineralización (qmC), los valores de NT y AC fueron significativamente superiores a los valores de FR, mientras que el suelo perteneciente a AU mostró un comportamiento similar con el resto.

El contenido de carbono potencialmente mineralizable del suelo forestal (FR) fue significativamente superior que el resto, si bien su ratio de descomposición es el más alto, con un tiempo de residencia de más de un centenar de años. Los demás suelos no presentaron diferencias entre sí en el contenido de carbono potencialmente mineralizable, con una cantidad menor que el uso FR pero con tasas de mineralización menores a un año; en estos suelos la relación de Co con el COS no mostró diferencias entre sí, manteniéndose entre porcentajes del 21 y el 28%.

En el caso del suelo forestal, no se incluye el valor de la relación entre el carbono potencialmente mineralizable y el carbono orgánico total del suelo ya que se obtuvo un mayor contenido de carbono orgánico mineralizable respecto al carbono orgánico total. Los valores de carbono potencialmente mineralizable son erróneos ya que éstos no pueden ser superiores al COS total. Estos valores erróneos pudieron deberse a que el muestreo de COS total se realizó en un momento diferente a la toma de las muestras para la incubación. Así mientras que el muestreo para COS total se realizó mediante calicata, permitiendo una mayor exactitud a la hora de separar el horizonte de suelo respecto el horizonte de material orgánico (pinaza), el suelo para la incubación se recogió superficialmente, pudiéndose contaminar fácilmente con restos de pinaza, en mayor o menor estado de descomposición, que cubren esta parcela.

5.3. FERTILIZACIÓN NITROGENADA: ESTUDIO DE LA RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CAMPO A CORTO PLAZO

5.3.1. Temperatura del suelo

Para un nivel de 0,05 el análisis de varianza de la temperatura de los diferentes tipos de aplicación mostró diferencias significativas entre ellos (tabla 15), siendo el suelo de la parcela control el que alcanzó mayor temperatura durante los muestreos realizados, superando los 8 °C. Las parcelas destinadas a la aplicación de nitrógeno mineral y purín no mostraron diferencias entre ellas, con unos valores de temperatura media de 6,8 y 7,5 °C respectivamente (figura 29).

Tabla 15. Análisis de varianza de la temperatura del suelo para las distintas aplicaciones y horas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	2	2,912 ⁻⁰⁶
FECHA	3	2,20 ⁻¹⁶
USO:FECHA	6	0,1122

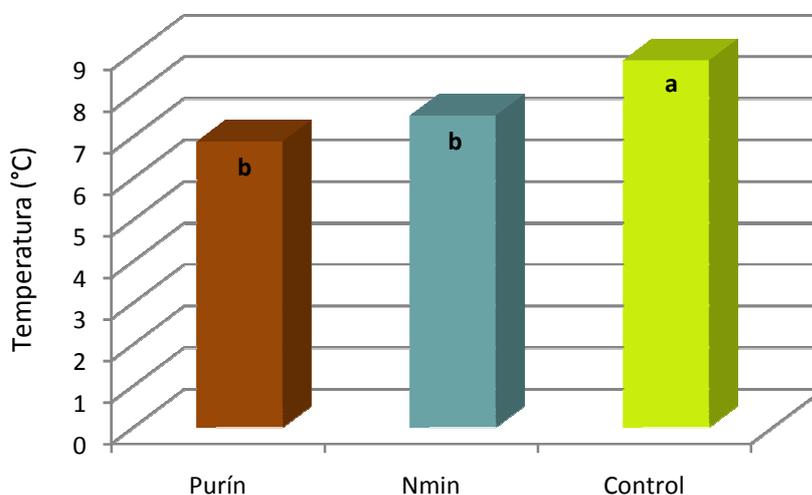


Figura 36. Temperatura del suelo media de cada aplicación. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

A su vez, el comentado análisis reveló diferencias de la temperatura del suelo en las distintas horas y parcelas en las que se recogieron los datos (tabla 15), dichas diferencias se pueden observar en las graficas 37 y 38.

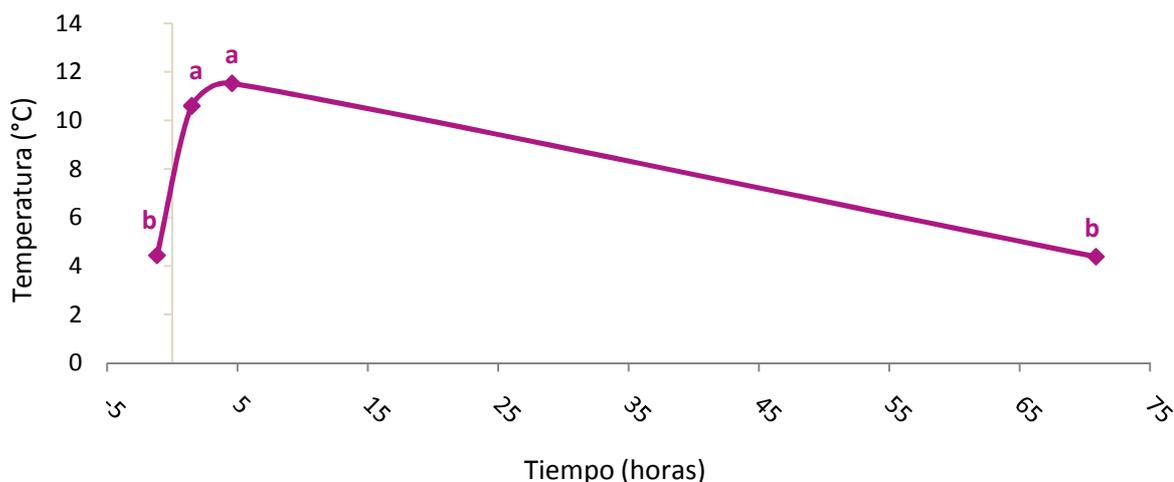


Figura 37. Temperatura media del suelo en los diferentes momentos de muestreo. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre horas, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

Los muestreos realizados a la hora y media y a las 5 horas fueron los que manifestaron mayor temperatura, sin diferencias estadísticas entre ellos.

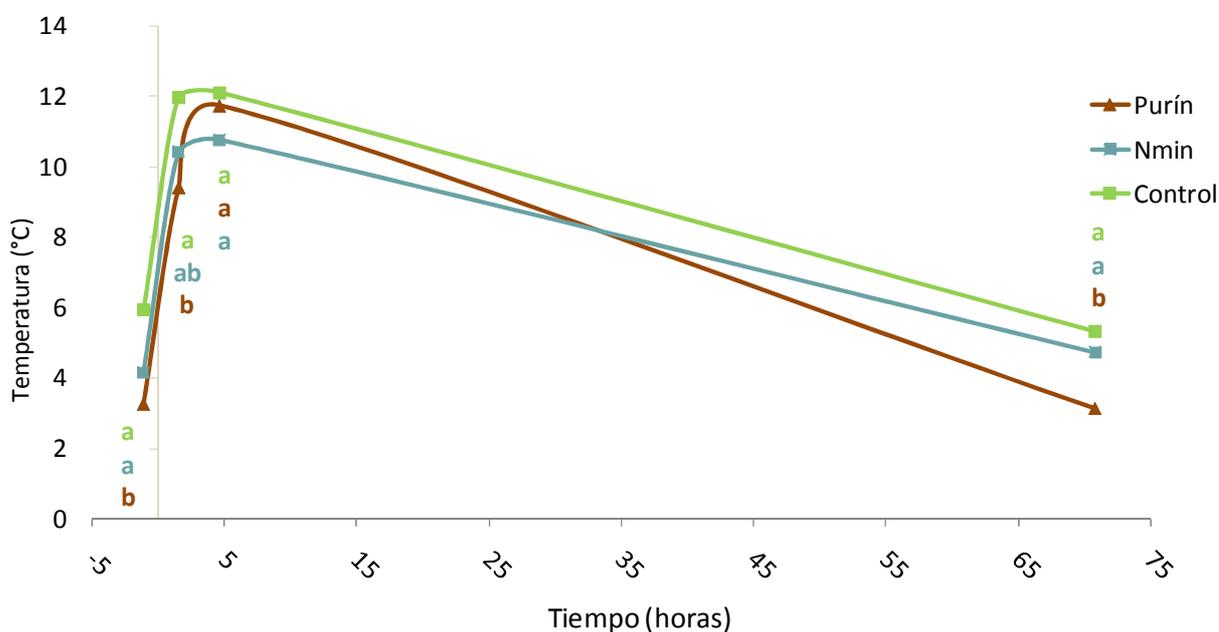


Figura 38. Temperatura media del suelo por aplicación y hora. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones para cada hora, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

En cuanto a la temperatura de los diferentes tipos de aplicación y las distintas horas se observaron diferencias significativas como se aprecia en la figura 38, siendo el único punto en el que el comportamiento de la temperatura fue similar en las tres parcelas a las 5 horas

de la aplicación de los distintos fertilizantes. Se observó que en todos los casos la parcela control presenta las temperaturas más altas, y salvo en el tercer muestreo es la parcela destinada a la aplicación de purín la que presentó las más bajas.

5.3.2. Humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo presentó un comportamiento diferente entre los tipos de aplicación, las horas y entre estos dos (tabla 16).

En el caso de los análisis de la humedad entre suelos, es el de la parcela de purín el que presentó el valor más alto, con un 11%, el resto de aplicaciones, nitrógeno mineral y control, variaron de este con valores respectivos de 4,5 y 3,6% siendo entre ellos semejantes (figura 38).

Tabla 16. Análisis de varianza de la humedad del suelo entre las distintas aplicaciones y horas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	2	$1,02^{-09}$
FECHA	3	0,0009
USO:FECHA	6	$4,74^{-06}$

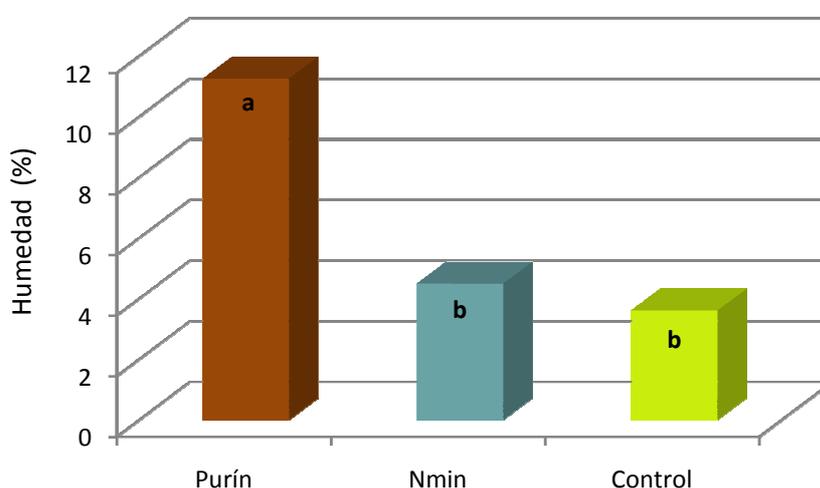


Figura 39. Humedad media del suelo en cada aplicación. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

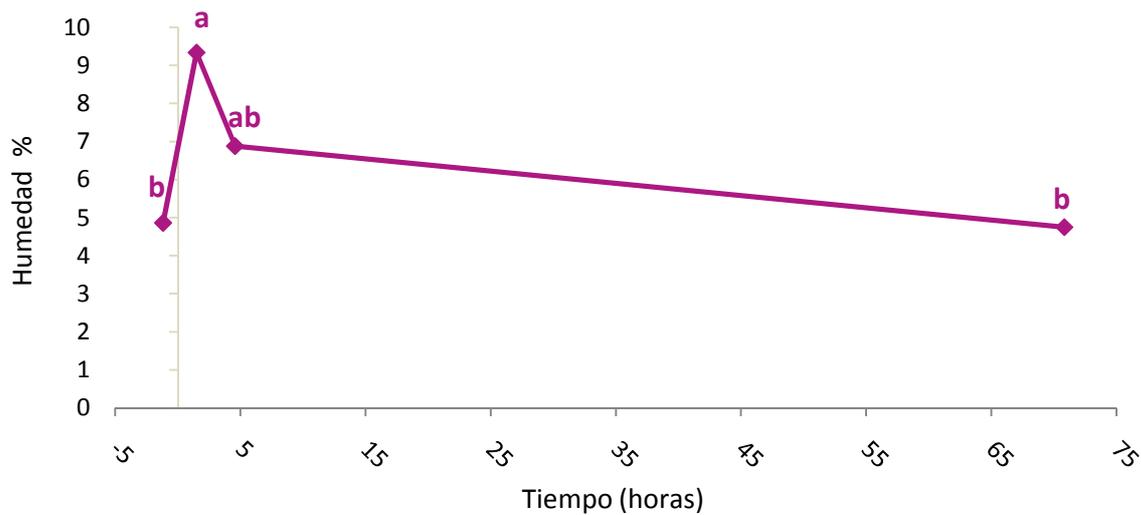


Figura 40. Humedad media del suelo en los diferentes momentos de muestreo. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre horas, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

Los momentos de muestreo presentaron, como se ha expuesto anteriormente, diferencias en el contenido de humedad del suelo. Antes de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados (momento 0) el contenido de humedad medio en los suelos fue de 4,8%, mientras que después de la aplicación se observó un incremento del contenido de agua hasta 9,3% tras lo que disminuyó hasta alcanzar un 4,75% a las 71 horas (figura 40).

A lo largo de las horas de recogida de datos de humedad, los tipos de aplicación también presentaron diferencias; antes de las aplicaciones el mayor contenido de humedad del suelo lo obtuvo la parcela control siendo significativamente diferente al resto. Tras la aplicación de los fertilizantes, el suelo de la parcela con purín aumentó su contenido de agua hasta un porcentaje cercano al 20%, valor estadísticamente diferente a los otros dos suelos (control y nitrógeno mineral), conforme las horas transcurren el agua presente en este suelo se acercó a su valor inicial.

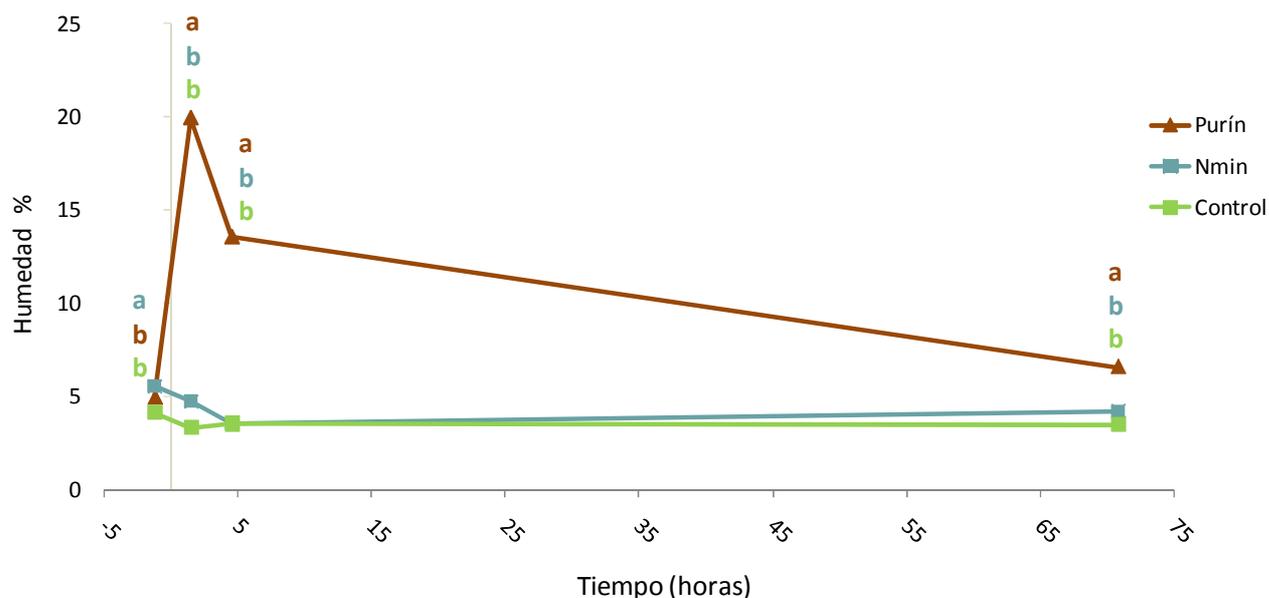


Figura 41. Humedad media del suelo por aplicación y hora. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones para cada hora, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

5.3.3. Carbono orgánico soluble del suelo

Existieron diferencias significativas en la concentración de carbono orgánico soluble para los diferentes tipos de aplicación, siendo el suelo con nitrógeno mineral y el control los que presentaron la menor cantidad de éste, difiriendo del suelo con purín, que presentó un valor significativamente mayor de 0,23 mg carbono/g suelo seco (figura 42).

Tabla 17. Análisis de varianza de carbono orgánico soluble del suelo para las distintas aplicaciones y horas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	2	1,20 ⁻⁰⁵
FECHA	3	0,1008
USO:FECHA	6	0,0345

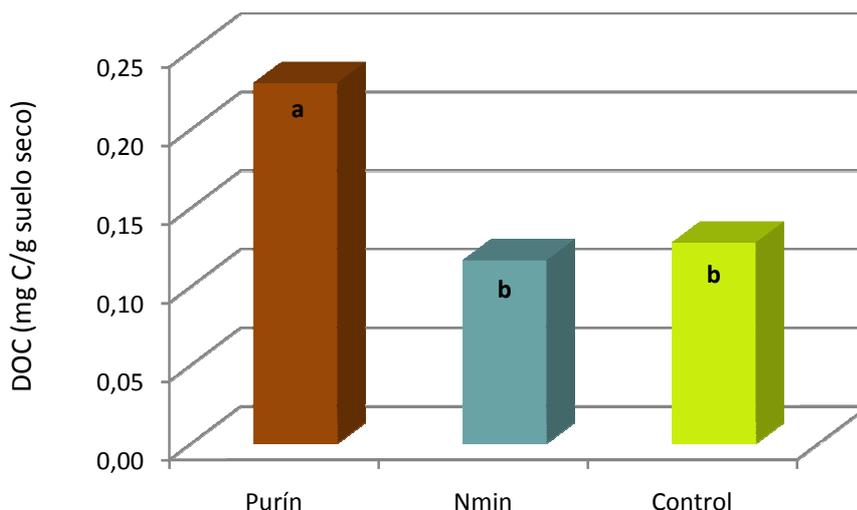


Figura 42. Carbono orgánico soluble del suelo (DOC) en cada aplicación. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

El contenido de carbono orgánico soluble en el primer muestreo fue similar en los tres tratamientos analizados, tras la aplicación de los distintos fertilizantes dicho contenido se vio incrementado en el caso del tratamiento con purín, siendo sus valores significativamente diferentes de resto de suelos.

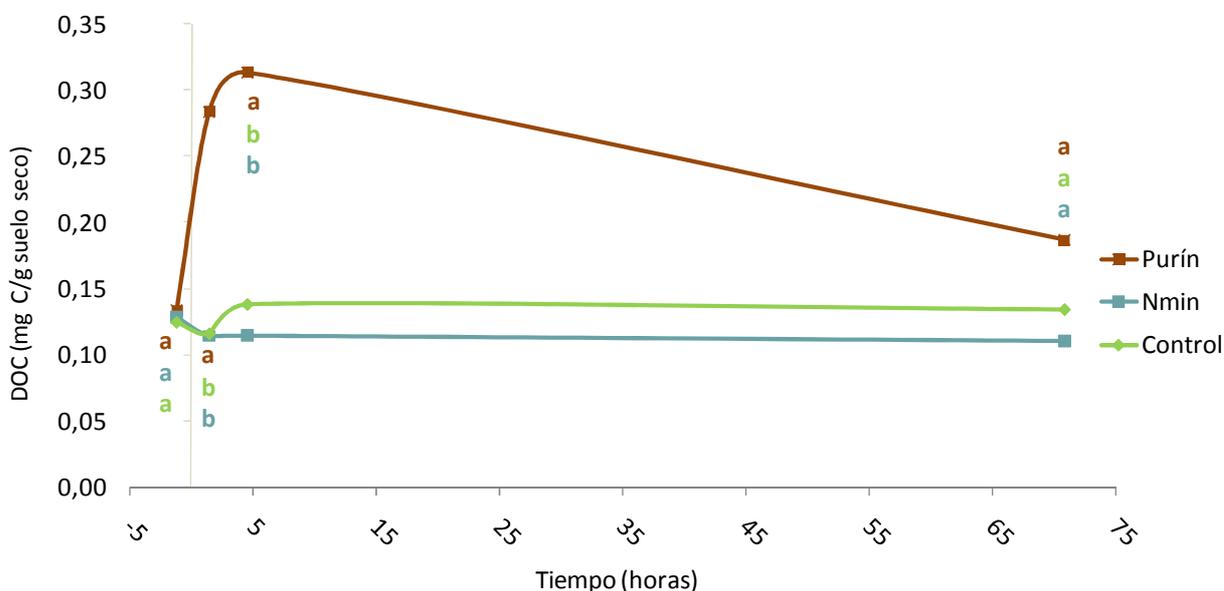


Figura 43. Carbono orgánico soluble del suelo (DOC) por aplicación y hora. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones para cada hora, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

En la parcela control se observó un pequeño incremento en la concentración del carbono mencionado, si bien su valor fue diferente del suelo fertilizado con purín y se mantuvo

siempre similar al de la parcela de nitrógeno mineral. Al cabo de 71 horas, se observó un descenso de la concentración de este parámetro en el suelo con purín, quedando los tres valores igualados estadísticamente.

5.3.4. Nitrógeno orgánico soluble del suelo

El suelo más rico en nitrógeno orgánico soluble fue el suelo en el que se aplicó purín, este valor fue significativamente diferente al de la parcela control, con una diferencia de 0,17 mg N g⁻¹ suelo seco. Entre estos valores, se encontraron los pertenecientes a la parcela destinada a la aplicación de nitrógeno mineral, de 0,14 mg N g⁻¹ suelo seco, similares a los otros dos suelos del estudio (figura 44).

Tabla 18. Análisis de varianza del nitrógeno orgánico disuelto para las distintas aplicaciones y horas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	2	0,0008
FECHA	3	0,0848
USO:FECHA	6	0,2317

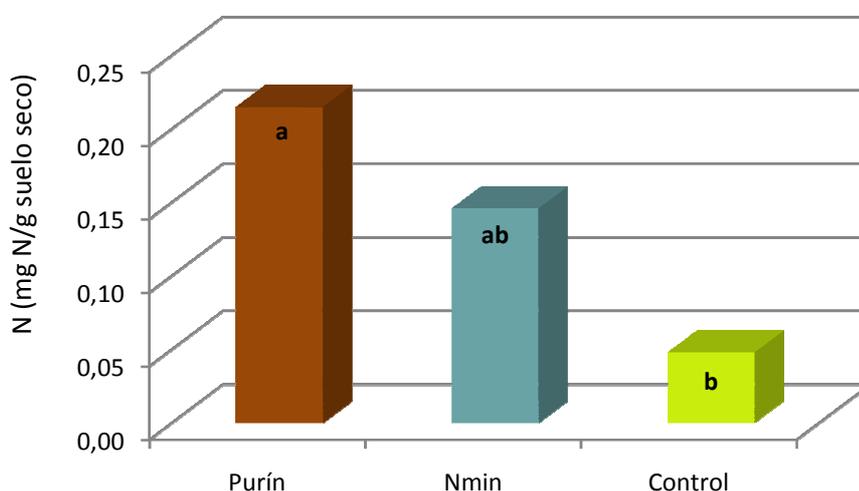


Figura 44. Nitrógeno orgánico soluble del suelo (N) para cada aplicación. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

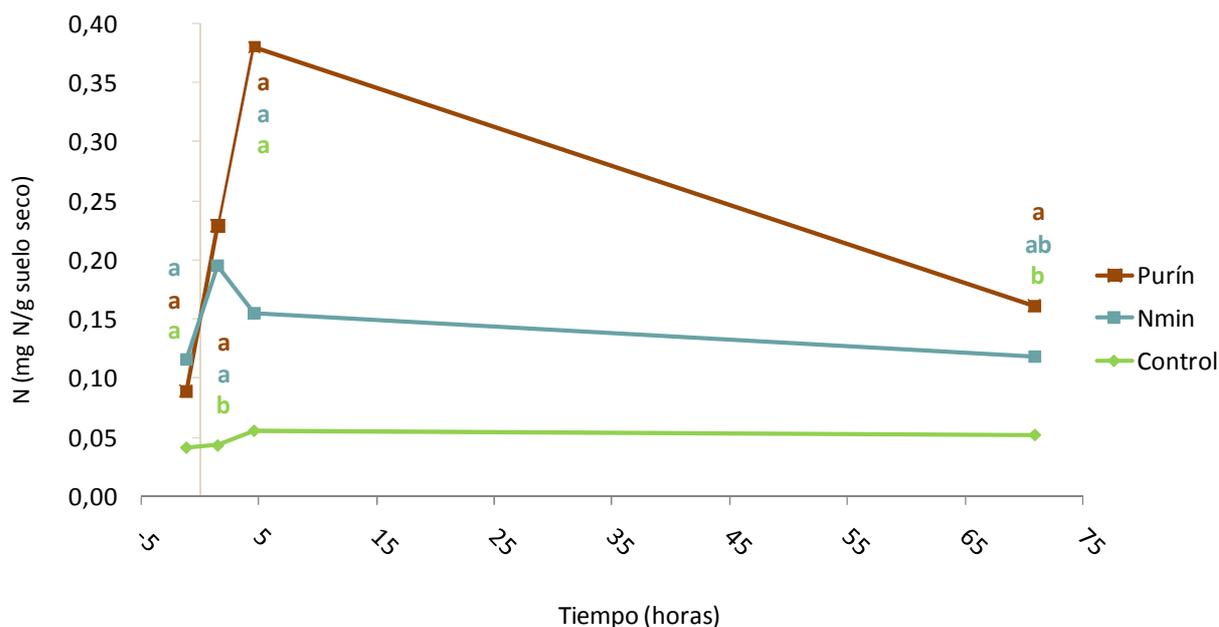


Figura 45. Nitrógeno orgánico soluble del suelo (N) por aplicación y hora. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones para cada hora, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

A pesar de que el test de varianza no reveló diferencias relacionadas con el contenido de nitrógeno orgánico soluble del suelo, el test de Tukey sí mostró diferencias entre aplicaciones y horas de este parámetro. Se observó un incremento después de la aplicación en la parcela de nitrógeno mineral, y uno aún más acusado en la de purín. Al pasar 3 días de la aplicación, estos valores empezaron a descender (figura 45).

5.3.5. Respiración del suelo

Respecto a la respiración del suelo se observó una notable diferencia entre los tres suelos (tabla 19). El suelo en el que se aplicó purín fue el que presentó el valor más alto y diferente del resto a un nivel de 0,05, siendo la emisión de carbono de CO₂ de 0,11 g por m⁻² h⁻¹. Distantes a este valor se encontraron los 0,1 g de C-CO₂m⁻² h⁻¹ que emitieron los suelos de las parcelas control y de nitrógeno mineral, que entre ellas no difirieron significativamente en cuanto a la respiración del suelo (figura 46).

Tabla 19. Análisis de varianza de la respiración del suelo para las distintas aplicaciones y horas.

	Grados de libertad	Pr (>F)
USO	2	5,64 ⁻⁰⁶
FECHA	3	5,01 ⁻⁰⁵
USO:FECHA	6	1,68 ⁻⁰⁶

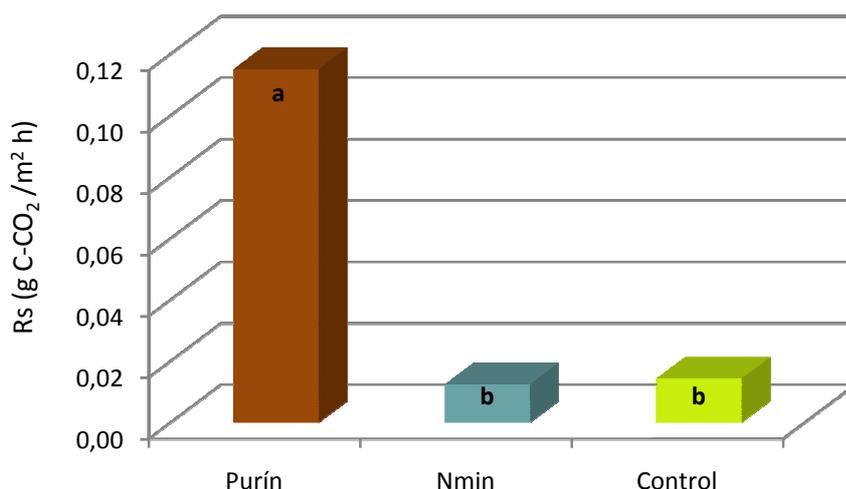


Figura 46. Respiración media del suelo (Rs) para cada aplicación. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

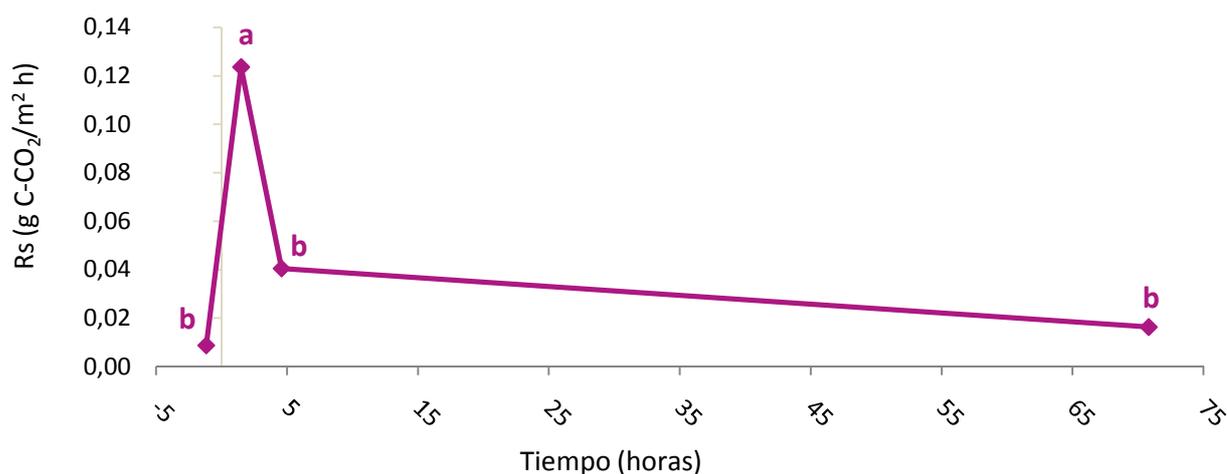


Figura 47. Respiración del suelo (Rs) media en los diferentes momentos de muestreo. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre horas, por método Tukey para un nivel de significación de 0,05.

Como manifiesta la figura 47, se observó un incremento en las emisiones tras la aplicación de los fertilizantes nitrogenados (0 horas). El valor de la respiración del suelo después de una hora y media fue el único que difiere del resto, a continuación se observó una disminución de las emisiones de CO₂, que al cabo de las 71 horas se encontraron cerca del valor inicial.

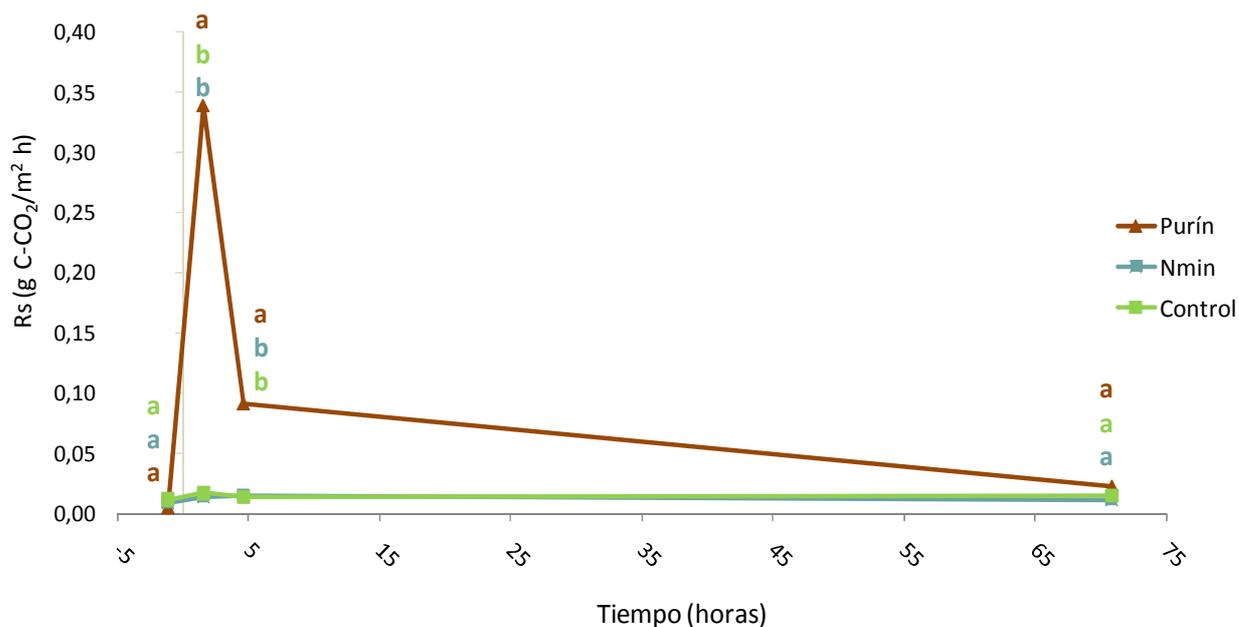


Figura 48. Respiración del suelo media (R_s) por aplicación y hora. Las medias con la misma letra no difieren significativamente entre aplicaciones para cada hora, por método Tukey para un nivel de 0,05.

La respiración del suelo en el caso de los suelos de la parcela control y de la de nitrógeno mineral no fueron diferentes en ningún momento del experimento, siendo sus valores prácticamente iguales en todos los casos (figura 48). En cambio, las emisiones de CO_2 fueron significativamente diferentes y más altas tras la aplicación del purín, produciéndose un pico de emisión a la hora de dicha aplicación, con un valor de $0,34 \text{ g C-CO}_2/\text{m}^2 \text{ h}$. A las 5 horas de la aplicación, este tratamiento siguió sin mostrar similitudes con el resto, si bien la respiración del suelo fue menor. Pasadas 71 horas los tres valores de emisión fueron semejantes.

5.3.6. Relaciones entre parámetros estudiados

Relaciones entre los valores totales obtenidos.

El modelo de relación lineal realizado con todo el conjunto de valores obtenidos mostró una relación entre la respiración del suelo y los parámetros humedad, carbono orgánico y nitrógeno orgánico disuelto del suelo (tabla 20). El mayor coeficiente de determinación lo encontramos en la relación con la humedad del suelo, con un valor de 0,51 y una significación menor del 0,001, este valor de significación también lo mostró el carbono orgánico disuelto del suelo, pero con un coeficiente de determinación menor, de 0,38. La respiración del suelo mostró una cierta dependencia con el nitrógeno orgánico disuelto del suelo, si bien su significación fue más baja (entre 0,01 y 0,05), al igual que el coeficiente de determinación que en este caso contó con un valor de 0,10.

Tabla 20. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados.

Parámetros	Coficiente de determinación (R ²)	Significación
Temperatura del suelo	0,3599	n.s
Humedad del suelo	0,5088	***
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,3769	***
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,1049	*

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

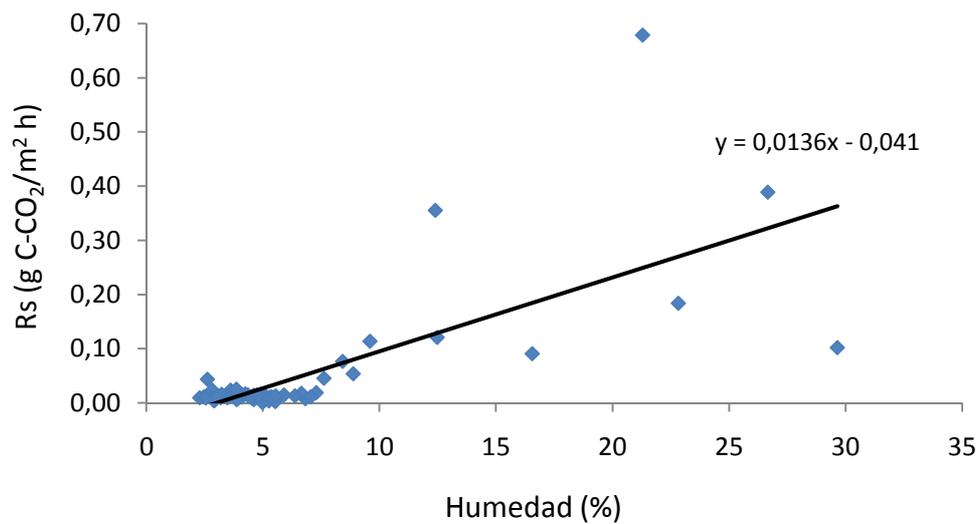


Figura 49. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y la humedad del suelo.

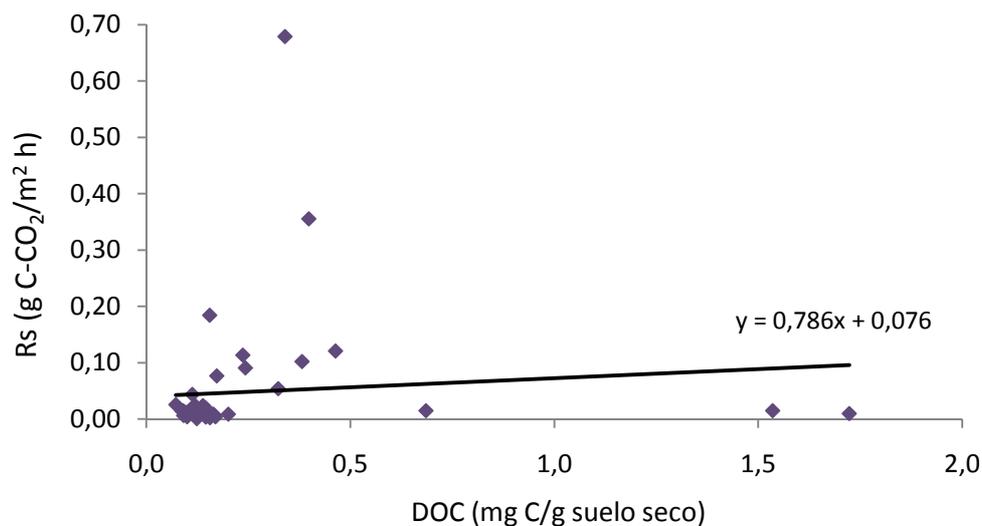


Figura 50. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y el carbono orgánico disuelto del suelo (DOC)

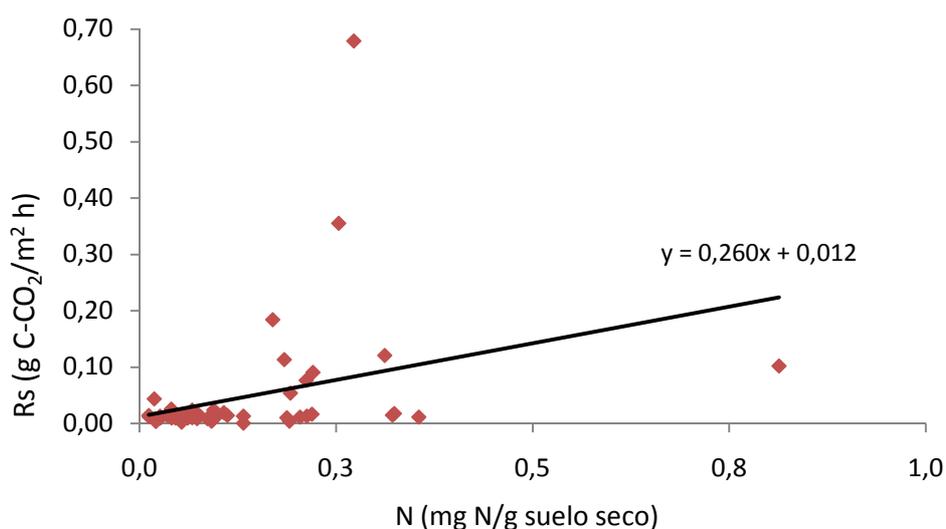


Figura 51. Relación entre la respiración del suelo (Rs) y el nitrógeno orgánico disuelto del suelo (N)

Relaciones entre los valores obtenidos por hora de muestreo.

Preaplicación de fertilizantes: -1 h.

Antes de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados la respiración del suelo no mostró relación con ninguno de los parámetros estudiados (tabla 21).

Tabla 21. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados 1 hora antes de la aplicación de los distintos fertilizantes nitrogenados.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R^2)	Significación
Temperatura del suelo	0,1357	n.s
Humedad del suelo	0,0067	n.s
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,1577	n.s
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,0010	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

Post-aplicación de fertilizantes: 1,50 h.

Una hora y media después de la aplicación de los distintos fertilizantes existió una importante dependencia significativa de las emisiones de CO_2 del suelo con la humedad del suelo y el carbono orgánico disuelto del suelo, siendo 0,6 y 0,7 sus respectivos coeficientes de determinación (tabla 22).

Tabla 22. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados 1,50 h después de la aplicación de los distintos fertilizantes nitrogenados.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R^2)	Significación
Temperatura del suelo	0,2554	n.s
Humedad del suelo	0,6094	***
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,7039	***
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,0010	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

Post-aplicación de fertilizantes: 5 h.

Pasadas 5 horas de la aplicación de los fertilizantes, el carbono orgánico disuelto mostró prácticamente la misma dependencia (con valores de R^2 y significación similares, tabla 23). La respiración del suelo siguió mostrando relación con el contenido de agua del suelo aunque de manera menor que a la hora y media de la aplicación, con un nivel de significación menor a 0,01 y un valor de R^2 de 0,5. En este momento del muestreo, el nitrógeno orgánico soluble mostró relación con la respiración del suelo con una significación menor a 0,05 siendo el coeficiente de determinación de 0,23.

Tabla 23. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados 5 horas después de la aplicación de los distintos fertilizantes nitrogenados.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R ²)	Significación
Temperatura del suelo	0,0286	n.s
Humedad del suelo	0,5438	**
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,7398	***
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,2307	*

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

Post-aplicación de fertilizantes: 71 h.

En la tabla 24 se observan las relaciones entre la respiración del suelo y los distintos parámetros pasadas 71 horas de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados. En ésta se puede apreciar de nuevo una dependencia de la respiración del suelo con la humedad del suelo y el carbono orgánico disuelto. No obstante, la significación de estas relaciones fue menor que en los dos últimos casos, encontrándose ambas menores a un nivel de 0,05, mostrando a su vez coeficientes de regresión menores.

Tabla 24. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados 71 h después de la aplicación de los distintos fertilizantes nitrogenados.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R ²)	Significación
Temperatura del suelo	0,0644	n.s
Humedad del suelo	0,389	*
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,4892	*
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,3514	n.s.

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

Relación entre los valores obtenidos para cada aplicación

Parcela control

El modelo lineal realizado no mostró ninguna dependencia entre la respiración del suelo de la parcela control con ningún otro parámetro estudiado (tabla 25).

Tabla 25. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en la parcela control.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R^2)	Significación
Temperatura del suelo	0,0183	n.s
Humedad del suelo	$7,398^{-5}$	n.s
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,0962	n.s
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,1831	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

Parcela de aplicación de nitrógeno mineral.

En la parcela de aplicación de nitrógeno mineral, la respiración del suelo solo encontró relación con la temperatura del suelo. La significación de esta relación fue menor a 0,05, con un coeficiente de determinación de 0,28.

Tabla 26. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en la parcela con aplicación de nitrógeno mineral.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R^2)	Significación
Temperatura del suelo	0,277	*
Humedad del suelo	0,0842	n.s
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,0181	n.s
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,0791	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

Parcela de aplicación de purín

En la parcela en la que se aplicó purín, la emisión de CO_2 si mostró interacción entre distintos parámetros. La dependencia con la humedad del suelo fue la más significativa con un R^2 de 0,41. Con niveles de significación menores a 0,05 se observaron las relaciones de la temperatura del suelo y el carbono orgánico del suelo con la respiración del suelo (tabla 27), siendo la temperatura la que mostró el mayor coeficiente de determinación entre estos dos parámetros (0,20).

Tabla 27. Análisis de regresión lineal entre la respiración del suelo y los parámetros estudiados en la parcela con aplicación de purín.

Parámetros	Coefficiente de determinación (R²)	Significación
Temperatura del suelo	0,2048	*
Humedad del suelo	0,4135	**
Carbono orgánico disuelto del suelo	0,2818	*
Nitrógeno orgánico disuelto del suelo	0,0504	n.s

Significación: '***' <0,001 '**' <0,01 '*' <0,05, n.s: no significativo para un nivel de 0,05.

6. DISCUSIÓN

6.1. USOS DEL SUELO: ESTUDIO DE LA RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CAMPO

El “secuestro de carbono” implica la eliminación de CO₂ atmosférico por las plantas y el almacenamiento del carbono fijado como materia orgánica del suelo. La estrategia es aumentar la cantidad de carbono orgánico del suelo en el interior de agregados estables, de manera que quede protegido de la actividad microbiana como carbono recalcitrante con un largo periodo de renovación. Una mala gestión del suelo causa el agotamiento del carbono orgánico del suelo con las consiguientes emisiones de CO₂ a la atmosfera.

Como se ha comprobado en este trabajo, la respiración del suelo está relacionada positivamente con la temperatura y la humedad. Durante el estudio de la respiración del suelo en campo se observan diferentes picos de emisión de CO₂ que se producen los días 11 de abril, 2 y 5 de mayo. Estos picos coinciden con los valores más altos registrados en la humedad del suelo. No obstante, no ocurrió lo mismo con el comportamiento de la temperatura, en la que si observamos la gráfica que muestra sus valores (figura 10) ésta no presenta una trayectoria tan similar como ocurre con la respiración del suelo y la humedad.

Los días que muestran el mayor contenido de humedad y, como hemos visto, las mayores emisiones de CO₂, coincidieron en este caso claramente con la llegada de episodios de lluvias. A pesar de que la temperatura generalmente se presenta como el principal factor de control de las tasas de respiración del suelo (Hendrix *et al.*, 1988; Bajracharya *et al.*, 2000), en este ecosistema semiárido el factor limitante es el agua. Tras largos periodos de sequía, la llegada de las lluvias supone un incremento en la actividad vital de toda la comunidad microbiana, creando picos de producción de CO₂ en respuesta a los eventos de precipitación. Este resultado coincide con diversos autores, tales como Curiel Yuste *et al.* (2003) y Huxman *et al.* (2004)

Contando con la totalidad de los datos obtenidos, los modelos de relación lineal mostraron dependencias significativas entre la respiración del suelo con la temperatura y la humedad del suelo, explicando la variabilidad de los datos en un 32% y 22% respectivamente. El resto de las variables estudiadas no presentaron relaciones directas significativas con la emisión de CO₂ del suelo. Frank *et al.* (2002), en condiciones semiáridas, observaron que el principal factor que influye en los flujos de CO₂ del suelo es la temperatura, explicando el 65% de la variabilidad. En este trabajo llevado a cabo el valor del cociente de determinación de la temperatura del suelo es menor, coincidiendo con los resultados obtenidos por Álvaro-Fuentes *et al.* (2006), en un ecosistema semiárido similar del valle del Ebro.

Tal y como se ha comentado en el apartado de Resultados, se observaron diferencias en la temperatura de los distintos usos de suelo. El uso de suelo que alcanzó los mayores valores fue el AU (abandonado) y los menores valores el forestal (FR). Es de suponer que la cubierta vegetal elevada del pinar (espesores de pinaza superficial de hasta 8 cm) y el

espesor de las cubiertas vegetales protejan el suelo de la incidencia solar haciendo disminuir la temperatura del suelo, al contrario de lo que ocurre en AU.

A su vez, el suelo forestal presentó un contenido de humedad mayor, con un valor medio del 20%, mientras que AC presentó los valores más bajos. Por tanto, a pesar de que el uso de suelo AU alcanzó la mayor temperatura no es el que mostró el menor contenido de humedad como cabría esperar atendiendo a los efectos directos que tiene la temperatura en el comportamiento del agua. Un incremento de temperatura supone una mayor evaporación y, por tanto, un menor contenido de humedad. En cambio, aunque cuenta con similitudes respecto al suelo del campo abandonado inalterado (AU), es el suelo abandonado labrado (AC) el que ha registrado el menor contenido de agua. A pesar de la pequeña diferencia entre los resultados descritos, podría deberse a que el laboreo estimuló el crecimiento de la comunidad vegetal, por lo que el consumo de agua fue mayor en AC. Otra causa posible es la formación de costras superficiales en el suelo abandonado labrado que disminuyeron la infiltración del agua.

El uso de suelo más rico en nitrógeno orgánico fue el monocultivo de cebada en siembra directa. La mayoría de los estudios realizados a largo plazo en España sobre los beneficios de la agricultura de conservación (Lacasta *et al.*, 2005; Sombrero *et al.*, 2006; Ordoñez *et al.*, 2007) señalan un aumento de este nutriente en los suelos no labrados, ya que los restos de las cultivos dejados sobre la superficie del suelo generan una mayor cantidad nutrientes, especialmente de nitrógeno.

Las concentraciones de carbono orgánico total del suelo (COS) y carbono orgánico disuelto (DOC) en los suelos analizados revelan las mismas diferencias significativas con el suelo forestal como el más rico en estos dos componentes. A nivel de unidad forestal, la descomposición manifiesta una relación pequeña con la cantidad total de materia orgánica en los suelos, ya que gran parte de ese carbono es relativamente recalcitrante o se descompone lentamente debido a un ambiente desfavorable (baja temperatura o baja disponibilidad de oxígeno). Hay que tener en cuenta que el residuo de pinaza tiene una elevada cantidad de lignina. Así, la lignina es un compuesto que se encuentra fácilmente formando parte de la fracción orgánica en este tipo de suelos, pero se degrada muy lentamente y solo por algunos microorganismos (especialmente hongos) que son capaces de producir los enzimas necesarios para degradarlo. Por tanto, la mayoría de la descomposición en ecosistemas forestales deriva de recientes aportes de hojarasca antes que de la materia orgánica de más edad. Consecuentemente, en bosques, el contenido de carbono orgánico total no es una buena medida del contenido de la cantidad de alimento disponible para los microorganismos ni un buen indicador del nivel de descomposición (Clein *et al.*, 2000). De hecho, la mayor acumulación de carbono ocurre frecuentemente en ecosistemas con una lenta descomposición.

Con la cantidad de carbono de la biomasa microbiana ocurrió algo similar, ya que el suelo del uso FR contó con un mayor contenido. Según Lavelle y Pashanasi, (1989) el carbono de la biomasa microbiana es mayor en suelos en barbecho y marginales que en campos de

cultivo. Aunque el suelo de AU y AC no presentaron diferencias entre sí, coincide con los resultados obtenidos el hecho de que el suelo de NT presentó los valores más bajos, seguido del suelo abandonado inalterado y el suelo abandonado labrado. Hay que tener en cuenta que, generalmente, la actividad de los microorganismos del suelo es más importante que la cantidad de biomasa microbiana a la hora de determinar las tasas de descomposición.

Las alteraciones en la estructura del suelo airean y exponen nuevas superficies al ataque microbiano. Una técnica tradicional y muy extendida es el laboreo del suelo. Con la labranza se produce la rotura de los agregados del suelo exponiéndolos al oxígeno y a la colonización microbiana y posterior descomposición (Paustian *et al.*, 1997, Gregorich *et al.*, 1998).

Uno de los suelos estudiados fue sometido a este laboreo, se trata del uso AC. Este uso de suelo es el que presenta la mayor tasa de respiración de todos los estudiados, con una emisión media de 0,062 g de C de CO₂ m⁻² h⁻¹. En este caso, la emisión de CO₂ mostró una alta relación con la humedad del suelo, explicando la variabilidad de los datos obtenidos en un 82% de los casos.

El suelo abandonado inalterado es el que ocupa el segundo puesto en cuanto a cantidad de CO₂ emitido. Los modelos lineales realizados indican que la descomposición de este suelo tiene una relación positiva con la temperatura. Es interesante este resultado, ya que discrepa con el obtenido por Smith *et al.*, (2008) que identifica el abandono de tierras agrícolas como una de las mejores prácticas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En cuanto a la respiración del suelo forestal y el de cultivo de cebada, estos mostraron comportamientos similares. A pesar de ser el suelo de la masa forestal el que presentó mayor contenido de humedad, carbono orgánico total, carbono orgánico soluble y carbono de la biomasa microbiana, su baja emisión en comparación con los demás usos del suelo podría deberse, como se ha expuesto anteriormente, a las condiciones ambientales desfavorables. Así, la baja temperatura que alcanza podría limitar la actividad descomponedora de los microorganismos presentes, como la falta de oxígeno en el suelo, que también podría ser causante de una baja tasa de respiración, pero en este trabajo no se ha estudiado este parámetro. Estudios realizados por Merino *et al.* (2002) muestran que las mayores tasas de respiración en suelos forestales se producían cuando la temperatura era relativamente alta (>10°C).

Existen múltiples estudios realizados sobre las diferencias de los flujos de dióxido de carbono del suelo a la atmósfera entre suelos cultivados sometidos a diferentes métodos de laboreo y en siembra directa. Álvaro-Fuentes *et al.*, (2005) observaron en ecosistemas semiáridos del valle del Ebro un incremento significativo de los flujos de CO₂ con un tratamiento de laboreo tradicional, siendo los flujos medios siempre inferiores bajo siembra directa que los de cualquier otro método de laboreo.

A pesar de que el trabajo realizado abarca 4 meses de seguimiento y que haría falta una investigación con mayor duración temporal, según los resultados obtenidos, y enmarcada

en un ecosistema semiárido como en el que se ha centrado el estudio, una técnica para disminuir las emisiones de dióxido de carbono del suelo a la atmósfera sería eliminar los periodos en barbecho de las parcelas destinadas a los cultivos, ya que esta técnica tan extendida maximiza la tasa de respiración del suelo. A su vez, el cambio de uso de los suelos en abandono hacia masas forestales o cultivos de siembra directa ayudaría a realizar un secuestro de carbono de la atmósfera, ya que en este caso, son los usos que menores emisiones de CO₂ han producido.

6.2. USOS DEL SUELO: ESTUDIO DE INCUBACIÓN EN LABORATORIO

Mediante la incubación de los suelos, se pretendió conocer el distinto comportamiento de los usos del suelo bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Como hemos visto, estos dos factores son los que mayormente influyen en la descomposición de la materia orgánica del suelo. Así, al presentar todos las mismas condiciones ambientales (condiciones óptimas para la actividad microbiana) se pudo estudiar la respiración potencial de cada uno de los usos considerados.

A pesar de que el análisis de varianza indicó una similar emisión de CO₂ en los 4 usos de suelos, se observó un ligero incremento de la respiración en AC, como ocurría en el estudio de campo, mientras que el suelo FR obtuvo la menor respiración.

El suelo forestal presentó la menor respiración. Así, aunque obtuvo la mayor cantidad de biomasa microbiana, el cociente metabólico mostró que tiene una baja actividad en comparación con el resto de usos de suelo. El modelo cinético ha mostrado que, a pesar de tener un alto contenido de carbono potencialmente mineralizable (Co), el tiempo necesario para su descomposición es largo ($1/k$), en este caso más de 100 años. Cabe mencionar que este modelo no tiene en cuenta las posibles variaciones que puedan producirse en un ecosistema año tras año. La diferencia en el tiempo de residencia que presentó con el resto de suelos puede ser debido al contenido de lignina del sustrato, que aumenta el tiempo requerido para su descomposición.

Después del uso forestal, el suelo NT fue el que menos respiración mostró. En este caso, es NT el que presentó el menor contenido de biomasa microbiana, pero es la que se presentó más activa y este suelo también cuenta con el mayor qmC, no obstante contiene la menor cantidad de carbono mineralizable y un tiempo de descomposición de éste menor que el suelo labrado y el abandonado, de 247 días.

Siguiendo con el orden creciente de emisiones, el uso abandonado inalterado (AU) obtuvo un cociente de mineralización similar al del suelo forestal, aunque en este caso el valor del COS del suelo forestal no es comparable por lo expuesto en el apartado 5.2. Pero AU obtuvo, exceptuando el suelo forestal, el tiempo de residencia más alto, 344 días. Que sea el segundo suelo que emitió más CO₂ según los datos que se han obtenido pudo deberse a su alto contenido en biomasa.

Por último, el suelo labrado es el que emitió más CO₂ a lo largo del tiempo de incubación. El carbono potencialmente mineralizable fue de 4693 mg kg⁻¹, mostrando la relación con el COS más alta de todos. Como hemos visto, sus microorganismos tienen un cociente metabólico mayor que AU y FR con una actividad más baja que en el caso de NT pero con una cantidad de biomasa mayor. Todos estos valores influyeron en que fuera el suelo que más CO₂ emitió.

Por tanto, estos valores respaldan lo comentado anteriormente sobre el impacto de los diferentes usos del suelo en la emisión de CO₂. En este caso, la práctica más recomendable sería la conversión de campos marginales y abandonados en zonas forestales, por su bajo cociente de mineralización y un alto tiempo de residencia del carbono orgánico mineralizable, lo que llevaría a un aumento en las reservas de carbono orgánico del suelo ya que minimiza las pérdidas provocadas por la descomposición.

De todas maneras, estos valores refuerzan que el proceso de secuestro de carbono tiene un potencial finito y no se puede considerar un sustituto de la reducción de las emisiones que sería una estrategia a largo plazo para mitigar el cambio climático. Los cambios en el uso del suelo pueden jugar un papel fundamental mientras se desarrollan alternativas a los combustibles fósiles, se implementan energías limpias y se desarrollan nuevas tecnologías que no aumenten las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

6.3. FERTILIZACIÓN NITROGENADA: ESTUDIO DE LA RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CAMPO A CORTO PLAZO

Son numerosos los estudios que se han realizado sobre el efecto de la fertilización en la emisión de CO₂ de los suelos. Merino *et al.* (2002), encontraron el mayor aumento en los flujos de este gas después de la aplicación de abono mineral y orgánico, mientras que Álvaro-Fuentes *et al.* (2011), concluyeron que la fertilización con nitrógeno mineral incrementaba las emisiones en época de lluvias, pero aumentaba a la larga las reservas de carbono bajo siembra directa.

En este caso el estudio se ha realizado en un periodo corto de tiempo que permitió conocer cómo responden al corto plazo los suelos bajo un sistema de cultivo de cebada justo en el momento de diferentes aplicaciones de nitrógeno mineral y purín.

La parcela control es la que mostró diferencias significativas en la temperatura respecto a las otras dos parcelas estudiadas. La variación temporal de la temperatura del suelo coincidió positivamente con la incidencia solar en las horas de la toma de los datos.

Antes de la aplicación de los fertilizantes, la parcela de nitrógeno mineral presentó el mayor contenido de agua, pero el contenido medio de humedad fue significativamente superior en el caso de la parcela con purín; ya que este tipo de abono presenta gran cantidad de agua.

A su vez, la parcela de abono orgánico presentó los valores más altos de carbono orgánico soluble (DOC) y nitrógeno orgánico soluble (N) en el suelo. El purín es responsable de estos valores ya que en su composición contiene una alta concentración de carbono orgánico disponible y de nitrógeno orgánico tal y como se muestra en la tabla de composición del purín que se muestra en el apartado de Diseño Experimental 4.4 (tabla 1).

Tanto los resultados del DOC como los de N muestran que los valores más altos no se producen inmediatamente después de la aplicación, sino a las 5 horas. En ese momento se observó una disminución de humedad debido al incremento de temperaturas. Este menor contenido de agua pudo afectar al análisis de los dos parámetros mencionados anteriormente. Así, con menor humedad se pudieron encontrar menos diluidos.

El suelo que emitió menos CO₂ fue el correspondiente a la parcela control, con una media de 0,115 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹. Los modelos lineales no relacionaron la respiración del suelo con ningún otro parámetro estudiado en este corto periodo de tiempo.

A pesar de que no se existieron diferencias significativas en emisión de CO₂ entre el tratamiento control y la fertilización mineral, solo existió un muestreo en el que las emisiones de la parcela con nitrógeno mineral superaron a la de control. Esto ocurrió cuando el suelo se encontró a mayor temperatura, es decir 5 horas después de la aplicación. Cabe recordar que la temperatura del suelo fue el único parámetro que mostró relación con la respiración en dicha parcela.

Por último, la mayor producción de CO₂ se obtuvo en la parcela con purín, que mostró diferencias con el resto de parcelas a la hora y a las 5 horas de la aplicación. La respiración del suelo en este caso se relacionó principalmente con la humedad y el carbono orgánico disuelto del suelo. Este resultado coincidió con lo observado por varios autores (Chadwick *et al.*, 1998; Flesa y Beese, 2000; Chantigny *et al.*, 2001; Bol *et al.*, 2003) que observaron un incremento en las emisiones de CO₂ inmediatamente después de la aplicación de abono orgánico líquido, debido a su alto porcentaje de carbono orgánico lábil. La respiración del suelo, por tanto, se puede ver afectada por la composición del purín.

7. CONCLUSIONES

7.1. USOS DEL SUELO: ESTUDIO DE LA RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CAMPO

- La temperatura y la humedad del suelo influyeron directamente en la respiración del mismo, siendo los principales factores que la controlan.
- En ecosistemas semiáridos, el agua es un factor limitante de la actividad de los microorganismos del suelo. Las emisiones de CO₂ del suelo se disparan coincidiendo con periodos de precipitación.
- Entre los 4 usos de suelo estudiados, el abandonado labrado presentó la mayor emisión de CO₂, explicando así la influencia que ejerce el laboreo del suelo en la descomposición del carbono orgánico del suelo.
- El suelo del monocultivo de cebada en siembra directa y el suelo forestal son los que emitieron menos cantidad de dióxido de carbono.
- El suelo forestal presentó los mayores contenidos de carbono orgánico (soluble, total y de la biomasa), por lo que deben considerarse como ecosistemas con un papel importante para una posible captura de carbono.
- En este tipo de ecosistema semiárido, la supresión del laboreo del suelo, la eliminación de los periodos de barbecho y la conversión de campos abandonados o marginales a cultivos en siembra directa se presentan como técnicas que pueden llevar a una disminución de las emisiones de dióxido de carbono de estos suelos.

7.2. USOS DEL SUELO: ESTUDIO DE INCUBACIÓN EN LABORATORIO

- En iguales condiciones de temperatura y humedad, los usos de suelo estudiados no presentaron diferencias respecto a su respiración.
- Los valores de CO₂ acumulado, a pesar de no existir diferencias significativas entre los suelos, mostró un ligero incremento en la producción de este gas en el suelo abandonado labrado y el suelo abandonado inalterado, coincidiendo con los valores de campo.
- El suelo abandonado labrado es el que presentó más carbono potencialmente mineralizable y con uno de los tiempos más cortos de descomposición.
- El suelo forestal exhibió un periodo de descomposición del carbono potencialmente mineralizable de un centenar de años.
- Los modelos cinéticos obtenidos con los datos de las incubaciones en el laboratorio mostraron que las tasas de mineralización fueron menores en el suelo forestal y en el del cultivo de cebada, por lo que respaldan las propuestas realizadas en el apartado anterior. Si bien, en este caso, la conversión a suelo forestal se presentaría como la mejor técnica para la fijación de carbono.

7.3. FERTILIZACIÓN NITROGENADA: ESTUDIO DE LA RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CAMPO A CORTO PLAZO

- A corto plazo la aplicación de abono en forma de nitrógeno mineral en un campo de cebada no afectó a la respiración del suelo.
- Después de añadir el purín, se observó un incremento brusco en las emisiones de CO₂, que con el paso de las horas disminuyó hasta valores iniciales (antes de la fertilización).
- Los parámetros que influyeron de forma más significativa en la respiración de la parcela con purín fueron la humedad y el carbono orgánico, por lo que la composición del purín influyó directamente en las emisiones.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ALMAGRO *et al.* "Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem". *Soil biology & Biochemistry* 41 (2009): 594-605.
- ÁLVARO-FUENTES *et al.* "Soil aggregation and soil organic carbon stabilization: effects on Management in semiarid Mediterranean agroecosystems". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73 (2009): 1519-1529.
- ÁLVARO-FUENTES, J. "Management effects on soil carbon dioxide fluxes under semiarid Mediterranean conditions". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72 (2008): 194-200.
- ÁLVARO-FUENTES, J. "Soil carbon dioxide flux and organic carbon content: effects of tillage and nitrogen fertilization". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75 (2011): 1874-1884.
- ANDERSON, T., DOMSCH, K. "Termination of ecophysiological maintenance C requirements of soil microorganisms in a dormant state". *Biol. Fertil. Soils* 1 (1985): 81-89.
- ASNER G, *et al.* "Global consequences of land use". *Science* 309 (2005): 570-574.
- AUSTIN *et al.* "Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems". *Oecologia* 141 (2004):221-235.
- BAJRACHARYA, R. "Erosion effects on carbon dioxide concentration and carbon flux from an Ohio Alfisol". *Soil Sci. Soc. Am J* (2000).
- BOL *et al.* "Short-term effects of dairy slurry amendment on carbon sequestration and enzyme activities in a temperate grassland". *Soil Sci Soc Am J* 63 (2003):1411-1421.
- BOONE and DAVIDSON. "Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest". *Global Change Biology* 4 (1998): 165-173.
- CARBONELL, R. "Influencia de la climatología y el manejo del suelo en las emisiones de CO₂ en un suelo arcilloso de la Vega de Carmona". *Carel* (2008): 2339-2353.
- CARDENAS *et al.* "Carbon dioxide and methane fluxes from a barley field amended with organic fertilizers under Mediterranean climatic conditions". *Plant soil* (2009).
- CHADWICK *et al.* "Nitrogen transformations and losses following pig slurry applications to a natural soil filter system (solepur process) in Brittany, France". *J Agr Eng Res* 69 (1998):85-93.
- CHANTIGNY M, ROCHETTE P. "Short-term C and N dynamics in a soil amended with pig slurry and barley straw: a field experiment". *Can J Soil Sci* 81 (2001):131-137.
- CLARK, F., PAUL, E. "Soil Microbiology and biochemistry". 2nd Edition. *Academic Press*, San Diego (1996).

- COLE *et al.* "Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions". *Cambridge University Press*, (1996):745-771
- CUIEL YUSTE *et al.* "Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest". *Tree Physiology* 23 (2003): 1263-1270.
- DAVIDSON *et al.* "Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change". *Nature* 4, (2006):165-173.
- DEFOREST *et al.* "Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in Northern hardwood forests". *Soil Sci. Soc. Am J* 68(2004):132-138.
- DING *et al.* "CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affect by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer". *Soil Biol. Biochem* 39 (2007):669-649.
- FARQUHAT *et al.* "The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide". *IPCC, The scientific Basis* (2007): cap. 3.
- FRANQUIS *et al.* "Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales". *For. Lat.* 35 (2004).
- FISHER *et al.* "Nitrogen mineralization in a desert soil: interacting effect of soil moisture and nitrogen fertilizer". *Soil Sci. Soc. Am J* 51 (1987): 777-787.
- FLESSA, H., BLEESE, F. "Laboratory estimates of trace gas emissions following surface application and injection of cattle slurry". *Journal of Environmental Quality* 29 (2000): 262-268.
- FRANK *et al.* "Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands". *Soil Biol. Biochem.* 34 (2002): 1235-1241.
- GARCIA *et al.* "Surface organic carbon, microbial biomass and activity in a forest soil sequence". *Soil biology & Biochemistry* 38 (2006): 2233-2243.
- GARCIA IZQUIERDO, C. *Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos.* Mundi-Prensa (2003).
- GIL, A; GONZALEZ, Emilio, ORDOÑEZ, Rafaela. *Agricultura de conservación. Aspectos agronómicos y medioambientales.* Eumed y MARM, 2010.
- GUO, L., GIFFORD, R. "Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis". *Global Change Biol.* 8 (2002):345-360.
- HARRIS, R.F. "Effect of water potential on microbial growth and activity". *Water potential relations in soils microbiology*, ASA-SSSA, Madison, USA (1981):23-95.
- HAYNES, R. "The decomposition process: Mineralization, immobilization, humus formation, and degradation". *Academic Press*, Orlando (1986).

- HENDRIX *et al.* "Soil respiration in conventional and no tillage agroecosystems under different winter cover crop rotations". *Soil Tillage Res.* 12 (1988): 135-148.
- HOUGHTON, R. "Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000". *Tellus* 55b (2003): 378-390.
- HOUGHTON R., WOODWELL, C. "Global climate change". *Scientific American* 260 (1989): 36-40.
- HUXMAN *et al.* "Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems". *Oecologia* 141 (2004): 254-268.
- IPCC. Cambio climático 2007: informe de síntesis. Ginebra. *IPCC* (2007).
- IQBAL *et al.* "CO₂ emission in a subtropical red paddy soil as affected by straw and N fertilizer applications: a case study in Southern China". *Agr. Ecosyst. Environmental* 131 (2009):292-302.
- JEKINSON, D., POWLSON, D. "The effect of biocidal treatments on metabolism in soil". *Biology and Biochemistry*, 8 (1976): 209-213.
- LACASTA *et al.* "Effects on different management practices on soil conservation and soil water in a rainfed olive orchard". *Agricultural water management* 77, (2005): 232-248.
- LAL, R. "Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the greenhouse effect". *Proy Environ Sci* 1 (1997):307-326.
- LAL, R. "Soil carbon sequestration to mitigate climate change". *Geoderma* (2004).
- LEIRÓS *et al.* "Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture". *Soil Biology and Bioquetry* 31 (1998): 327-335.
- LETTENS *et al.* "Stocks and fluxes of soil organic carbon for landscape units in Belgium derived from heterogeneous data sets for 1990 and 2000". *Geoderma* 127 (2005a):11-23.
- PAUSTIAN, K. "Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions". *Soil Use and Management* 13 (2007): 230-240.
- PAUSTIAN, K. "Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils". *Biogeochemistry* 48 (2000): 147-163.
- MERINO A., PEREZ-BATALLON, P. "Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe". *Soil biology & Bioquetry* 36 (2002): 917-925.
- PINZARI *et al.* "Use of biochemical indices under the Mediterranean environment: comparison among soils under different forest vegetation". *Journal of Microbiological Methods* 36 (1999): 54-60.

- POST, W. "Soil carbon sequestration and land-use change; processes and potential". *Global Change Biology* (2000): 317-327.
- RAICH, J.W. "The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate". *Tellus* 44b (1992):81-99.
- REY, A., PEGORARO, A. "Annual variation in soil respiration and its components under an oak coppice forest in central Italy". *Global Change Biology* 8 (2002):851-866.
- ROBERTSON *et al.* "Soil resources, microbial activity, and primary production across an agricultural ecosystem". *Ecological Applications* 7 (1997): 158-170.
- RODRIGO *et al.* "Modelling temperature and moisture effects on C-N transformations in soils: comparison of nine models". *Ecological Modelling* 102 (1997), 325-339.
- SCHELESINGER, W. "Carbon balance in terrestrial atmospheric CO₂". *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 8 (1977):51-81.
- SCHIMMEL *et al.* "Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils"- *Global Biogeochemical Cycles* 8 (1994):279-293.
- *Secuestro de carbono en tierras áridas*. FAO, 2007.
- SIGMAN, D., BOYLE, E. "Glacial/Interglacial variations in atmospheric carbon dioxide". *Nature* 401 (2000):859:869.
- SINCLAIR, T.R. "Mineral nutrition and plant growth response to climate change". *Journal of Experimental Botany* 43 (1992):1141-1146.
- SMITH, K. "Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink". *Glob Change Biol* 6 (2000):701-803.
- SMITH, Pete. "Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context". *European Journal of Agronomy* (2003): 229-236.
- SMITH *et al.* "Greenhouse gas mitigation in agriculture". *Phil Trans R. Soc.* 77 (2008):167-178.
- SOMBRERO *et al.* "Influencia del laboreo sobre las propiedades químicas del suelo en Agricultura de Conservación". *Agricultura de conservación*, n°2 (2006): 23-48.
- STUART CHAPIN *et al.* *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Toronto, Springer 2011.
- VANCE *et al.* "Microbial biomass measurements in forests soils: determination of Kc values and tests of hypothesis to explain the failure of the chloroform fumigation-incubation method in avid soils". *Soil Biology & biochemistry* 19 (1987):381-386.
- WHITFORD, W. "Ecology of desert systems". *Academic Press*. London (2002).