



“Experiencias demostrativas Acción B1, B2 y B3. Informe Final”

Actualización entregable perteneciente a la

**ACCIÓN B1: Experiencias demostrativas de cambio de uso del suelo
secano-regadío para fijación de carbono**

**ACCIÓN B2: Experiencias demostrativas de diferentes manejos en
cultivos no permanentes de regadío en relación a la fijación de C y
balance de emisiones**

**ACCIÓN B3: Experiencias demostrativas de uso de cubiertas vegetales
en cultivos permanentes de regadío en relación a la fijación de C y
balance de emisiones**

(Responsabilidad de UPNA)

del proyecto “LIFE+ RegaDIOX (LIFE12 ENV/ES/000426)”

PROGRAMA LIFE+ 12

Fecha: 30/06/2016

Informe Final sobre las experiencias demostrativas realizadas en la Acciones B1, B2 y B3.

1. Introducción

2. Metodología

- 2.1. Cuantificación del Stock SOC
- 2.2. Cálculo de las emisiones de GEI
- 2.3. Cálculo del balance de GEI
- 2.4. Zonas de estudio y definición de Unidades de Gestión de Cultivo (UGCs)
 - 2.4.1. Acción B1
 - 2.4.2. Acción B2
 - 2.4.3. Acción B3
- 2.5. Estudio de indicadores ambientales
 - 2.5.1. Erosionabilidad
 - 2.5.2. Diversidad funcional de los microorganismos del suelo

3. Resultados

- 3.1. Cuantificación de los Stock de SOC
 - 3.1.1. Acción B1
 - 3.1.2. Acción B2
 - 3.1.3. Acción B3
- 3.2. Emisiones de GEI
 - 3.2.1. Acción B1
 - 3.2.2. Acción B2
 - 3.2.3. Acción B3
- 3.3. Balances de GEI
 - 3.3.1. Acción B1
 - 3.3.2. Acción B2
 - 3.3.3. Acción B3
- 3.4. Estudio de indicadores ambientales
 - 3.4.1. Erosionabilidad
 - 3.4.2. Diversidad funcional de los microorganismos del suelo

4. Discusión de resultados y conclusiones

1. Introducción

Las acciones B1, B2 y B3 están dentro de la línea de trabajo del proyecto LIFE Regadiox sobre “Fijación de carbono orgánico en el suelo y balance emisiones de GEI”. Pretenden conocer con precisión las alteraciones que se producen en diferentes sistemas de cultivo con la transformación secano/regadío, tanto en relación a la conservación y el manejo del suelo como a la eficiencia energética y económica de los agrosistemas. Precisamente éste es uno de los objetivos del proyecto, demostrar cómo diferentes manejos de los cultivos pueden tener asociadas diferentes tasas de secuestro de C y de emisiones de GEI. Las 3 acciones estaban planificadas para su ejecución en los 2 primeros años del proyecto, siendo su fecha de finalización prevista el 31 de diciembre de 2015.

La primera de ellas, la B1 “Experiencias demostrativas de cambio de uso del suelo secano-regadío para fijación de carbono”, tiene como objetivo la evaluación del cambio de uso de suelo de secano a regadío. Las experiencias demostrativas de esta línea comparan el stock de C orgánico del suelo en parcelas de secano, testigos, con parcelas con riego. El estudio ha identificado diferentes manejos, tanto de secano como de regadío, que influyen en la dinámica de la materia orgánica y almacenamiento de C en el suelo. Además se recopilan datos a partir de encuestas individuales a los gestores de cada una de las parcelas demostrativas incluidas en la acción para realizar los balances de emisiones de GEI ligados a cada parcela y manejo.

La acción B2 “Experiencias demostrativas de laboreo en cultivos herbáceos de regadío encaminado a la mayor fijación de carbono”, tiene como objetivo la evaluación de diferentes sistemas de producción en cultivos no permanentes de regadío. Esta línea supone la comparación del stock de C orgánico asociado a diferentes intensidades de manejo del regadío con cultivos no permanentes. Además también se han recopilado datos para realizar sus balances de GEI. Los diferentes sistemas de producción considerados incluyen técnicas de agricultura convencional y técnicas de agricultura de conservación. Se consideran tres tipos contrastados de manejo: cultivos de alta intensidad (más de un laboreo profundo al año); media intensidad (un laboreo profundo al año) y baja intensidad de laboreo (cultivo forrajero con 3-4 años de permanencia).

El objetivo de la tercera de las acciones, la B3 “Experiencias demostrativas de uso de cubiertas vegetales en cultivos permanentes (leñosos) de regadío” es la evaluación de diferentes sistemas de producción en cultivos permanentes (leñosos). Comparación del stock de C orgánico y recopilación de datos para realizar balances de GEI en parcelas con cultivos permanentes en los que el regadío permite implantar cubiertas en las calles y el mismo cultivo en regadío sin cubierta. Considerando la diversidad de la zona, se han seleccionado dos cultivos de gran importancia dentro de la misma, el olivo y la viña, en los que la cubierta tiene interés y por tanto se está implantando.

Considerando que el efecto de la transformación a regadío y la influencia del manejo en el stock de C orgánico son dependiente del tipo de suelo, clima y manejo se han cuantificado, con efectos demostrativos, las posibles diferencias existentes entre 2 zonas agroclimáticas distintas de Navarra, los tipos de suelo más característicos en cada zona y los sistemas de producción más extendidos. Además, se incluye de manera indirecta el factor tiempo, ya que los regadíos de las

diferentes zonas incluidas en el estudio han sido transformados a regadío en distintos periodos de tiempo.

La selección de parcelas se ha basado, por lo tanto, en los siguientes criterios:

- Clima → A fin de abarcar diferentes condiciones agroclimáticas y de buscar el contraste entre zonas áridas o semiáridas y otras más húmedas, el trabajo se realiza por duplicado en 2 áreas geográficas de Navarra (Figura 1).
- Suelo → Con la intención de controlar al máximo las variables que ocupan un papel importante en el proceso de estabilización de C orgánico del suelo, la selección de las parcelas demostrativas en cada zona se realiza, en la medida de lo posible, de forma que se encuentren sobre la misma tipología o unidad de suelo.



Figura 1. Zonas agroclimáticas del estudio

- Manejos → Los manejos seleccionados son específicos en cada una de las acciones. En el caso de la B1 el estudio ha identificado diferentes manejos más representativos de la agricultura de Navarra, tanto de secano como de regadío (descritos en el apartado de “Zonas de estudio y definición de UGCs”) que pueden influir en la dinámica de la materia orgánica y almacenamiento de C en el suelo.

Por ser estas acciones dentro del proyecto Life Regadiox un trabajo de alcance regional, todos los resultados obtenidos, tanto en términos de almacenamiento de C orgánico, como de emisiones de GEI y tasas de secuestro, se refieren a unidades de superficie. Es decir, son parámetros determinados por hectárea. Queda fuera del objeto y alcance del proyecto realizar estas estimaciones en base a otros criterios, como la producción o la rentabilidad (emisiones por kg de biomasa o por euro generado). Sin embargo, los datos generados abren la puerta a otro tipo de estimaciones, al referirse a valores brutos medidos y/o estimados en parcelas reales de producción del territorio navarro.

2. Metodología

2.1 Cuantificación del Stock SOC

La evaluación del secuestro de C en el suelo ha sido realizada en base al stock debidamente cuantificado en las parcelas seleccionadas. Para ello se ha utilizado el protocolo de muestreo propuesto por la comisión europea: Area-frame randomized soil sampling protocol (Stolbovoy et

al., 2007)¹. Dicho protocolo presenta una fase de muestreo minuciosa en las parcelas que garantiza la representatividad de los resultados y calcula el stock de carbono orgánico del suelo a partir de diferentes parámetros: contenido de carbono en el suelo, densidad aparente y porcentaje de elementos gruesos.

El diseño de muestreo propuesto en el protocolo está basado en una plantilla que se ajusta al área a muestrear de las parcelas. Para la correcta ejecución de los objetivos del proyecto, se ha delimitado la superficie de muestreo de las parcelas en función de 2 criterios: El primero es la tipología de suelo, para garantizar que el control se realiza sobre la tipología de suelo más homogénea y común al conjunto de parcelas seleccionadas en cada zona y acción. El segundo criterio es según uso o manejo, ajustándose la superficie de muestre descartando zonas de las parcelas que se dejan sin cultivar o zonas destinadas a otros usos.

De esta forma, la nueva superficie definida de cada parcela, denominada como Unidad de Gestión de Cultivo (UGC), corresponde con una misma tipología de suelo común con el resto de parcelas incluidas en esa acción en cada zona y a la superficie bajo el manejo que queremos evaluar.

2.2 Cálculo de las emisiones de GEI

Los balances de emisiones de GEI han sido elaborados utilizando la herramienta desarrollada en el marco del proyecto EURENERS 3 para el cálculo de la Huella de Carbono (HC) de productos agroalimentarios que mide la cantidad de GEI que se emiten a la atmósfera a lo largo de su Ciclo de Vida. La metodología de cálculo de la herramienta cumple los requisitos de la norma PAS 2050 basada en el análisis de ciclo de vida de los productos agroalimentarios. Esta herramienta incluye tanto las emisiones directas, aquellas que se producen directamente durante el proceso de producción, como las indirectas, que ocurren físicamente en una instalación diferente pero que son consecuencia y por tanto están ligadas al proceso de producción (generación de energía eléctrica, producción y transporte de inputs o tratamiento de residuos plásticos).

En este caso el cálculo de las emisiones se ha realizado a nivel de parcela agrícola, teniendo en cuenta las actuaciones e inputs que se utilizaron en las parcelas sujetas a estudio. Para ello se han contabilizado emisiones ligadas al propio suelo agrícola, a la producción de inputs como semillas, fitosanitarios y fertilizantes, la electricidad empleada en el bombeo (cuando lo hay), combustibles de las labores agrícolas y aceites de motor de los tractores, tratamientos de residuos plásticos de envases de fitosanitarios y la quema autorizada de residuos agrícolas. Para cada una de las actividades realizadas en las parcelas agrícolas las emisiones se calculan multiplicando los datos de las actividades por sus respectivos factores de emisión. Para ello la herramienta dispone de una amplia base de datos con los factores de emisión asociados a diferentes inputs y actividades que permite calcular un valor total de emisiones de GEI expresado en kilogramos de CO₂ equivalente.

¹ Stolbovoy, V., Montanarella, L., Filippi, N., Jones, A., Gallego, J., & Grassi, G. 2007. *Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union*. Version 2. EUR 21576 EN/2. 56 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. ISBN: 978-92-79-05379-5

Los datos de actividad de este proyecto que se han utilizado en esta herramienta provienen de una encuesta individual que ha sido realizada a cada agricultor gestor de las parcelas que están incluidas en el estudio. Dicha encuesta incluye toda la información necesaria sobre la campaña agrícola del año de ejecución de la acción que permite hacer el cálculo de emisiones a nivel de parcela.

2.3 Cálculo del balance de GEI

El balance de GEI compara el secuestro de carbono con las emisiones de GEI. Para cada parcela, se ha obtenido el valor del balance de GEI restando el dato de la tasa anual de secuestro de carbono atmosférico acumulada hasta la fecha de medición en valor medio anual, al importe de la tasa anual de emisiones de GEI. El resultado se ha expresado en $\text{Mg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Por tanto, un valor negativo del balance indica que, en dicha parcela, la fijación de carbono es superior a las emisiones en el año de estudio. Estos valores de balance son por tanto orientativos, y se refieren al momento de realización del estudio en cada parcela.

2.4 Zonas de estudio y definición de las Unidades de Gestión de Cultivo (UGCs)

La red de parcelas demostrativas fue el principal resultado de las acciones preparatorias del proyecto. En las acciones de implementación B1, B2 y B3 se han definido las UGCs ligadas a cada una de ellas.

2.4.1 Acción B1

- Valtierra

Regadío de 20 años de antigüedad, transformado en el año 1995, situado en la Ribera Baja de Navarra. Las 4 parcelas seleccionadas dentro de esta acción corresponden a los siguientes manejos: Secano convencional, secano con enmiendas orgánicas, regadío de intensidad media y regadío intensivo (Figura 2). Las dos parcelas de secano (con y sin enmiendas orgánicas) se vienen cultivando con cereal de invierno según el sistema tradicional de año y vez. La parcela de regadío de intensidad media está sembrada con maíz grano, cultivo que se ha repetido en dicha parcela en, al menos, los 10 últimos años. Además, en esta parcela se realiza siembra directa. La parcela de regadío intensivo, que cuenta con un histórico de cultivos hortícolas desde su transformación en regadío, fue cultivada con maíz dulce y brócoli en el año de estudio.

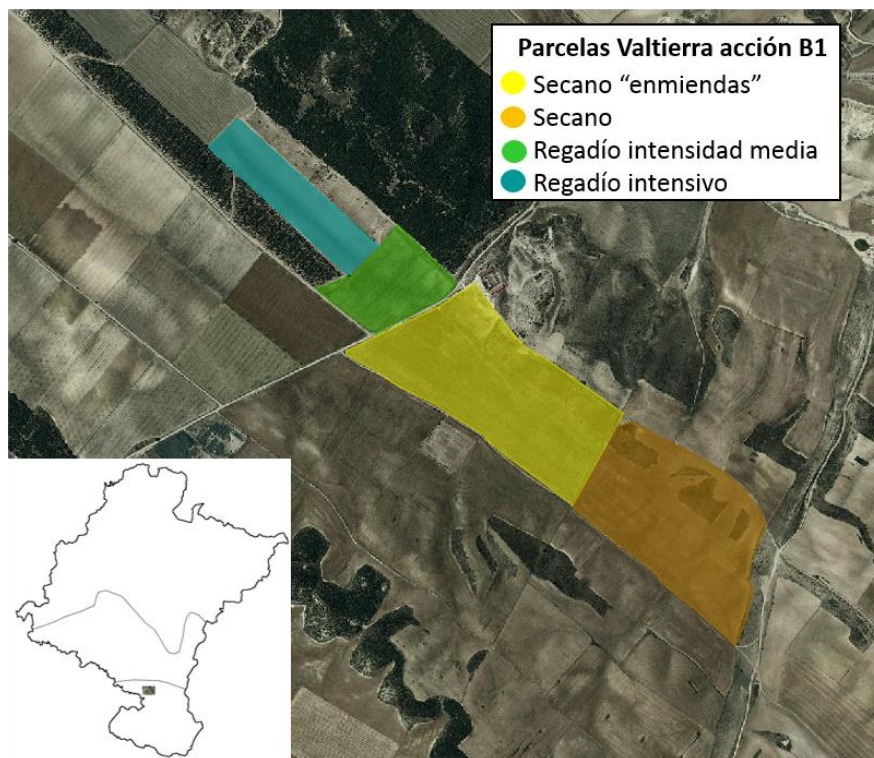


Figura 2. Parcelas de la acción B1 situadas en Valtierra.

En la zona de Valtierra de han definido las siguientes UGC's asociadas a la acción B1 (Figura 3):

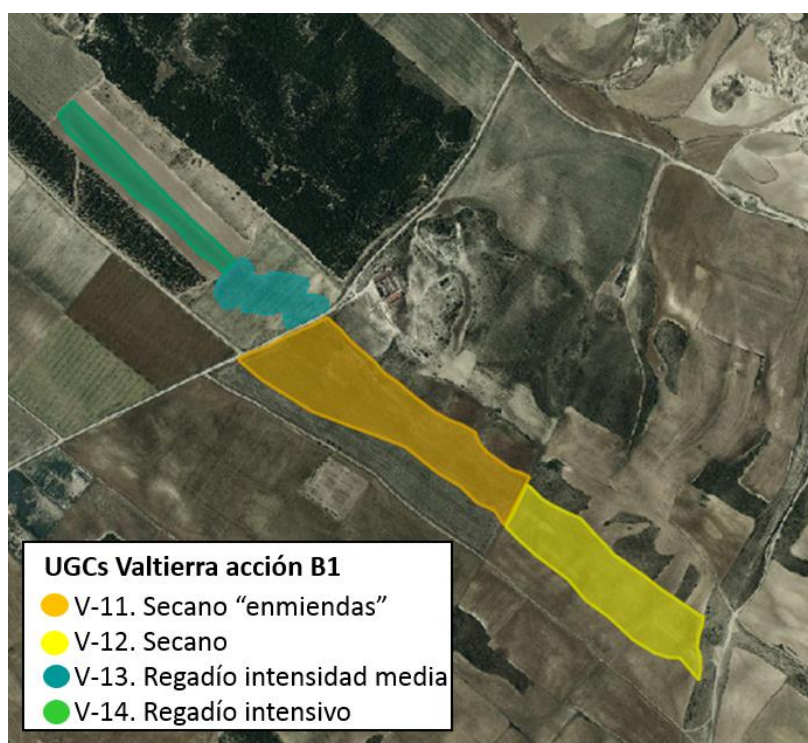


Figura 3. UGCs correspondientes a las parcelas de la acción B1 en Valtierra.

- Miranda de Arga

El regadío de Miranda de Arga es el más reciente de los incluidos en el proyecto, ya que fue transformado en 2009. Está situado en la zona media de Navarra. En la acción B1 tiene asociadas 3 parcelas que incluyen los siguientes manejos: Secano convencional, consistente en un monocultivo de cereal; regadío de intensidad media: en esta parcela se ha sembrado maíz grano en el año de estudio, mientras que en los años precedentes el cultivo ha sido también maíz o bien trigo; y regadío intensivo, con cultivo de hortalizas desde la transformación en regadío, siendo maíz y habas los cultivos de la campaña de estudio (Figura 4).

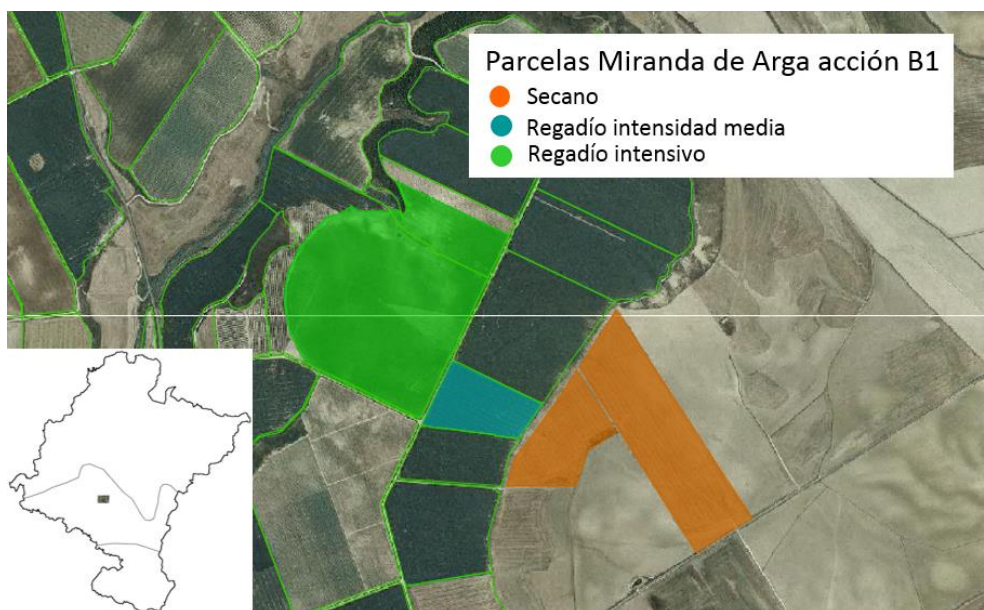


Figura 4. Parcelas de la acción B1 situadas en Miranda de Arga.

A partir de estas parcelas e han definido las siguientes UGCs para la acción B1 en Miranda de Arga (Figura 5):

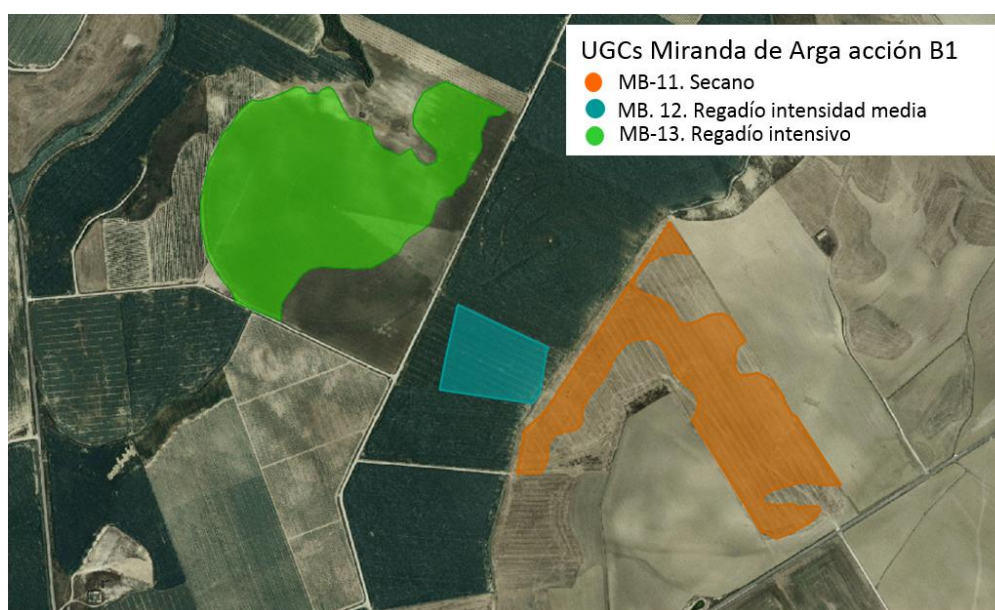


Figura 5. UGCs correspondientes a las parcelas de la acción B1 en Miranda de Arga.

2.4.2 Acción B2

- Funes

Regadío situado en la zona meridional de Navarra transformado en el año 2002. Las parcelas asociadas a esta acción en esta zona corresponden a los siguientes manejos: una parcela de regadío de media intensidad, consistente en un cultivo de maíz grano (al igual que en los últimos tres años); una parcela de cultivo forrajero intensivo. En esta parcela se ha sembrado maíz forrajero en el año de estudio. De forma análoga al razonamiento expuesto en el caso anterior, se ha considerado como un regadío intensivo ya que el historial de esta parcela es de cuatro campañas consecutivas con una rotación anual de ray-grass y maíz forrajero. La tercera parcela de la acción B2 en Funes es un regadío intensivo dedicado a cultivos hortícolas. Si bien en el año de estudio sólo tuvo un cultivo de pimiento (por lo que estrictamente debería considerarse como un regadío de media intensidad), se considera como regadío de alta intensidad debido a su histórico de hortícolas con más de un cultivo al año. En este caso el área de muestreo de las parcelas (UGC) coincide con el área catastral de las parcelas (Figura 6).

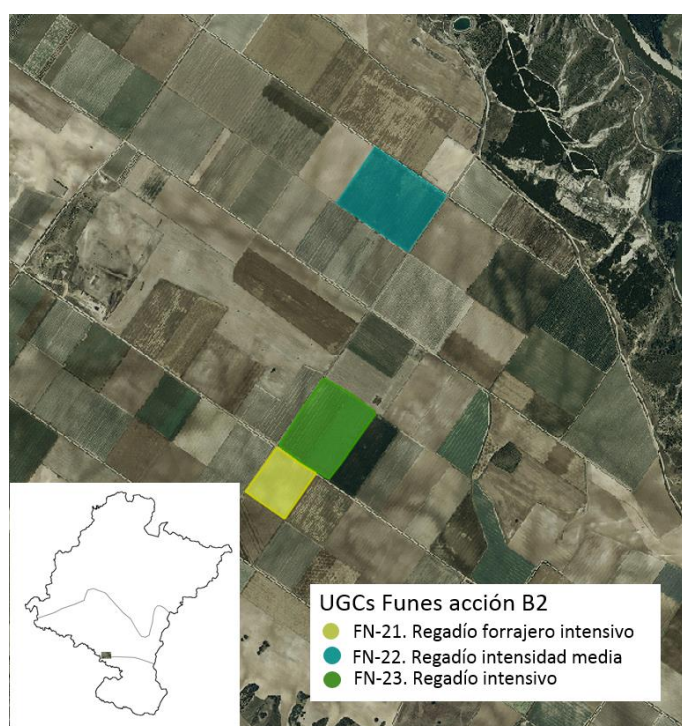


Figura 6. Parcelas y UGCs de la acción B2 situadas en Funes.

- Miranda de Arga

El regadío de Miranda de Arga también cuenta con 3 parcelas ligadas a la acción B2 del proyecto, en este caso incluyen los siguientes manejos: regadío de baja intensidad, con un cultivo de alfalfa; regadío de media intensidad, con un cultivo de maíz (esta parcela se ha sembrado siempre con un cereal en los últimos años); y regadío intensivo, con cultivos hortícolas durante el año de estudio y los anteriores (Figura 7).

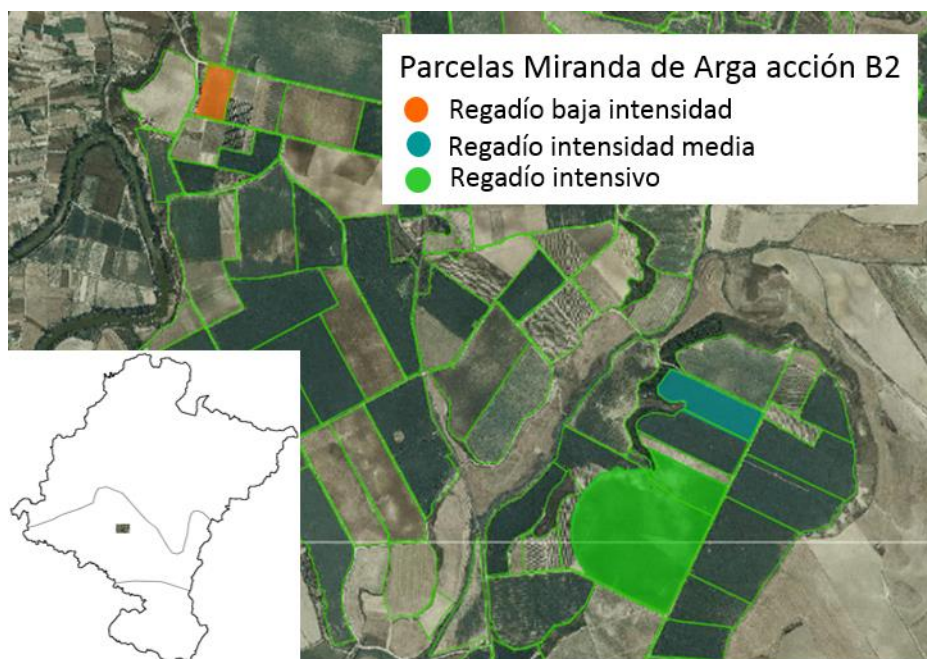


Figura 7. Parcelas de la acción B2 situadas en Miranda de Arga.

A partir de estas parcelas se han definido las siguientes UGCs para la acción B2 en Miranda de Arga (Figura 8):

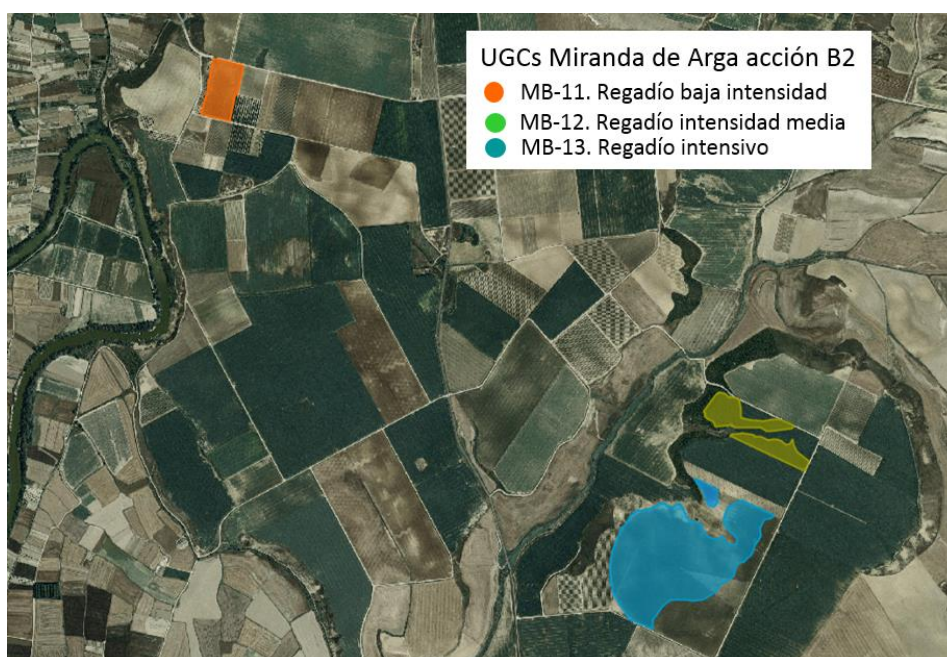


Figura 8. UGCs correspondientes a las parcelas de la acción B2 en Miranda de Arga.

2.3.3 Acción B3

Viña

- Olite

Dentro de la acción B3 con cultivo de viña, está incluida una parcela experimental que pertenece a la Estación de Viticultura y Enología de Navarra (EVENA) y que está situada en Olite, zona media de Navarra. En ella se dispone de una subparcela que cuenta con un ensayo de cubiertas vegetales permanentes (sembradas en 2013) que consiste en evaluar cómo afecta su uso a los rendimientos de distintas variedades de uva. Los controles ligados al proyecto se han realizado en esa zona, que constituye por lo tanto la UGC (Figura 9).

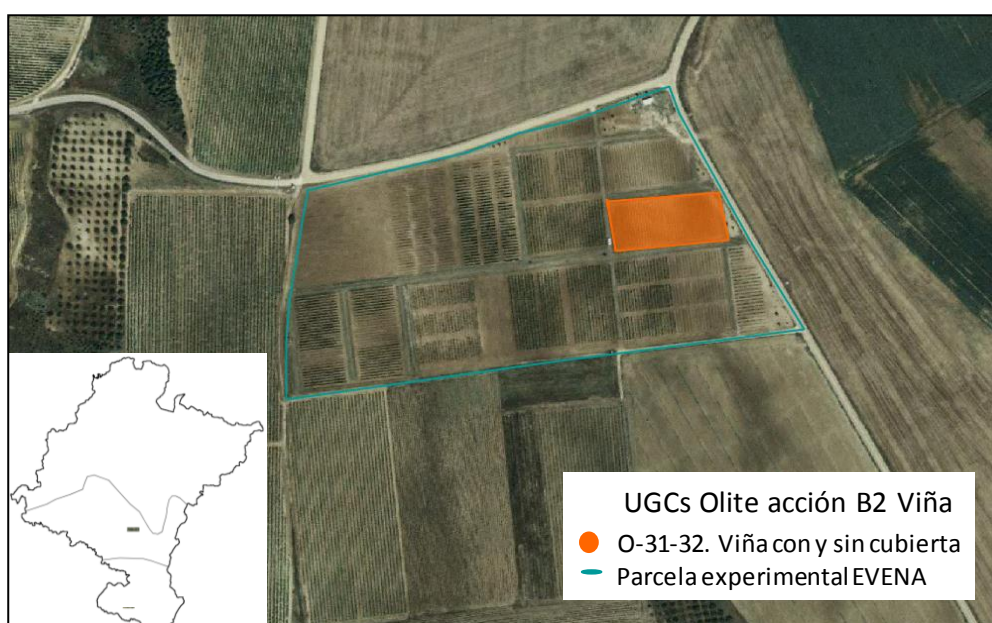


Figura 9. Parcelas y UGCs de la acción B3 situadas en Olite.

- Cascante

En el municipio de Cascante se encuentran las 2 parcelas de viña ligadas al proyecto en la zona sur de Navarra. Son 2 parcelas (con y sin cubierta vegetal) situadas una a continuación de la otra. La cubierta vegetal fue sembrada en 2002. En este caso, el área de muestreo (UGC) también se corresponde con la parcela catastral (Figura 10).

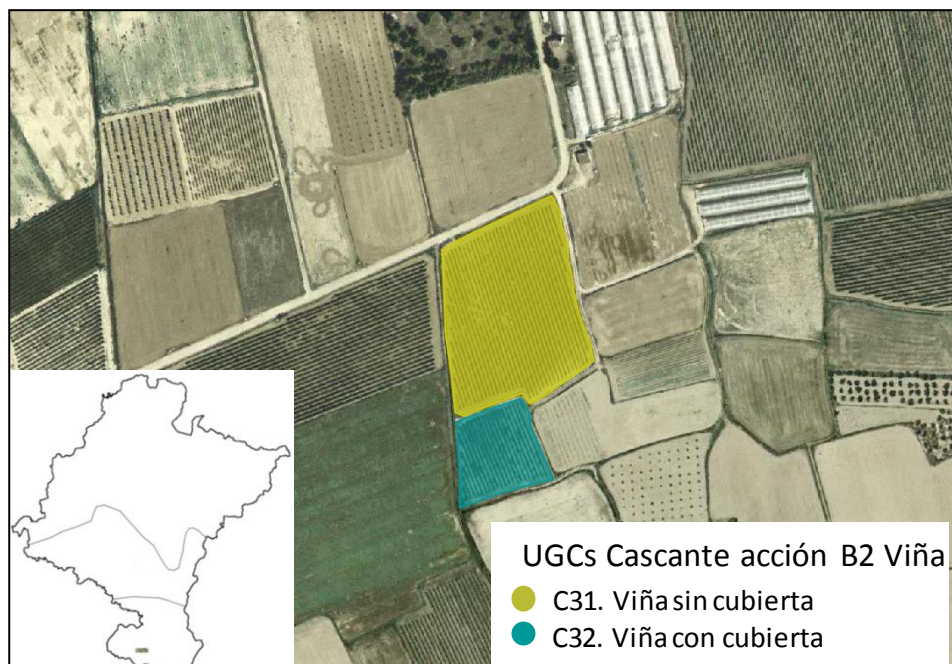


Figura 10. Parcelas y UGCs de la acción B3 situadas en Cascante.

Olivo

- Miranda de Arga

En el regadío de Miranda de Arga también se localiza una parcela de olivo con cubierta (con un antigüedad de 4 años cuando se realizó el estudio) ligada a la acción B3 del proyecto (Figura 11).

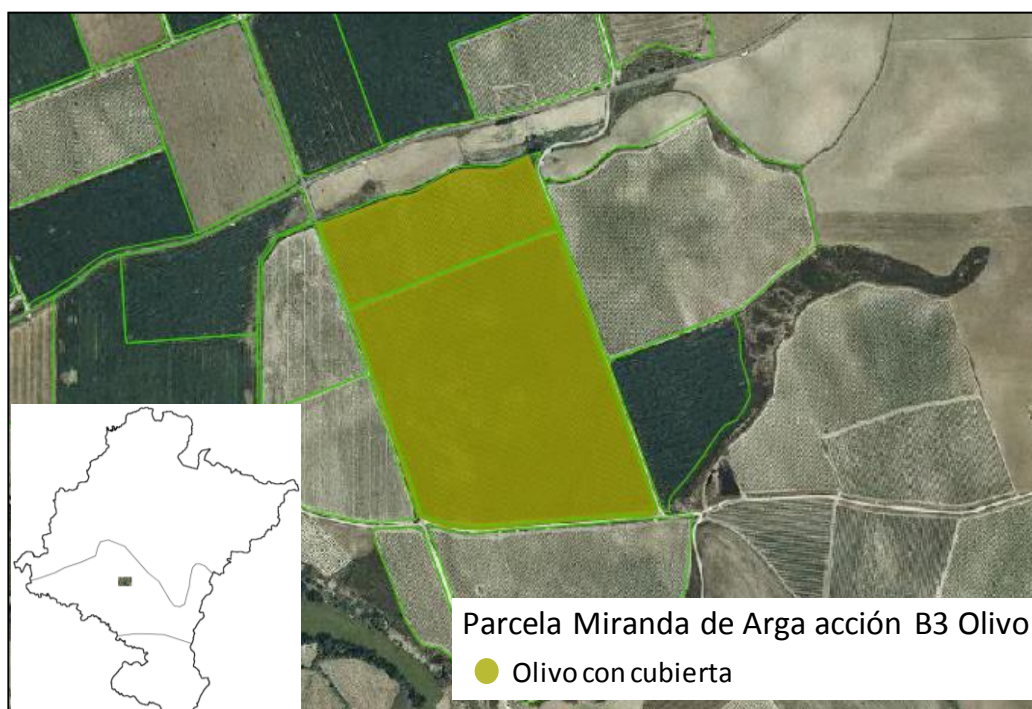


Figura 11. Parcela de la acción B3 situada en Miranda de Arga.

A partir de esta parcela se ha definido la siguiente UGC para la acción B3 en Miranda de Arga (Figura 12):



Figura 12. UGC correspondiente a las parcela de la acción B3 en Miranda de Arga.

- **Fontellas**

Entre los municipios de Fontellas y Ribaforada se encuentran las 2 parcelas de olivo ligadas al proyecto en la zona sur de Navarra. La cubierta vegetal, en la parcela que dispone de ella, tenía en el momento del estudio una antigüedad de 16 años. En este caso, el área de muestreo (UGC) se corresponde con la parcela catastral (Figura 13).

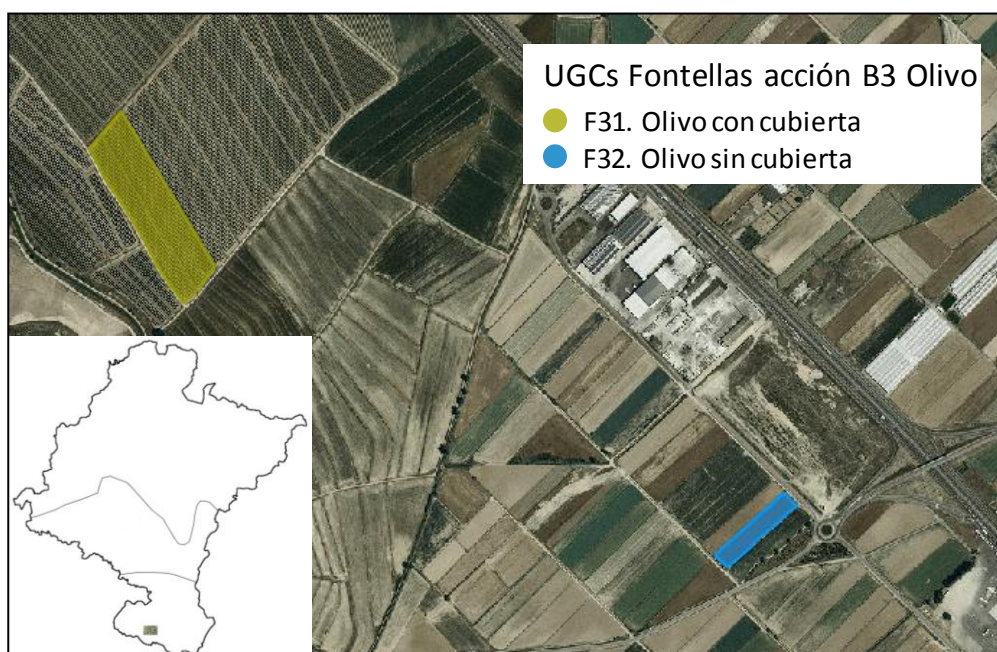


Figura 13. Parcelas y UGCs de la acción B3 situadas en Fontellas.

2.4 Estudio de Indicadores Ambientales: Erosionabilidad y Diversidad Funcional de los Microorganismos del Suelo

2.4.1 Erosionabilidad

La **erosionabilidad** del suelo de cada parcela se determinó mediante el cálculo del factor K, perteneciente al modelo empírico RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). El factor K es una medida de la erosionabilidad en una parcela agrícola modelo, por lo que su valor depende únicamente de las propiedades inherentes del suelo (textura, materia orgánica, estructura y permeabilidad). El cálculo se realiza para los 15 cm superficiales del suelo.

La fórmula para el cálculo del factor K es [eq. 1]:

$$100 \times K = [10^{-4} \times 2,71 \times T^{1,14} \times (12 - MO)] + 4,2 \times (E - 2) + 3,2 \times (P - 3) \quad [\text{eq. 1}]$$

donde:

K: factor K de erosionabilidad del modelo RUSLE ($\text{Mg m}^{-2} \text{ h ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

T: Parámetro de textura. Se calcula a partir de la eq. 2:

$$T = [(100 - Ac) \times (L + Armf)] \quad [\text{eq. 2}]$$

donde :

Ac : % arcilla

L: % limo

Armf: % arena muy fina (2 - 100 μm)

MO: % materia orgánica

E: parámetro de estructura

P: parámetro de permeabilidad

Se ha considerado que todas las parcelas tienen una estructura en bloques o prismas ($E = 5$) y una permeabilidad moderada ($P = 3$)

2.4.2 Diversidad funcional de los microorganismos del suelo

Finalmente, la **diversidad funcional** se determinó con el método EcoPlacas™ de Biolog, Inc. (www.biolog.com) para las muestras de la primera profundidad (0-5 cm). Entre los métodos para estudiar la biodiversidad microbiana edáfica se encuentran los análisis metabólico-funcionales en base a perfiles fisiológicos a nivel de comunidad obtenidos con placas de este tipo. Estas placas permiten estimar la diversidad metabólico-funcional de las comunidades microbianas del suelo a partir de la evaluación de su capacidad para utilizar diferentes sustratos de C. Estas microplacas constan de 31 pocillos en triplicado con distintos sustratos de carbono más un pocillo como blanco

para cada réplica. Estos sustratos son diferente naturaleza y origen, y concentración de C similar. La diversidad se midió a partir de los perfiles de las respuestas catabólicas de los microorganismos para los diferentes sustratos de carbono orgánico, que se relacionan con la diversidad catabólica de los microorganismos (Degens, et al. 2000)².

Sobre las muestras de suelo fresco se realizó una extracción mediante agitación con agua Mili-Q durante 1h. Tras un tiempo de decantación, se sembraron los sustratos de las ecoplatas alícuotas de 150 μ L a partir de una muestra compuesta por 0,2 mL de extracto y 19,8 mL de agua en las EcoPlacas. Las placas contienen un indicador (tetrazoilo) que se reduce con NADH para formar una coloración morada según el sustrato es metabolizado por los microorganismos presentes en la solución. Estas placas fueron incubadas a 30 °C durante una semana y la medición de color (absorbancia a 590 nm) se realizó cada 12 h aproximadamente (Figura 14). Esta técnica, si bien no considera toda la comunidad biológica del suelo al realizarse a partir de extractos acuosos, sirve como aproximación a la diversidad funcional del suelo, especialmente cuando un suelo se compara consigo mismo bajo diferentes manejos. Los resultados obtenidos permiten observar, para cada manejo, las curvas de desarrollo de la actividad biológica para cada uno de los sustratos testados, y para el conjunto de sustratos (*average well color development*, AWCD). Esta actividad se midió a partir de la media de la absorbancia de todos los pocillos en cada tiempo de lectura, una vez corregidos los datos brutos de absorbancia, para cada tratamiento y/o suelo estudiado.

A partir de esta observación, se pueden establecer indicadores cuantitativos, como el número de sustratos utilizados al cabo de un tiempo dado (NSU). En este estudio, se consideró para este cálculo la absorbancia media de cada tratamiento en la fase de crecimiento exponencial de la comunidad microbiana, que se determinó como el tiempo donde la curva AWCD presenta la máxima pendiente (Campbell et al., 2003)³. El valor de absorbancia de 0,25 marcó el comienzo de la fase de crecimiento exponencial de los microorganismos, y por lo tanto, el número de sustratos que presentaron una absorbancia mayor o igual a 0,25 se consideraron para el cálculo del índice NSU. Para cada repetición se determinó el número de pocillos cuya absorbancia, una vez corregida, fue mayor o igual que 0,25. Posteriormente se agruparon los números de sustratos utilizados en familias.

² Degens, B.P., Schippers, L.A., Sparling, G.P., Vojvodic-Vakovic, M. 2000. *Decreases in organic C reserves in soils can reduce the catabolic diversity of soil microbial communities*. Soil Biol Biochem 32(1): 189-196

³ Campbell, C.A., Chapman, S.J., Cameron, C.M., Davidson, M.S., Potts, J.M. 2003. *A rapid microtiter plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil*. Appl Environ Microb 60: 3893-3599

Otros índices de biodiversidad, como el índice de Shannon ($H' = -\sum p_i \log_2 p_i$) se han calculado también a partir de datos de EcoPlacas™ (por ejemplo, en Mijangos et al., 2009)⁴. En este caso, se considera p_i la relación entre la absorbancia de cada pocillo y la suma de la absorbancia de todos los pocillos, considerando así los valores de absorbancia de cada pocillo equivalente a la abundancia de individuos en cada especie.



Figura 14. Lectura de la absorbancia de una EcoPlaca™ de BioLog, Inc.

⁴ Mijangos, I., Beceril, J.M., Albizu, I., Epelde, L., Garbisu, C. 2009. *Effects of glyphosate on rhizosphere soil microbial communities under two different plant compositions by cultivation-dependent and –independent methodologies*. Soil Biol Biochem 41: 505-513

3. Resultados

3.1 Cuantificación Stock SOC

3.1.1 Acción B1

- Valtierra

Los resultados obtenidos en la acción B1 en Valtierra indican que la parcela cultivada en regadío de intensidad media (maíz) posee un stock de carbono orgánico superior al secano, tanto si en este último se han realizado enmiendas orgánicas (un 34% más) como si no (un 74% más) (Tabla 1 y Figura 15). Por el contrario, en el caso del regadío intensivo (hortícolas) no se observan diferencias significativas con respecto al secano. Si prestamos atención a los distintos tipos de manejo en secano, cabe destacar que el stock de carbono orgánico es un 30% superior en la parcela en la que se han realizado aportes de materia orgánica.

En el regadío de media intensidad, el aumento del stock de carbono orgánico equivale a 155 Mg CO₂ ha⁻¹. Dado que la transformación en regadío de esta parcela se llevó a cabo en 1995, la tasa anual de secuestro sería de 7,8 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ (Tabla 1 y Fig. 16). En comparación, la tasa anual de secuestro inducida por la aplicación de abonos orgánicos en secano es un 59% inferior a dicho valor.

Tabla 1. Stock de carbono orgánico (Mg/ha), CO₂ equivalente, tasa anual de secuestro de CO₂ y tasa total desde la conversión en regadío en las parcelas de la acción B1 en Valtierra.

Valtierra	SOC (Mg/ha)	CO ₂ eq (Mg/ha)	Tasa anual (Mg CO ₂ eq/ha*año)	Secuestro total (Mg CO ₂ eq/ha)
V11 Secano	57,30 a	210,10	NA*	NA*
V12 Secano enmiendas orgánicas	74,49 b	273,13	3,15	63,03
V13 Regadío de media intensidad	99,62 c	365,29	7,76	155,19
V14 Regadío intensivo	68,32 ab	250,49	2,02	40,39

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en el secano es igual a 0.

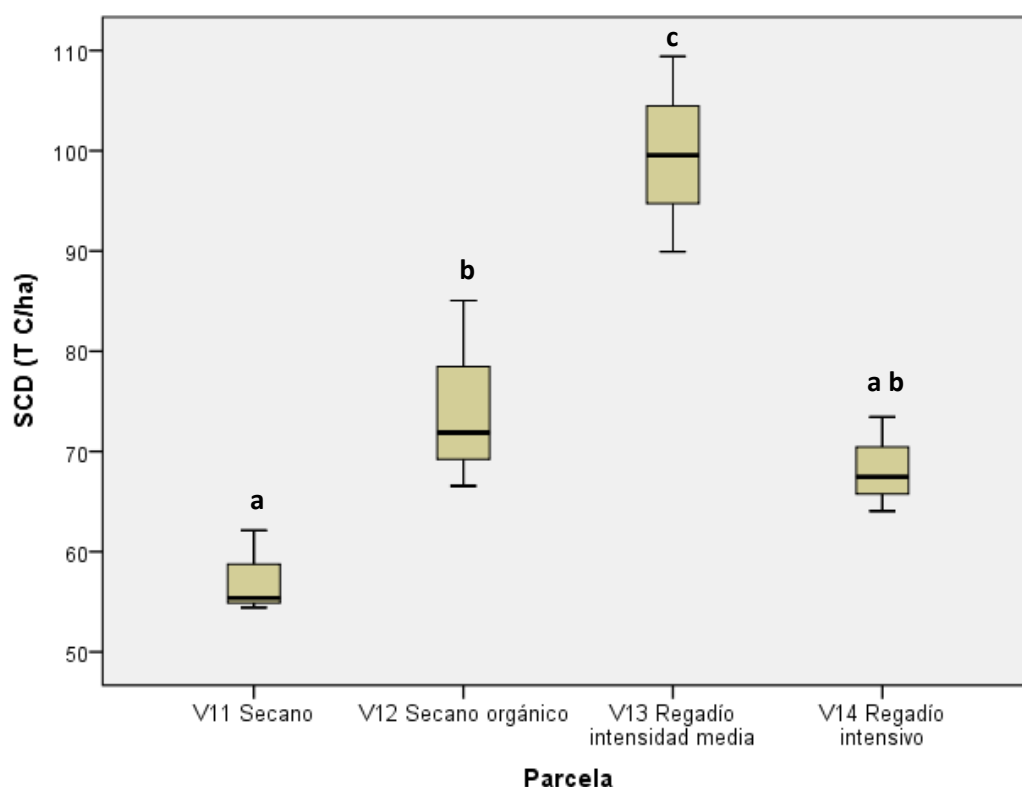


Figura 15. Diagrama de cajas de los valores del stock de materia orgánica (Mg C ha^{-1}) de las parcelas de la acción B1 de Valtierra. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

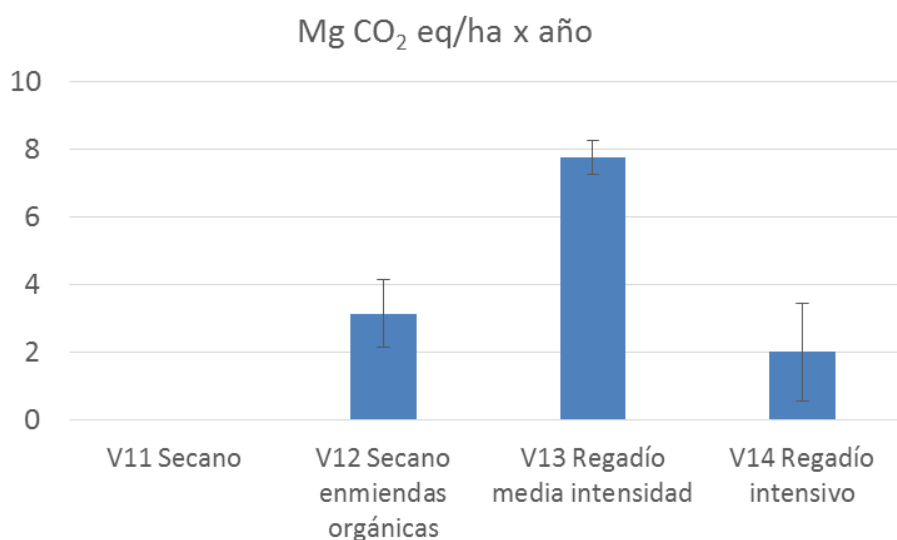


Figura 16. Secuestro de carbono orgánico ($\text{Mg CO}_2 \text{ equivalente ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en comparación con el cultivo en secano en cada parcela de la acción B1 en Valtierra. Las barras indican el error estándar.

- Miranda de Arga

Las parcelas de cultivo en regadío, tanto de intensidad media como de regadío intensivo han mostrado un stock de carbono orgánico superior al seco (un 34% en promedio) (Tabla 2 y Figura 17). En este caso, no se han observado diferencias significativas entre los dos tipos de manejo en regadío. Tampoco se han observado variaciones, en el caso de la parcela de seco, entre los dos años en los que se realizaron los muestreos de suelo (2014 y 2015).

Estos aumentos del stock de carbono orgánico implican un secuestro total de C orgánico para el regadío que oscilan entre los 46 Mg CO₂ ha⁻¹ observados en la parcela de regadío de media intensidad y los 63 Mg CO₂ ha⁻¹ de la parcela de regadío intensivo. Dado que el riego en estas parcelas se inició en 2009, la tasa anual de secuestro se sitúa en el intervalo de 7-10 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ (Tabla 2 y Figura 18).

Tabla 2. Stock de carbono orgánico (Mg/ha), CO₂ equivalente, tasa anual de secuestro de CO₂ y tasa total desde la conversión en regadío en las parcelas de la acción B1 en Miranda de Arga.

Miranda de Arga	SOC (Mg/ha)	CO ₂ eq (Mg/ha)	Tasa anual (Mg CO ₂ eq/ha*año)	Secuestro total (Mg CO ₂ eq/ha)
MB11 Secano	43,91 a	160,99	NA*	NA*
MB12 Regadío de media intensidad	56,36 b	206,64	7,61	45,65
MB13 Regadío intensivo	61,09 b	223,99	10,50	63,00

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en el seco es igual a 0.

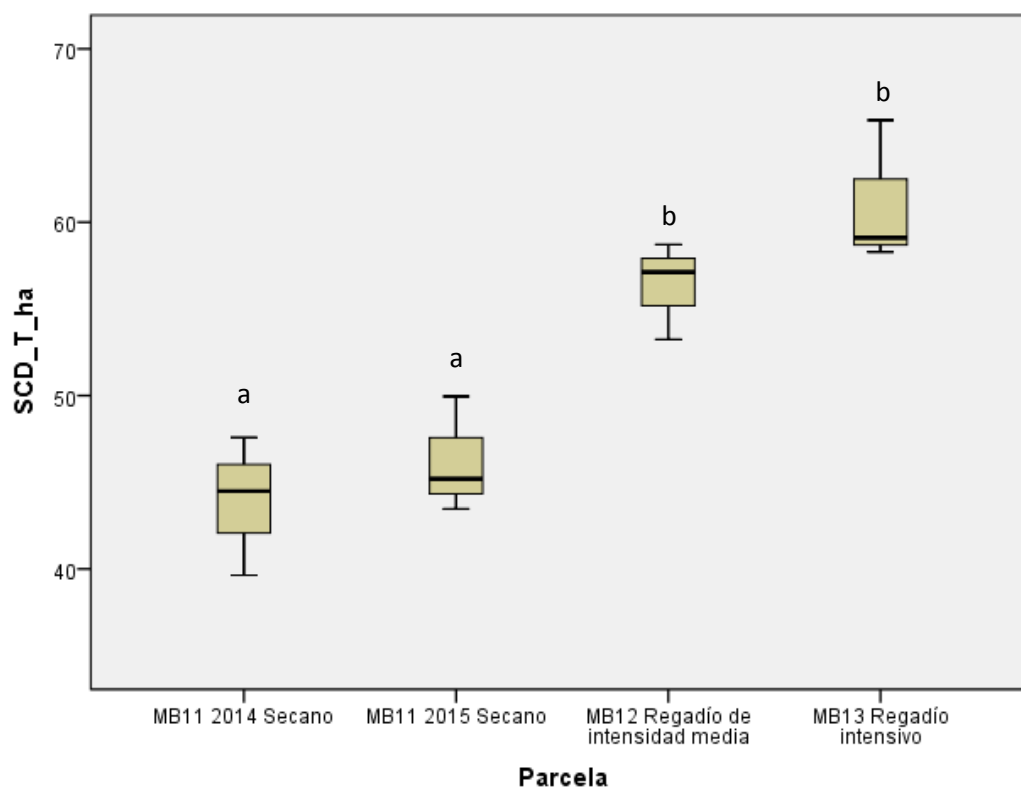


Figura 17. Diagrama de cajas de los valores del stock de materia orgánica (Mg C ha⁻¹) de las parcelas de la acción B1 de Miranda de Arga. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0,05).

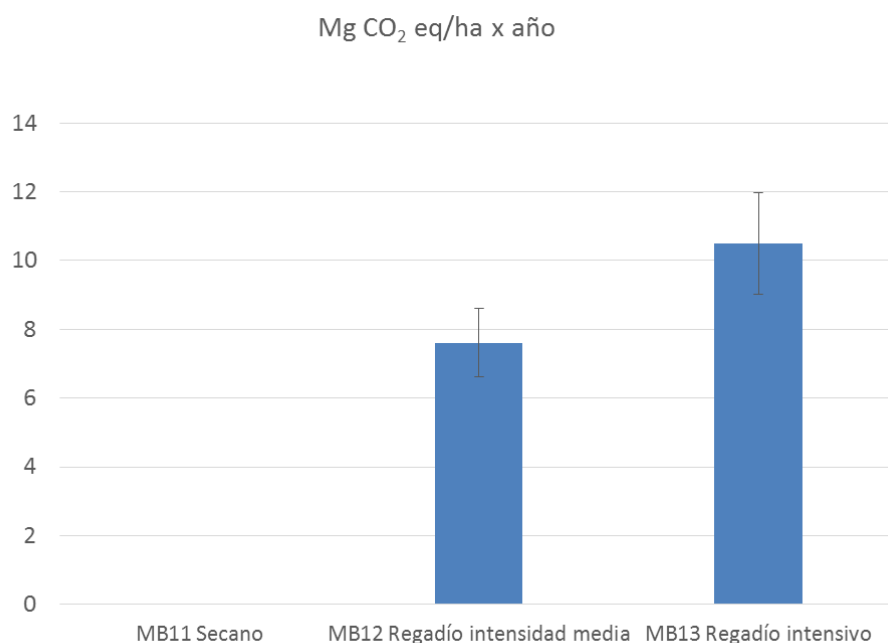


Figura 18. Secuestro de carbono orgánico (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en comparación con el cultivo en secano en cada parcela de la acción B1 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

3.1.2 Acción B2

- Miranda de Arga

En esta ocasión, no se han observado diferencias significativas en el stock de carbono orgánico entre los tres tipos de manejos del regadío: de baja intensidad (alfalfa), intensidad media (maíz) y laboreo intensivo (hortícolas). En los tres casos el stock se sitúa en el intervalo entre 60 – 65 Mg C ha⁻¹ (Tabla 3 y Figura 19). Al igual que en las parcelas de la acción B1, el regadío se inició en 2009, por lo que el secuestro total (en comparación con la parcela de secano MB11 de Miranda de Arga, incluida en la acción B1), que se sitúa en torno a los 70 Mg CO₂ ha⁻¹, equivale a una tasa anual de 10-12 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ (Tabla 3 y Figura 20).

Tabla 3. Stock de carbono orgánico (Mg/ha), CO₂ equivalente, tasa anual de secuestro de CO₂ y tasa total desde la conversión en regadío en las parcelas de la acción B2 en Miranda de Arga.

Miranda de Arga	SOC (Mg/ha)	CO ₂ eq (Mg/ha)	Tasa anual (Mg CO ₂ eq/ha*año)	Secuestro total (Mg CO ₂ eq/ha)
MB 21 Regadío de baja intensidad	63,09 a	231,35	11,73	70,36
MB 22 Regadío de intensidad media	64,12 a	235,11	12,35	74,13
MB 23 Regadío intensivo	61,09 a	223,99	10,50	63,00

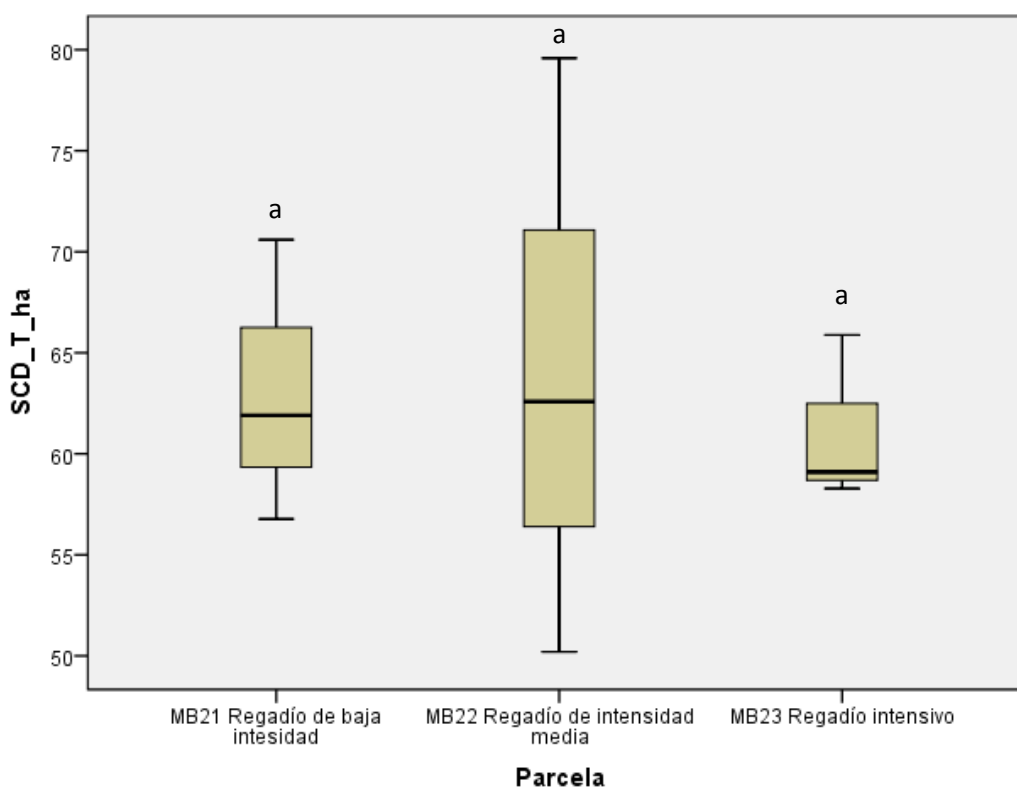


Figura 19. Diagrama de cajas de los valores del stock de materia orgánica (Mg C ha^{-1}) de las parcelas de la acción B2 de Miranda de Arga. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

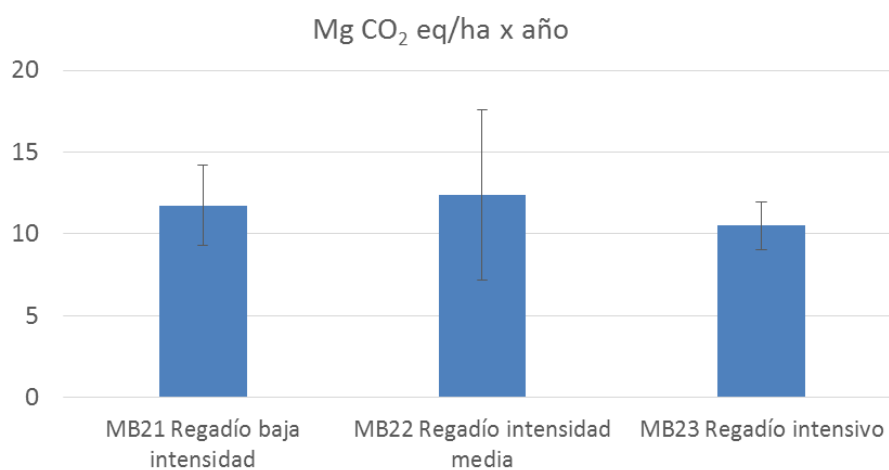


Figura 20. Secuestro de carbono orgánico ($\text{Mg CO}_2 \text{ equivalente ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en comparación con la parcela de secano MB11 (acción B1) en cada parcela de la acción B2 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

- Funes

No se han encontrado diferencias significativas ($p > 0,05$) en el stock de C orgánico entre las parcelas que componen la acción B2 en Funes, si bien el valor medio de la parcela de regadío forrajero intensivo es algo más elevado que el de las otras dos (Tabla 4 y Figura 21).

Para el cálculo del secuestro total de C y de su tasa anual, los valores del SOC de las parcelas de regadío de la acción B2 de Funes se han comparado con los de una parcela de secano de la misma localidad, cuyo stock de carbono se analizó en el marco del proyecto INIA RTA2009-00052-C02-02. En comparación con esta parcela de referencia de secano, los valores de secuestro total en el regadío (acumulado desde la transformación realizada en 2002) oscilan entre 40-92 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo que supone una tasa anual entre 3-7 $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Tabla 4 y Figura 22).

Tabla 4. Stock de carbono orgánico (Mg/ha), CO_2 equivalente, tasa anual de secuestro de CO_2 y tasa total desde la conversión en regadío en las parcelas de la acción B2 en Funes.

Funes	SOC (Mg/ha)	CO_2 eq (Mg/ha)	Tasa anual ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Secuestro total ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha}$)
FN21 Regadío forrajero intensivo	60,51a	221,86	7,09	92,11
FN22 Regadío de intensidad media	46,27a	169,66	3,07	39,90
FN23 Regadío intensivo	49,37a	181,01	3,94	51,25

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en el secano es igual a 0.

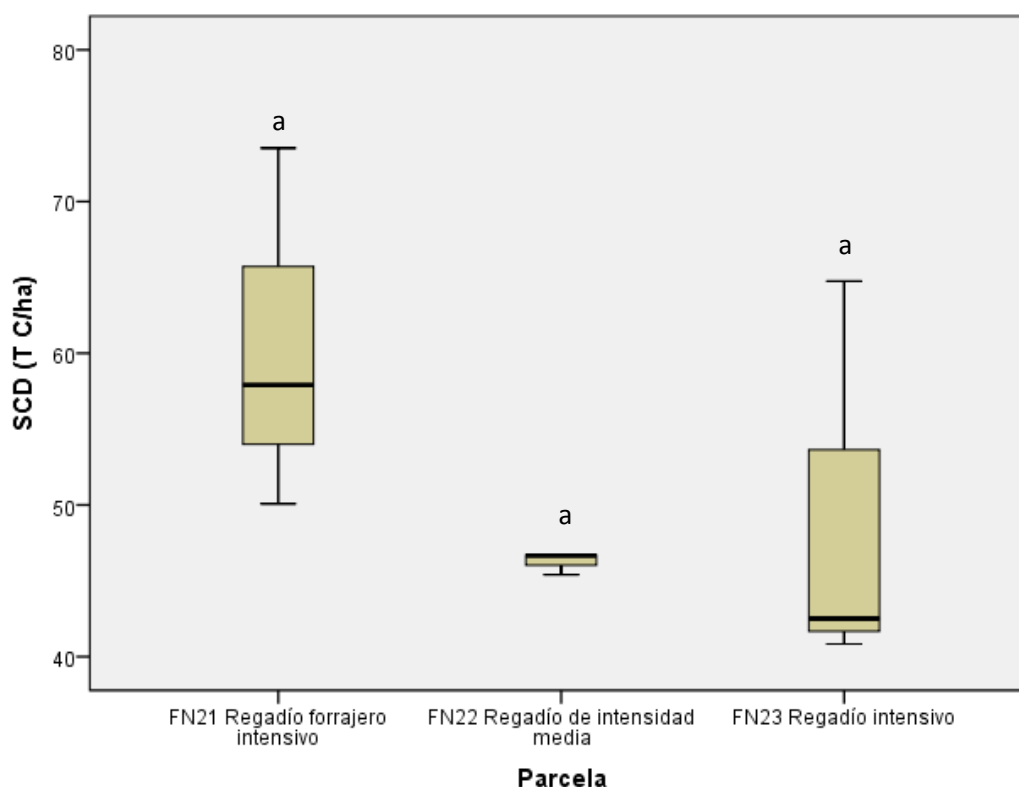


Figura 21. Diagrama de cajas de los valores del stock de materia orgánica (Mg C ha^{-1}) de las parcelas de la acción B2 de Funes. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

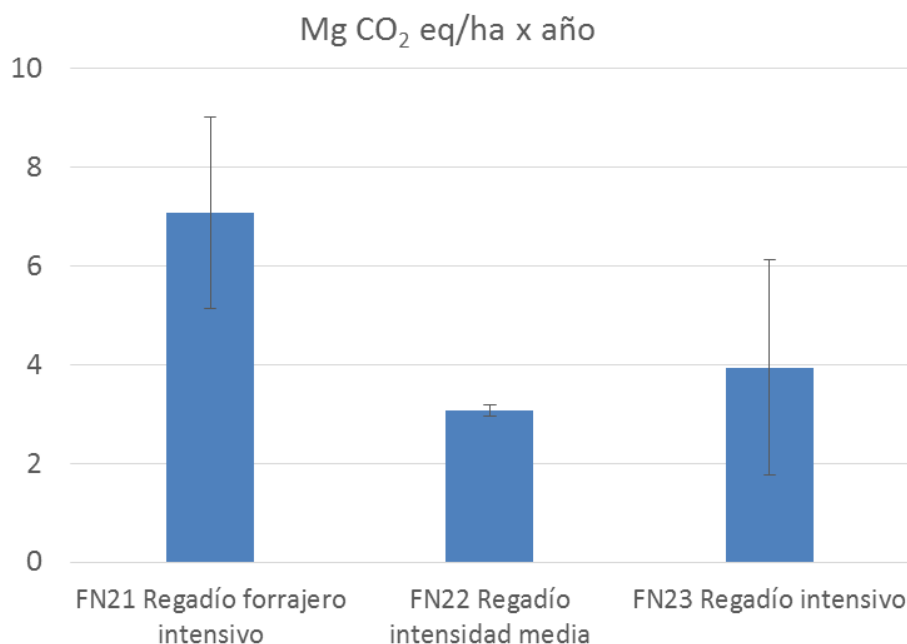


Figura 22. Secuestro de carbono orgánico (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) (en comparación con el secano de referencia) en cada parcela de la acción B2 en Funes. Las barras indican el error estándar.

3.1.3 Acción B3

- Miranda de Arga

Si bien en este caso no ha sido posible realizar la comparación con una parcela de cultivo sin cubierta, los resultados indican que no ha habido diferencias en el stock de carbono orgánico entre la parcela de olivos con cubierta y el secano (se ha tomado como referencia la parcela MB11 de la acción B1) (Tabla 5 y Figura 23).

De esta forma, los resultados observados indican, en este caso, una ausencia de efecto de la cubierta vegetal sobre el stock de carbono orgánico del suelo (Tabla 5 y Figura 24).

Tabla 5. Stock de carbono orgánico (Mg/ha), CO₂ equivalente, tasa anual de secuestro de CO₂ y tasa total desde la conversión en regadío en las parcelas de la acción B3 en Miranda de Arga.

Miranda de Arga	SOC (Mg/ha)	CO ₂ eq (Mg/ha)	Tasa anual (Mg CO ₂ eq/ha*año)	Secuestro total (Mg CO ₂ eq/ha)
MB11 Secano	43,91 a	160,99	NA*	NA*
MB31 Olivo con cubierta	44,91 a	164,68	0,62	3,70

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en el secano es igual a 0.

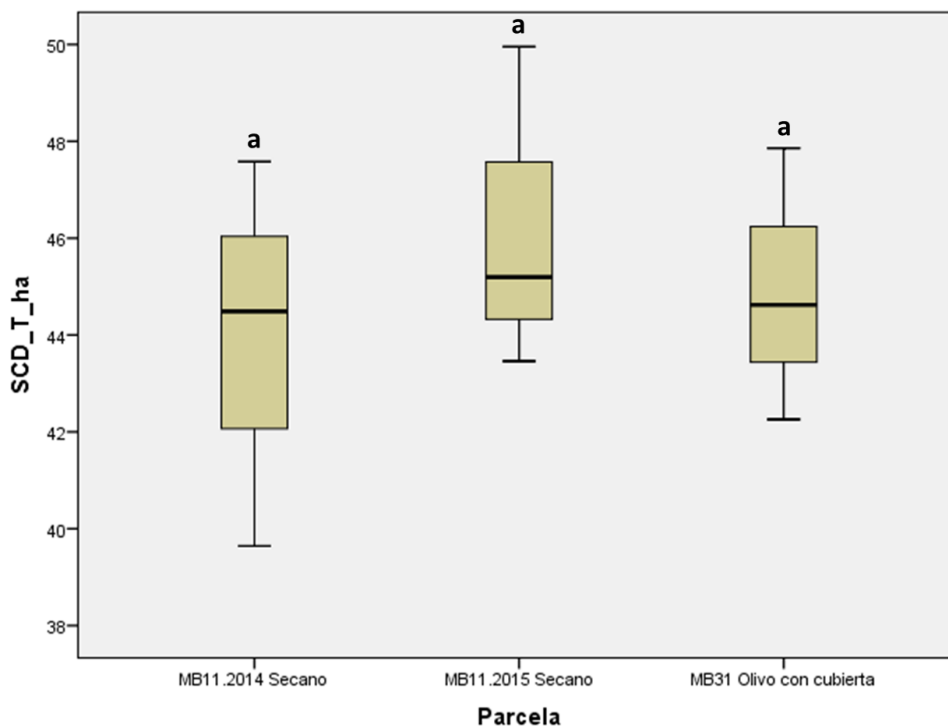


Figura 23. Diagrama de cajas de los valores del stock de materia orgánica (Mg C ha^{-1}) de las parcelas de la acción B3 de Miranda de Arga. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

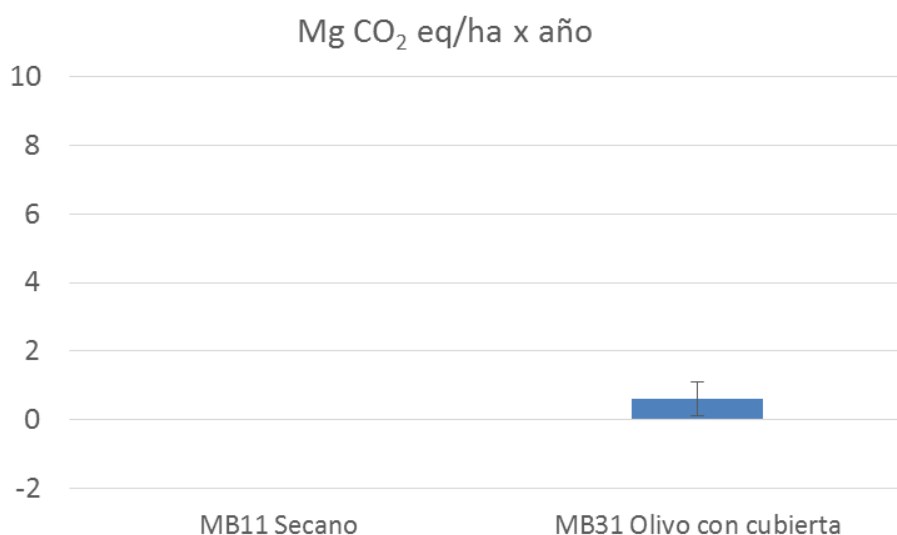


Figura 24. Secuestro de carbono orgánico ($\text{Mg CO}_2 \text{ equivalente ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en comparación con el cultivo en secano en cada parcela de la acción B3 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

- Olite

No se han observado diferencias en el stock de carbono orgánico entre las parcelas de viña con y sin cubierta vegetal correspondientes a la acción B3 en Olite (Tabla 6 y Figura 25). De este modo, aun cuando el valor medio de la tasa de secuestro toma un valor ligeramente negativo en la parcela con cubierta vegetal, éste no es significativamente distinto de cero (Tabla 6 y Figura 26).

Tabla 6. Stock de carbono orgánico (Mg/ha), CO₂ equivalente, tasa anual de secuestro de CO₂ y tasa total desde la instalación de la cubierta vegetal en las parcelas de la acción B3 en Olite.

Olite	SOC (Mg/ha)	CO ₂ eq (Mg/ha)	Tasa anual (Mg CO ₂ eq/ha*año)	Secuestro total (Mg CO ₂ eq/ha)
O32 Viña sin cubierta	66,4 a	243,4	NA*	NA*
O31 Viña con cubierta	63,4 a	232,4	-5,5	-11,0

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de viña sin cubierta es igual a 0.

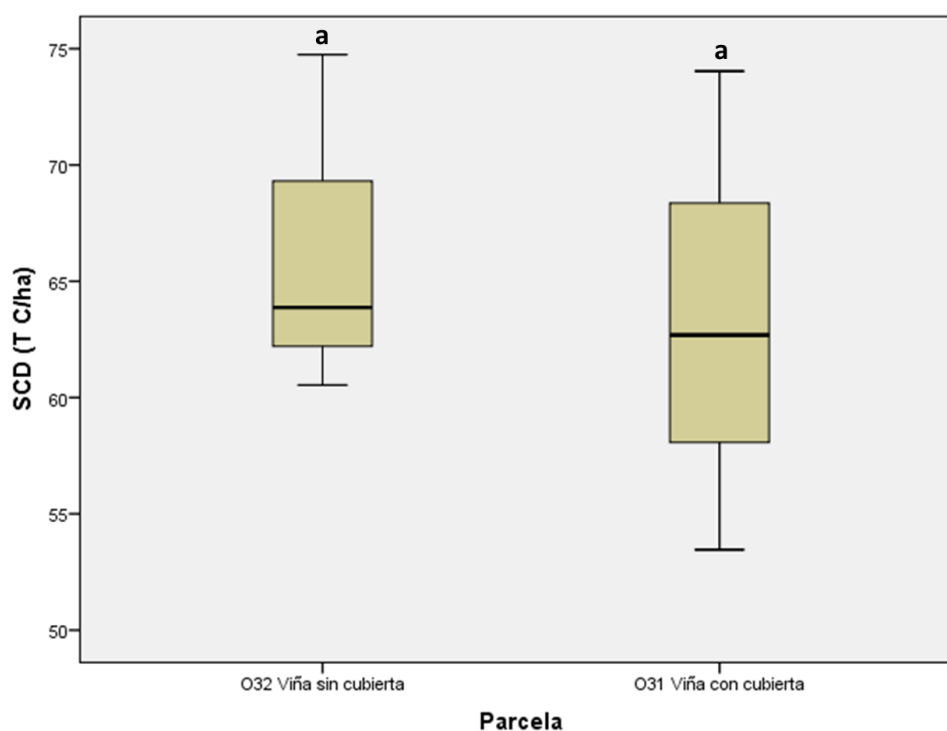


Figura 25. Diagrama de cajas de los valores del stock de materia orgánica (Mg C ha⁻¹) de las parcelas de la acción B3 de Olite. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0,05).

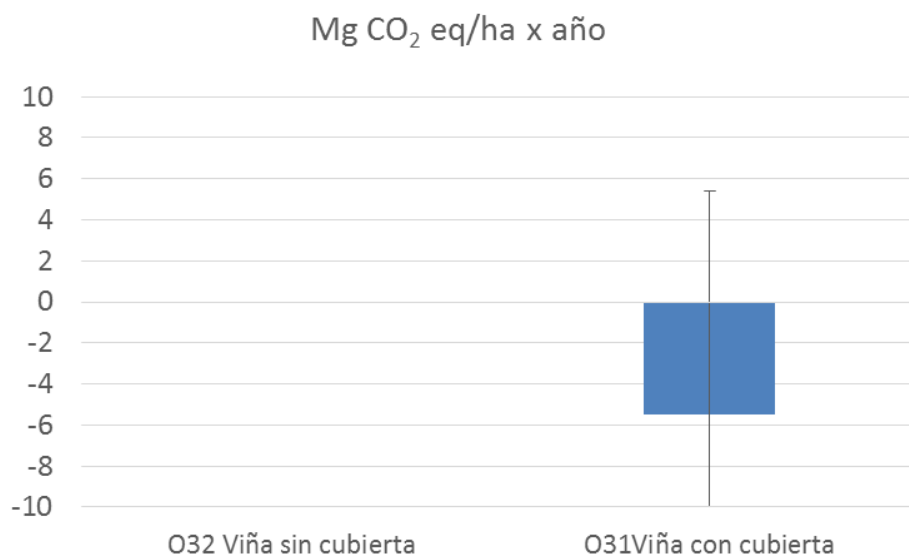


Figura 26. Secuestro de carbono orgánico (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en la parcela de viña con cubierta en comparación con la parcela de viña sin cubierta de la acción B3 en Olite. Las barras indican el error estándar.

- Cascante

La parcela de viña con cubierta presenta un stock de carbono orgánico muy superior al de la parcela de viña sin cubierta (concretamente un 94% más) (Tabla 7 y Figura 27).

La tasa de secuestro total es de 107 Mg CO₂ eq ha⁻¹ (Tabla 7 y Figura 28). Dado que la plantación de viña con cubierta vegetal data de 2007, la tasa anual de secuestro durante cada uno de los ocho años transcurridos desde entonces supera los 13 Mg CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 7. Stock de carbono orgánico (Mg/ha), CO₂ equivalente, tasa anual de secuestro de CO₂ y tasa total desde la instalación de la cubierta vegetal en las parcelas de la acción B3 en Cascante.

Cascante	SOC (Mg/ha)	CO ₂ eq (Mg/ha)	Tasa anual (Mg CO ₂ eq/ha*año)	Secuestro total (Mg CO ₂ eq/ha)
C31 Viña sin cubierta	30,89 a	113,26	NA*	NA*
C32 Viña con cubierta	60,03 b	220,10	13,35	106,83

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de viña sin cubierta es igual a 0.

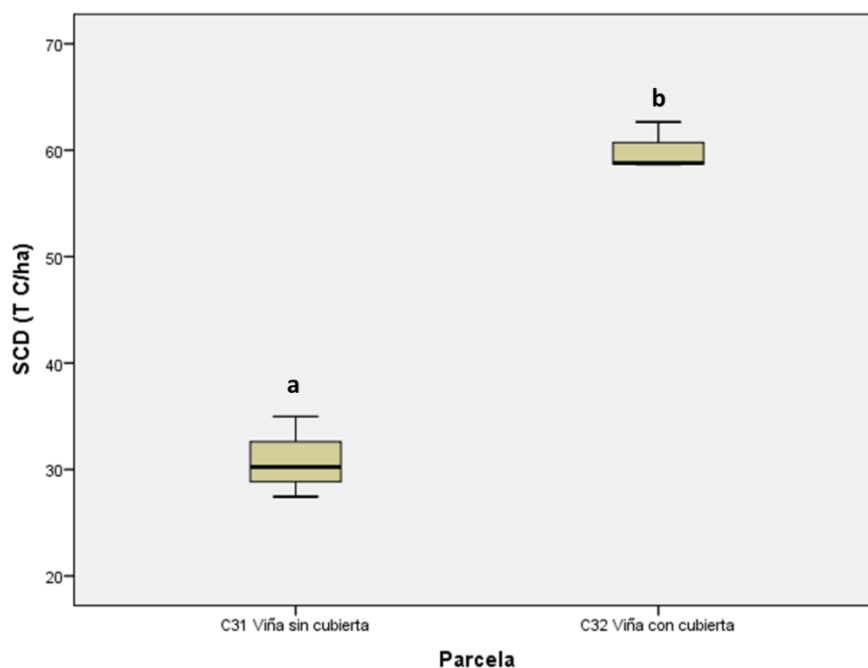


Figura 27. Diagrama de cajas de los valores del stock de materia orgánica (Mg C ha^{-1}) de las parcelas de la acción B3 de Cascante. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

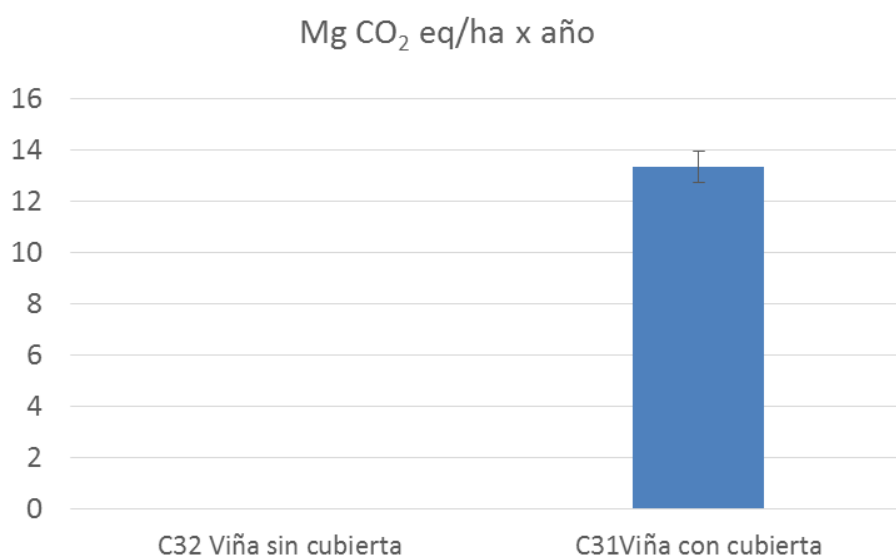


Figura 28. Secuestro de carbono orgánico (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en la parcela de viña con cubierta en comparación con la parcela de viña sin cubierta de la acción B3 en Cascante. Las barras indican el error estándar.

- Fontellas

Los resultados del análisis de suelo indicaron que la parcela de olivos con cubierta posee un stock de carbono orgánico que supera en un 93% al de la parcela sin cubierta vegetal (Tabla 8 y Figura 29).

En este caso, el secuestro total de carbono obtenido gracias a la cubierta vegetal es de 172 Mg CO₂ eq ha⁻¹ (Tabla 8 y Figura 30). Esto equivale a una tasa anual de 11 Mg CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹ durante cada uno de los 15 años transcurridos desde la fecha de la instalación de los olivos con cubierta vegetal en el año 2000.

Tabla 8. Stock de carbono orgánico (Mg/ha), CO₂ equivalente, tasa anual de secuestro de CO₂ y tasa total desde la instalación de la cubierta vegetal en las parcelas de la acción B3 en Fontellas.

Fontellas	SOC (Mg/ha)	CO ₂ eq (Mg/ha)	Tasa anual (Mg CO ₂ eq/ha*año)	Secuestro total (Mg CO ₂ eq/ha)
F31 Olivo con cubierta	97,07 b	355,91	11,45	171,75
F32 Olivo sin cubierta	50,22 a	184,16	NA*	NA*

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de olivos sin cubierta es igual a 0.

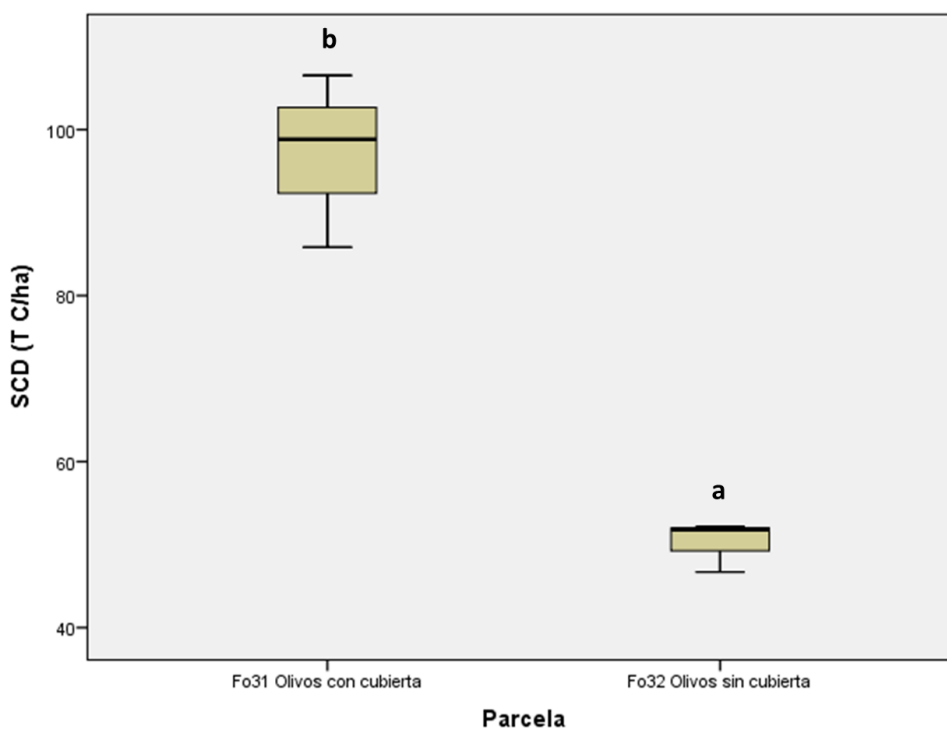


Figura 29. Diagrama de cajas de los valores del stock de materia orgánica (Mg C ha⁻¹) de las parcelas de la acción B3 de Fontellas. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0,05).

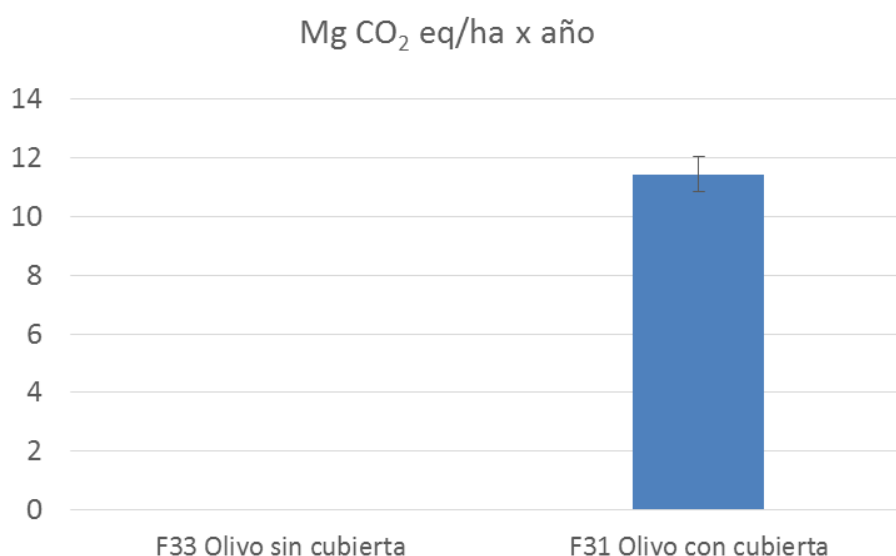


Figura 30. Secuestro de carbono orgánico (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en la parcela de viña con cubierta en comparación con la parcela de viña sin cubierta de la acción B3 en Fontellas. Las barras indican el error estándar.

Un estudio reciente, Rodríguez et al. (2016)⁵ ha elaborado un mapa de stock de carbono orgánico en los suelos de España (escala 1:25000) a partir de más de 4000 muestreos de suelos realizados en España tanto en zonas agrícolas como forestales. Este trabajo muestra un contenido de carbono orgánico en los suelos de la zona de influencia del proyecto de entre 30 y 75 Mg C ha⁻¹.

En cuanto a la tasa de secuestro de carbono anual, una recopilación de estudios realizada en el 2012 a nivel nacional por González-Sánchez et al.⁶ muestran datos de tasas de secuestro medias de 3,11 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ en los primeros 10 años después implementar en suelos de secano el no laboreo y de 5,65 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ en suelos con cubierta vegetal, también en los primeros 10 años. Después de ese periodo, las tasas medias descienden a valores entre 0,58 y 1,47 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ en el primer caso y a 1,28 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ en el segundo.

⁵ Rodríguez Martín JA, Álvaro-Fuentes J, Gonzalo J, Gil C, Ramos-Miras JJ, Grau Corbí JM, Boluda R. 2016. *Assessment of the soil organic carbon stock in Spain*. Geoderma 264: 117-125

⁶ González-Sánchez E.J., Ordóñez-Fernández R., Carbonell-Bojollo R., Veróz-González O., Gil-Ribes J.A. 2012. *Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture*. Soil Till Res 122: 52-60

En otro estudio a nivel europeo elaborado por Lugato et al. en 2014⁷, se ha modelizado el potencial de secuestro de C orgánico en el suelo de diferentes prácticas agrícolas, entre las que se encuentran el laboreo reducido, la gestión de los restos de cultivo o la inclusión de cultivos forrajeros en la rotación de cultivos o su uso como cubierta vegetal. Los datos de este trabajo estiman unas tasas de secuestro anuales que van entre las 0,36 y 1,13 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ para los distintas practicas incluidas en la modelización hasta 2020.

3.2 Emisiones de GEI

Las emisiones de GEI de cada parcela se han clasificado en seis tipos distintos en función de su origen. Así, tenemos:

- Emisiones del suelo y la urea, que corresponden a las emisiones de N₂O procedentes de la aplicación de cualquier tipo de fertilizante nitrogenado, tanto sintético como orgánico, N₂O derivado del N que queda en los residuos agrícolas dejados en el campo y CO₂ derivado de la aplicación de urea.
- Emisiones de las materias primas, que son aquellas emisiones derivadas de la fabricación y transporte hasta el punto de acopio de las materias primas, incluidos los aceites.
- Emisiones del laboreo: emisiones derivadas del uso de combustible agrícola durante los procesos productivos en las parcelas.
- Emisiones del bombeo, derivadas del consumo eléctrico de las instalaciones de bombeo para el riego.
- Emisiones de la quema de restos vegetales.
- Emisiones de los residuos, provocadas por los tratamientos de residuos plásticos de los envases de los fitosanitarios.

3.2.1 Acción B1

- Valtierra

Dentro de los sistemas evaluados, las mayores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se producen en el regadío intensivo, seguido del regadío de media intensidad. Comparativamente, las emisiones del cultivo en secano son muy inferiores (Tabla 9 y Figura 31). La mayor parte de las emisiones proceden del suelo y la urea. Otra fuente importante de emisiones es la derivada del uso de materias primas.

En la Figura 31 (y en las equivalentes para el resto de parcelas y acciones B) se comparan las emisiones de GEI con la tasa anual de secuestro de carbono (ya expuesta en el apartado anterior).

⁷ Lugato, E., Bampa, F., Panagos, P., Montanarella, L., Jones, A. 2015. *Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices*. Glob Change Biol 20 (11): 3557–3567

Tabla 9. Emisiones de gases de efecto invernadero (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) de cada tipo de fuente y total en las parcelas de la acción B1 en Valtierra.

Valtierra	Emisiones suelo y urea	Materias primas	Laboreo	Bombeo	Quema	Residuos	Total
V11 Secano	0,38	0,10	0,19	0	0	1,03 x 10 ⁻³	0,67
V12 Secano enmiendas orgánicas	0,49	0,07	0,21	0	0	1,02 x 10 ⁻⁴	0,77
V13 Regadío de intensidad media	2,98	1,52	0,21	0,64	0	2,06 x 10 ⁻³	5,36
V14 Regadío intensivo	4,65	2,27	0,43	0,66	0	3,26 x 10 ⁻³	8,02

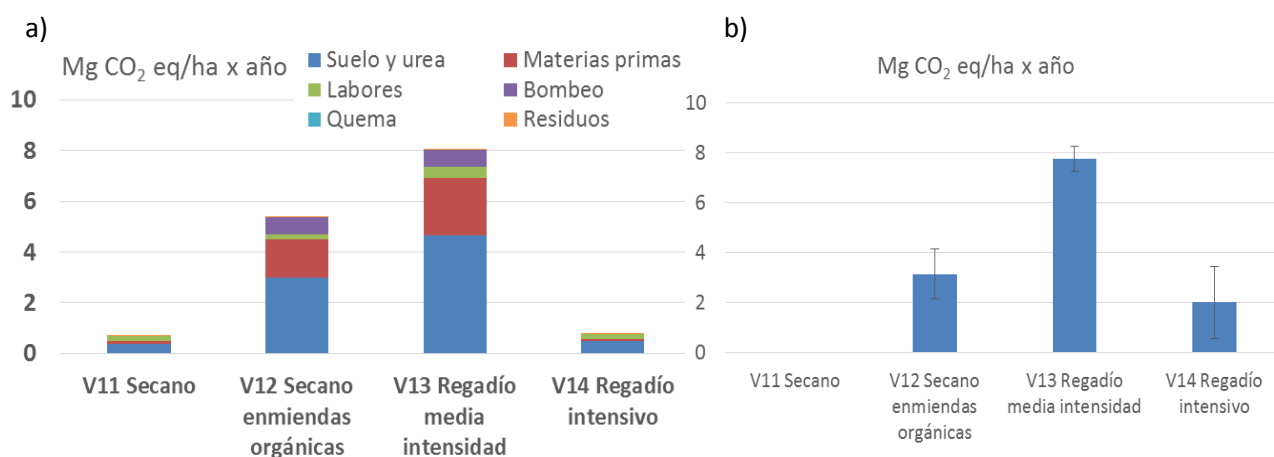


Figura 31. Emisiones de GEI (a) y tasa de secuestro de carbono (b) (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en las parcelas correspondientes a la acción B1 en Valtierra. Las barras indican el error estándar.

- Miranda de Arga

De la misma manera que en las parcelas de Valtierra, las mayores emisiones de GEI corresponden al regadío intensivo, seguido del regadío de intensidad media, mientras que el secano es el que produce menores emisiones (Tabla 10 y Figura 32). También resulta coincidente el hecho de que las mayores emisiones corresponden a las producidas por el suelo y la aplicación de urea.

Tabla 10. Emisiones de gases de efecto invernadero (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) de cada tipo de fuente y total en las parcelas de la acción B1 en Miranda de Arga.

Miranda	Suelo y urea	Materias primas	Labores	Bombeo	Quema	Residuos	Total
MB11 Secano	0,77	0,40	0,07	0	0	1,18 x 10 ⁻³	1,24
MB12 Regadío de media intensidad	3,31	0,95	0,23	0	0	2,10 x 10 ⁻³	4,50
MB13 Regadío intensivo	4,07	1,43	0,51	0	0	2,76 x 10 ⁻³	6,01

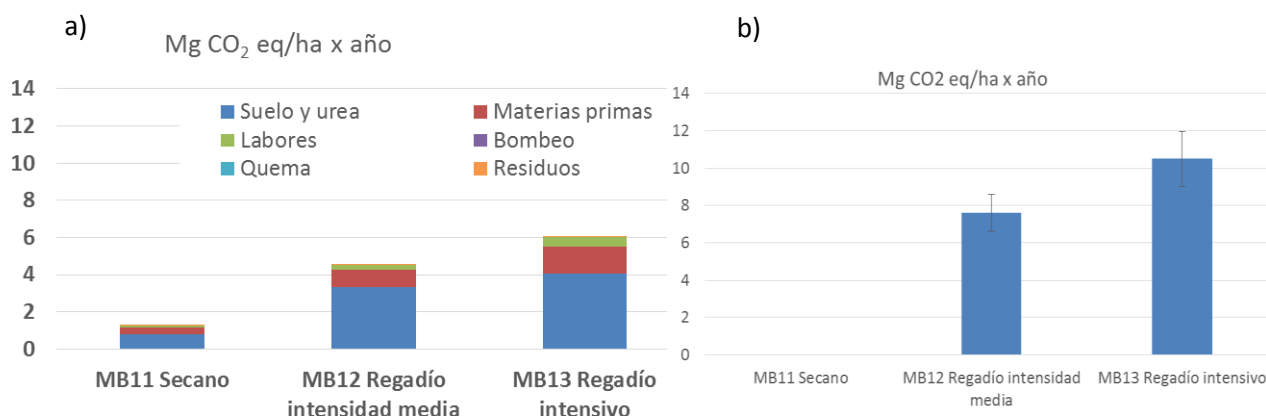


Figura 32. Emisiones de GEI (a) y tasa de secuestro de carbono (b) (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en las parcelas correspondientes a la acción B1 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

3.2.2 Acción B2

- Miranda de Arga

Las emisiones causadas por el regadío de baja intensidad (alfalfa) son mucho menores que las provocadas por los otros tipos de cultivo en regadío, e incluso son menores que las del cultivo en secano (Tabla 11 y Figura 33). Además, a diferencia de lo observado para el maíz y los cultivos hortícolas, las mayores emisiones en el cultivo de la alfalfa son debidas a las materias primas. Esta diferencia se debe a que en la alfalfa la cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado es muy inferior en comparación con otros cultivos como es el caso del maíz.

Tabla 11. Emisiones de gases de efecto invernadero (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) de cada tipo de fuente y total en las parcelas de la acción B2 en Miranda de Arga.

Miranda	Suelo y urea	Materias primas	Labores	Bombeo	Quema	Residuos	Total
MB21 Regadío de baja intensidad	0,23	0,32	0,28	0	0	1,02 x 10 ⁻³	0,83
MB22 Regadío de intensidad media	2,76	1,56	0,31	0	0,48	1,44 x 10 ⁻³	5,12
MB23 Regadío intensivo	4,07	1,43	0,51	0	0	2,76 x 10 ⁻³	6,01

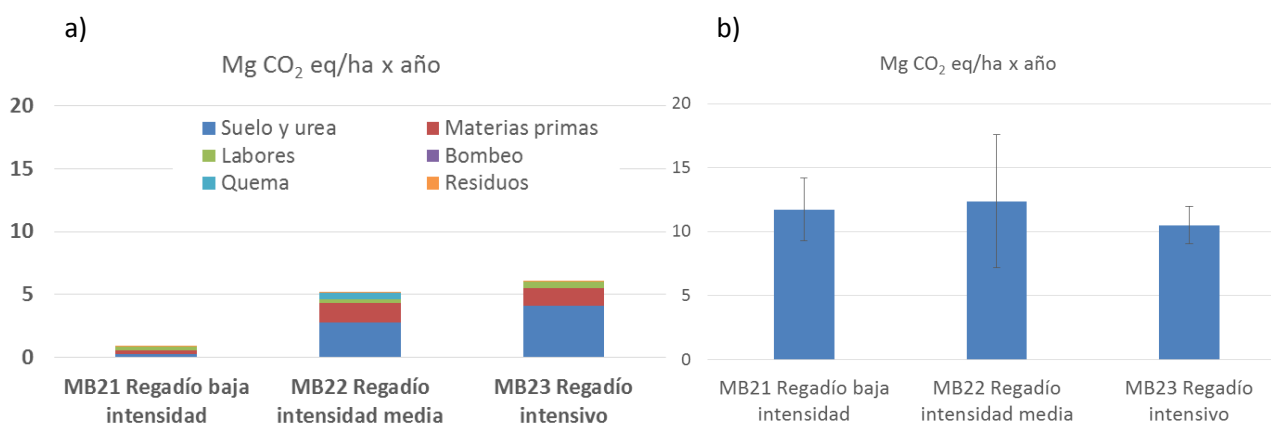


Figura 33. Emisiones de GEI (a) y tasa de secuestro de carbono (b) (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en las parcelas correspondientes a la acción B2 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

- Funes

Las emisiones de GEI del cultivo forrajero en Funes son casi 10 veces superiores a las medidas en Miranda de Arga, debido a que en este caso el cultivo es un maíz forrajero intensivo y no una alfalfa (cultivo de baja intensidad). Esto implica fundamentalmente una dosis de fertilizante mucho mayor y, en consecuencia, unas emisiones también muy superiores, por encima incluso de las del manejo hortícola intensivo y las del cultivo de intensidad media. También influye el hecho de que el consumo de materias primas sea más elevado y a que en este caso se utilice energía para el bombeo del agua de riego. En el resto de manejos, las emisiones son similares a las observadas en Miranda de Arga.

Tabla 12. Emisiones de gases de efecto invernadero (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) de cada tipo de fuente y total en las parcelas de la acción B2 en Funes.

Funes	Emisiones suelo y urea	Materias primas	Laboreo	Bombeo	Quema	Residuos	Total
FN21 Regadío forrajero intensivo	4,79	1,14	0,30	1,21	0	$1,39 \times 10^{-3}$	7,44
FN22 Regadío de media intensidad	4,12	1,25	0,33	1,21	0	$1,26 \times 10^{-3}$	6,91
FN23 Regadío intensivo	2,34	0,76	0,56	0,92	0	$1,40 \times 10^{-4}$	4,59

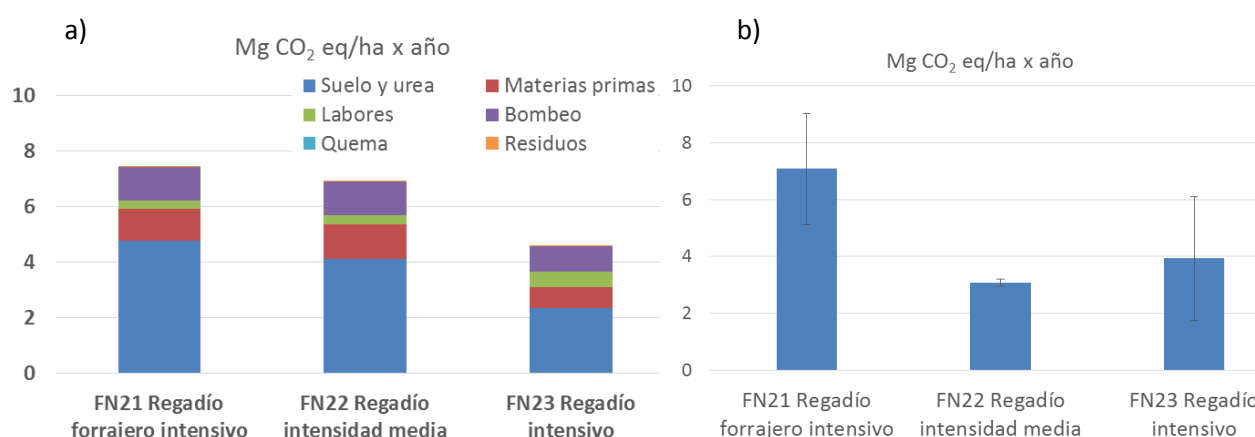


Figura 34. Emisiones de GEI (a) y tasa de secuestro de carbono (b) (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en las parcelas correspondientes a la acción B2 en Funes. Las barras indican el error estándar.

3.2.3. Acción B3

- Miranda de Arga

Las emisiones de GEI de la parcela de olivo con cubierta correspondiente a la acción B3 en Miranda de Arga son algo inferiores a las del secano de referencia y muy inferiores a las calculadas para la mayor parte de los cultivos herbáceos en regadío (Tabla 13 y Figura 35). El motivo fundamental es que las dosis de fertilizante nitrogenado aplicadas en estas parcelas de cultivos leñosos son muy

inferiores a las empleadas en los cultivos herbáceos en regadío. Esto afecta de manera importante a las emisiones del suelo y la urea, así como a las del laboreo.

Tabla 13. Emisiones de gases de efecto invernadero (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) de cada tipo de fuente y total en las parcelas de la acción B3 en Miranda de Arga.

Miranda	Emisiones suelo y urea	Materias primas	Laboreo	Bombeo	Quema	Residuos	Total
MB11 Secano	0,77	0,40	0,07	0	0	$1,18 \times 10^{-3}$	1,24
MB31 Olivo con cubierta	0,18	0,10	0,21	0	0	0,01	0,50

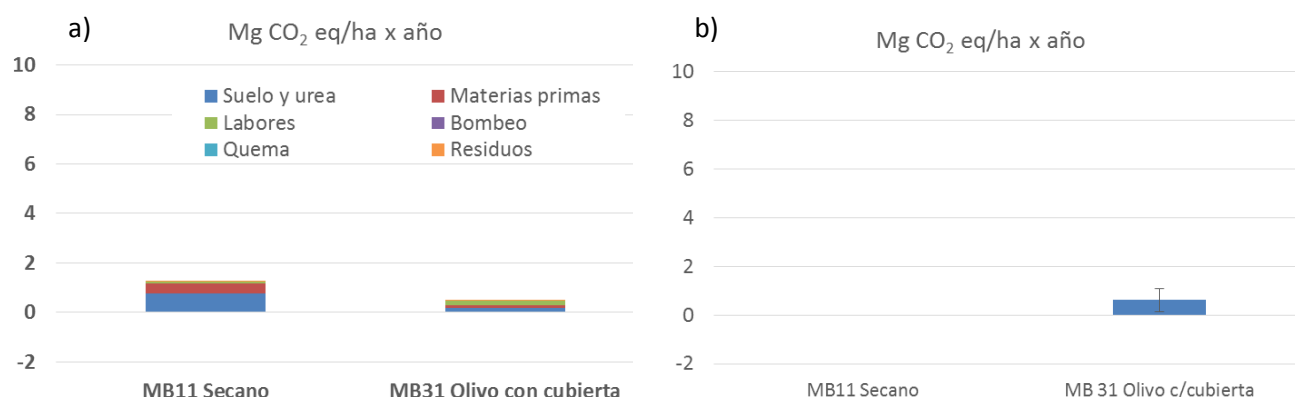


Figura 35. Emisiones de GEI (a) y tasa de secuestro de carbono (b) (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en las parcelas correspondientes a la acción B3 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

- Olite

Las emisiones de GEI de las parcelas de la acción B3 en Olite, tanto en la parcela de viña con cubierta como sin cubierta, son muy inferiores a las calculadas para la mayor parte de los cultivos herbáceos en regadío (Tabla 14 y Figura 36). En la Figura 36 se han dibujado a diferente escala las figuras a) y b) para poder visibilizar mejor los componentes de las emisiones.

Las emisiones de la parcela con cubierta son algo superiores a las de la parcela sin cubierta. Esta diferencia se debe fundamentalmente a unas mayores emisiones del suelo y de la urea ya que la parcela con cubierta vegetal maneja una mayor cantidad de nitrógeno aportado por los residuos mientras que en la parcela sin cubierta no se ha realizado ninguna aplicación de fertilizante nitrogenado. Existe también una diferencia en las emisiones de las materias primas, siendo mayores en la parcela con cubierta vegetal debido al uso de semillas para la implantación de la misma. Por el contrario, las emisiones causadas por el laboreo son inferiores a la de la parcela sin cubierta vegetal ya que el número de labores realizadas es inferior.

Tabla 14. Emisiones de gases de efecto invernadero (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) de cada tipo de fuente y total en las parcelas de la acción B3 en Olite.

Olite	Emisiones suelo y urea	Materias primas	Laboreo	Bombeo	Quema	Residuos	Total
O32 Viña sin cubierta	0,04	0,05	0,26	0	0	0,02	0,37
O31 Viña con cubierta	0,23	0,10	0,19	0	0	0,02	0,54

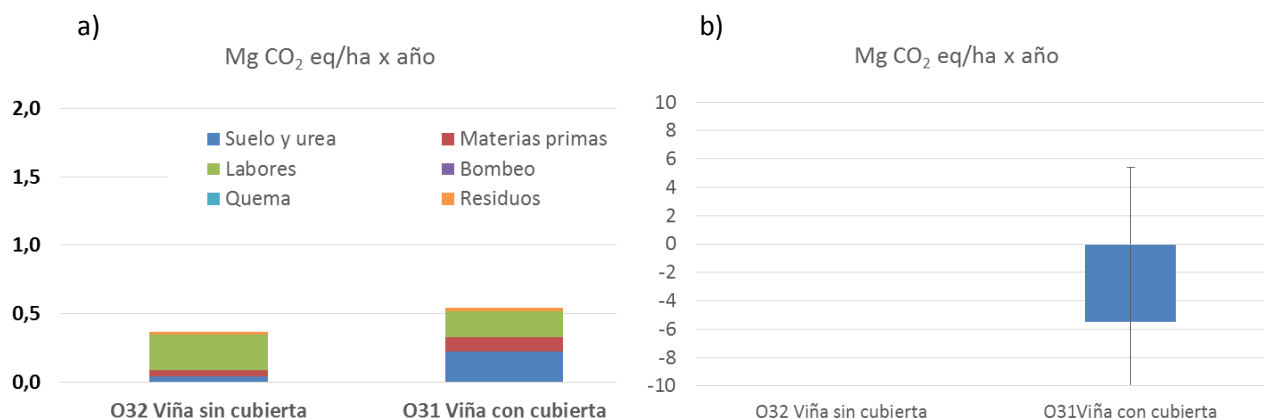


Figura 36. Emisiones de GEI (a) y tasa de secuestro de carbono (b) (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en las parcelas correspondientes a la acción B3 en Olite. Las barras indican el error estándar.

- Cascante

A pesar de tener unas menores emisiones por bombeo, las emisiones globales de GEI de la parcela de viña con cubierta vegetal son superiores a las de la parcela sin cubierta. Esta diferencia es debida fundamentalmente al efecto de las materias primas ya que en la parcela con cubierta vegetal se hizo un mayor uso de ellas (Tabla 15 y Figura 37). Las tasas de emisión fueron, en cualquier caso, notablemente menores que las de secuestro en el caso de la viña con cubierta (nótese el cambio de escala en el eje vertical en la Figura 37).

Tabla 15. Emisiones de gases de efecto invernadero (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) de cada tipo de fuente y total en las parcelas de la acción B3 en Cascante.

Cascante	Emisiones suelo y urea	Materias primas	Laboreo	Bombeo	Quema	Residuos	Total
C31 Viña sin cubierta	0,04	0,09	0,26	0,25	0	0,01	0,65
C32 Viña con cubierta	0,06	0,29	0,31	0,14	0	0,02	0,83

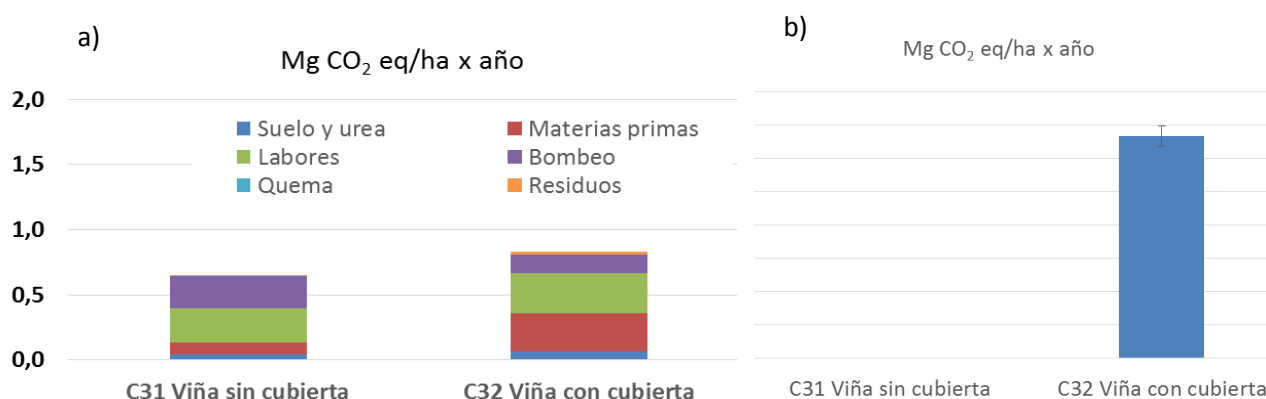


Figura 37. Emisiones de GEI (a) y tasa de secuestro de carbono (b) (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en las parcelas correspondientes a la acción B3 en Cascante. Las barras indican el error estándar.

- Fontellas

A diferencia de las experiencias de Olite y Cascante, las emisiones de GEI de la parcela de olivos con cubierta en Fontellas son inferiores a las de la parcela sin cubierta vegetal (Tabla 16 y Figura 38). A pesar de tener unas mayores emisiones por laboreo, esto se ve compensado por unas menores emisiones por materias primas y quema, fundamentalmente. La diferencia de escala en la Figura 38 es representativa del orden de magnitud de estas emisiones frente al secuestro observado.

Tabla 16. Emisiones de gases de efecto invernadero (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) de cada tipo de fuente y total en las parcelas de la acción B3 en Fontellas.

Fontellas	Suelo y abonado	Materias primas	Laboreo	Bombeo	Quema	Residuos	Total
F32 Olivo sin cubierta	0,12	0,18	0,15	0	0,25	1,26 x 10 ⁻³	0,69
F31 Olivo con cubierta	0,10	0,10	0,27	0	0	0,02	0,49

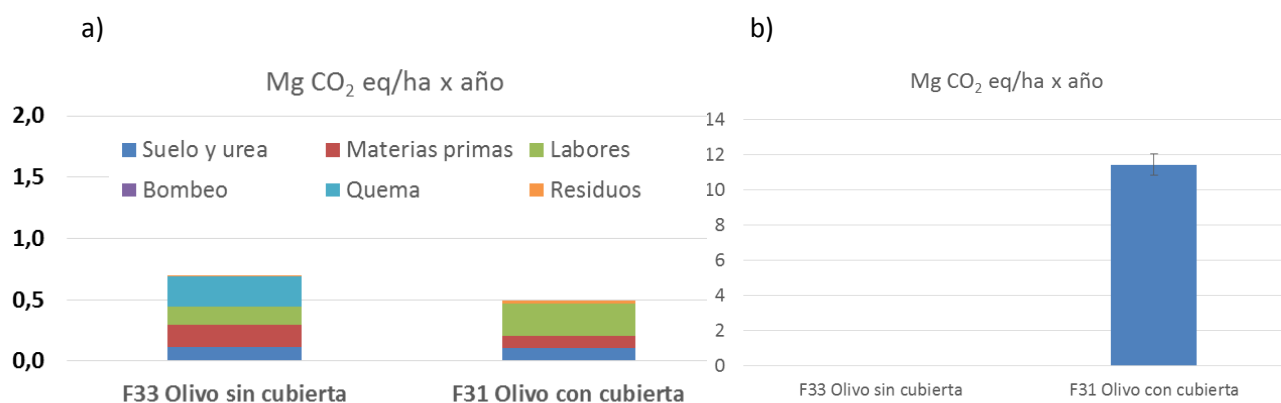


Figura 38. Emisiones de GEI (a) y tasa de secuestro de carbono (b) (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en las parcelas correspondientes a la acción B3 en Fontellas. Las barras indican el error estándar.

3.3 Balances GEI

3.3.1 Acción B1

- Valtierra

La parcela de secano presenta un balance positivo, ya que en este caso no hay un secuestro de carbono que compense a las emisiones de GEI (Tabla 17 y Figura 39). Lo mismo ocurre con el regadío intensivo, ya que las emisiones de GEI triplican al aumento del stock de carbono en el periodo de tiempo considerado en esta parcela. Por el contrario, la parcela de regadío de intensidad media presenta un balance negativo, lo que indica que el secuestro de carbono que se ha producido desde su transformación en regadío ha sido superior a las emisiones de GEI realizadas desde ese momento. Lo mismo ocurre con el secano con enmiendas orgánicas cuyo balance es muy similar al del regadío de intensidad media.

Tabla 17. Secuestro, emisiones y balance de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) totales desde la transformación en regadío y tasa anual en las parcelas de la acción B1 en Valtierra.

Valtierra	Secuestro total ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha}$)	Tasa anual de secuestro ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Emisiones anuales ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Balance GEI anual ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)
V11 Secano	NA*	NA*	0,67	0,67
V12 Secano orgánico	63,03	3,15	0,77	-2,38
V13 Regadío de media intensidad	155,19	7,76	5,36	-2,40
V14 Regadío intensivo	40,39	2,02	8,02	6,00

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de secano es igual a 0.

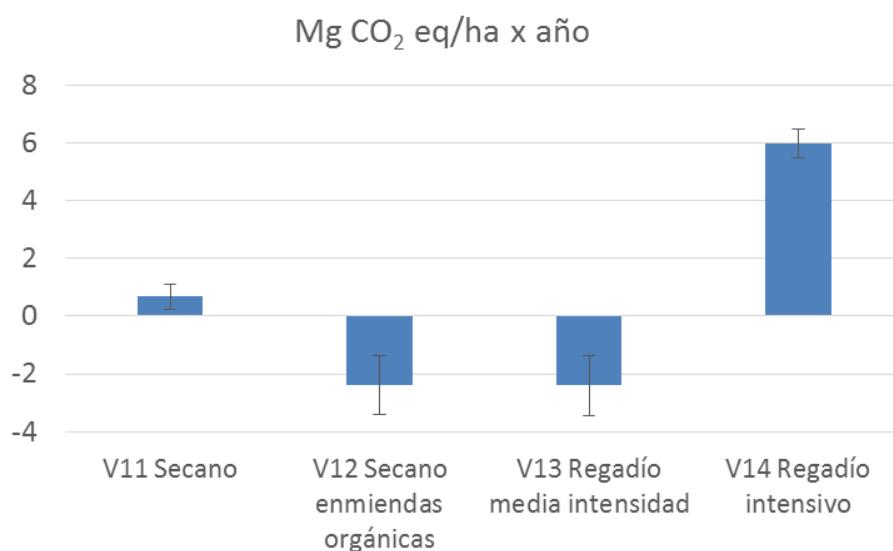


Figura 39. Balances de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en las parcelas correspondientes a la acción B1 en Valtierra. Las barras indican el error estándar.

- Miranda de Arga

En el caso de las parcelas situadas en Miranda de Arga, tanto el regadío de intensidad media como el regadío intensivo han mostrado balances GEI negativos, en contraste con el secano (Tabla 18 y Figura 40), en el que se asume que no hay secuestro adicional, al no realizarse ninguna práctica que permita aumentar la incorporación de restos de cultivo al suelo en este sistema.

Tabla 18. Secuestro, emisiones y balance de GEI (Mg CO_2 equivalente ha^{-1} año^{-1}) totales desde la transformación en regadío y tasa anual en las parcelas de la acción B1 en Miranda de Arga.

Miranda de Arga	Secuestro total (Mg CO_2 eq/ha)	Tasa anual de secuestro (Mg CO_2 eq/ha*año)	Emisiones anuales (Mg CO_2 eq/ha*año)	Balance GEI anual (Mg CO_2 eq/ha*año)
MB11 Secano	NA*	NA*	1,24	1,24
MB12 Regadío de intensidad media	45,65	7,61	4,50	-3,11
MB13 Regadío intensivo	63,00	10,50	6,05	-4,45

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de secano es igual a 0.

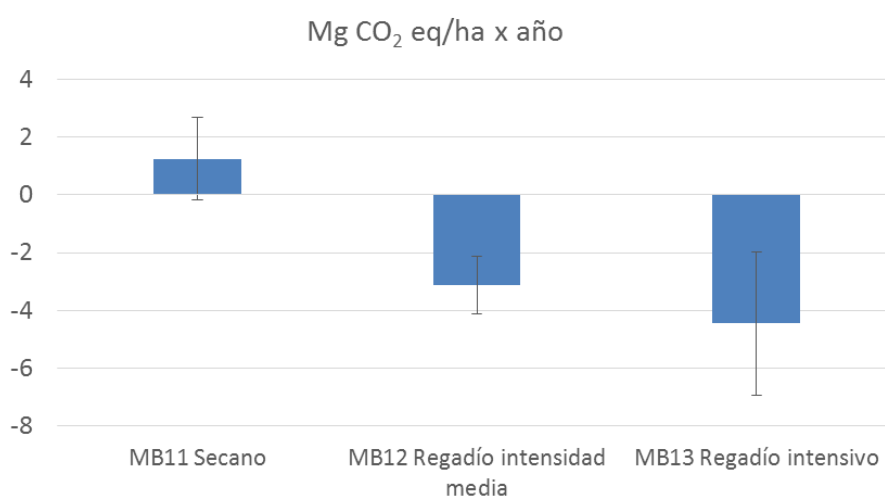


Figura 40. Balances de GEI (Mg CO_2 equivalente ha^{-1} año^{-1}) en las parcelas correspondientes a la acción B1 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

3.3.2. Acción B2

- Miranda de Arga

La comparación entre los distintos tipos de manejo en regadío muestra que, aunque en todos los casos se ha obtenido un balance de GEI negativo, su tasa anual es (en valor absoluto) superior en el regadío de baja intensidad (alfalfa) con respecto al regadío de intensidad media (cereal); y a su vez, el del regadío de intensidad media es superior al del regadío intensivo (Tabla 19 y Figura 41).

Tabla 19. Secuestro, emisiones y balance de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) totales desde la transformación en regadío y tasa anual en las parcelas de la acción B2 en Miranda de Arga.

Miranda de Arga	Secuestro total ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha}$)	Tasa anual de secuestro ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Emisiones anuales ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Balance GEI anual ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)
MB21 Regadío de baja intensidad	70,36	11,73	0,83	-10,90
MB22 Regadío de intensidad media	74,13	12,35	5,12	-7,24
MB23 Regadío intensivo	63,00	10,50	6,05	-4,45

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de secano es igual a 0.

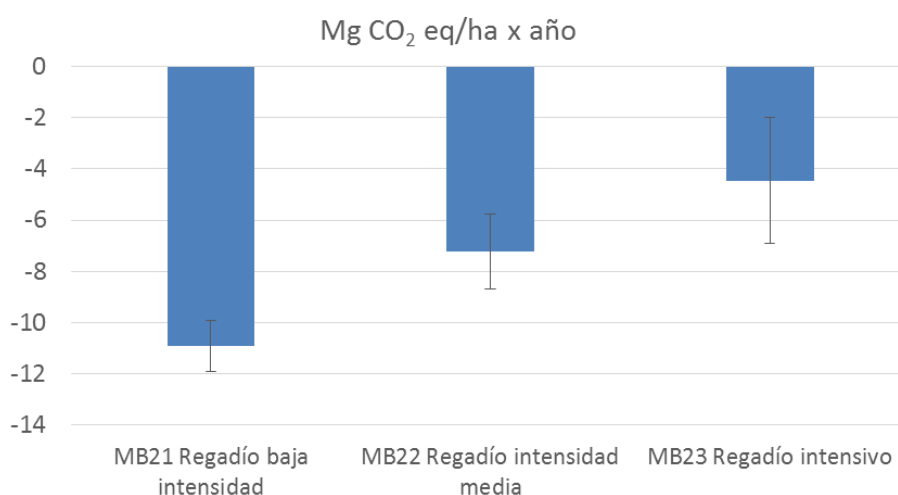


Figura 41. Balances de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en las parcelas correspondientes a la acción B2 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

- Funes

Los resultados del balance de GEI obtenidos en Funes difieren de forma importante de los obtenidos en la otra localización de la acción B2 (Miranda de Arga). En este caso, en todos los manejos se obtienen balances positivos, esto es, las emisiones de GEI superan al secuestro de C. Hay que tener en cuenta, no obstante, que dentro de la acción B2 en Funes no hay ninguna parcela de regadío de baja intensidad. En el caso de los dos regadíos intensivos (forrajero y hortícola) el balance es cercano a cero, mientras que es más elevado para el regadío de media intensidad. Esto se debe a dos factores: por un lado, las emisiones de GEI de esta última parcela son muy elevadas, debido sobre todo a la elevada dosis de fertilizante aportada; y por otro lado, la tasa anual de secuestro en esta parcela es inferior a las otras dos.

Tabla 20. Secuestro, emisiones y balance de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) totales desde la transformación en regadío y tasa anual en las parcelas de la acción B2 en Funes.

Funes	Secuestro total ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha}$)	Tasa anual de secuestro ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Emisiones anuales ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Balance GEI anual ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)
FN21 Regadío forrajero intensivo	92,11	7,09	7,44	0,35
FN22 Regadío de media intensidad	39,90	3,07	6,91	3,85
FN23 Regadío intensivo	51,25	3,94	4,59	0,65

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de secano es igual a 0.

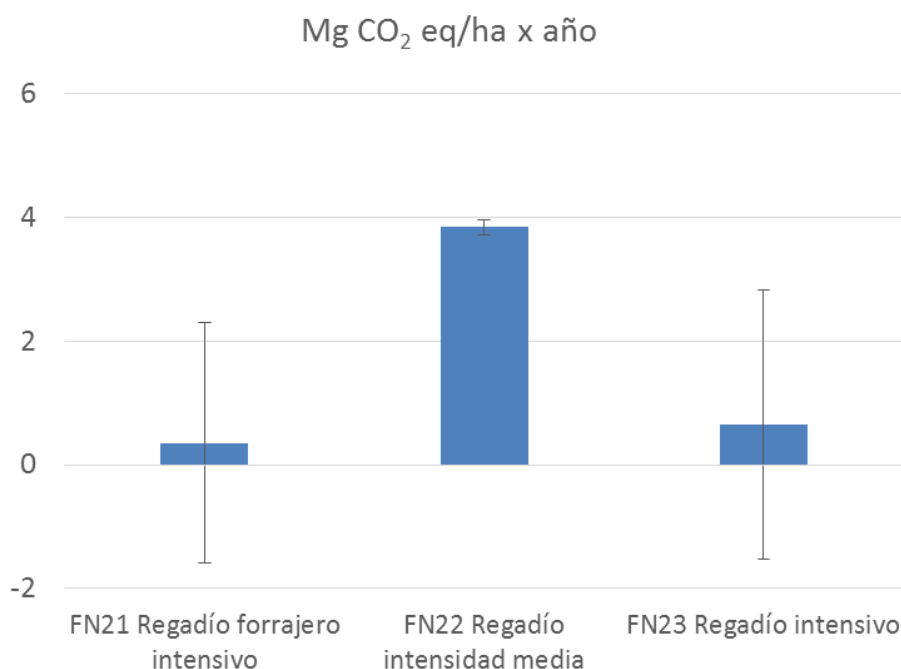


Figura 42. Balances de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en las parcelas correspondientes a la acción B2 en Funes. Las barras indican el error estándar.

3.3.3. Acción B3

- Miranda de Arga

El valor del Balance de GEI de la parcela de olivos con cubierta vegetal en Miranda de Arga toma un valor ligeramente negativo. En este caso tanto el secuestro (que en realidad no se puede considerar que exista en sentido estricto, ya que el contenido de carbono orgánico del suelo no es significativamente distinto al del testigo), como las emisiones, son muy bajas (Tabla 21 y Figura 43).

Tabla 21. Secuestro, emisiones y balance de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) totales desde la transformación en regadío y tasa anual en las parcelas de la acción B3 en Miranda de Arga.

Miranda de Arga	Secuestro total (Mg CO_2 eq/ha)	Tasa anual de secuestro (Mg CO_2 eq/ha*año)	Emisiones anuales (Mg CO_2 eq/ha*año)	Balance GEI anual (Mg CO_2 eq/ha*año)
MB11 Secano	NA*	NA*	1,24	1,24
MB31 Olivo con cubierta	3,70	0,62	0,49	-0,12

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de secano es igual a 0.

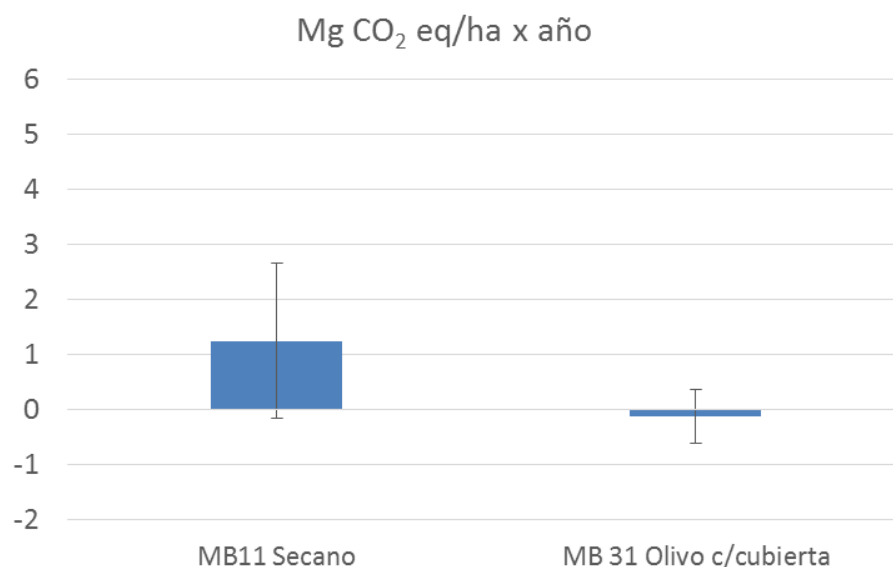


Figura 43. Balances de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en las parcelas correspondientes a la acción B3 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

- Olite

En el caso de Olite, dado que el secuestro de carbono en la viña con no mostró diferencias significativas, y las diferencias observadas en las emisiones entran dentro del rango de variabilidad observado en la variabilidad de C orgánico, las emisiones netas de los dos sistemas no pueden determinarse como diferentes (Tabla 22 y Figura 44).

Tabla 22. Secuestro, emisiones y balance de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) totales desde la transformación en regadío y tasa anual en las parcelas de la acción B3 en Olite.

Olite	Secuestro total ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha}$)	Tasa anual de secuestro ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Emisiones anuales ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Balance GEI anual ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)
O32 Viña sin cubierta	NA*	NA*	0,37	0,37
O31 Viña con cubierta	-10,97	-5,48	0,54	6,03

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de viña sin cubierta es igual a 0.

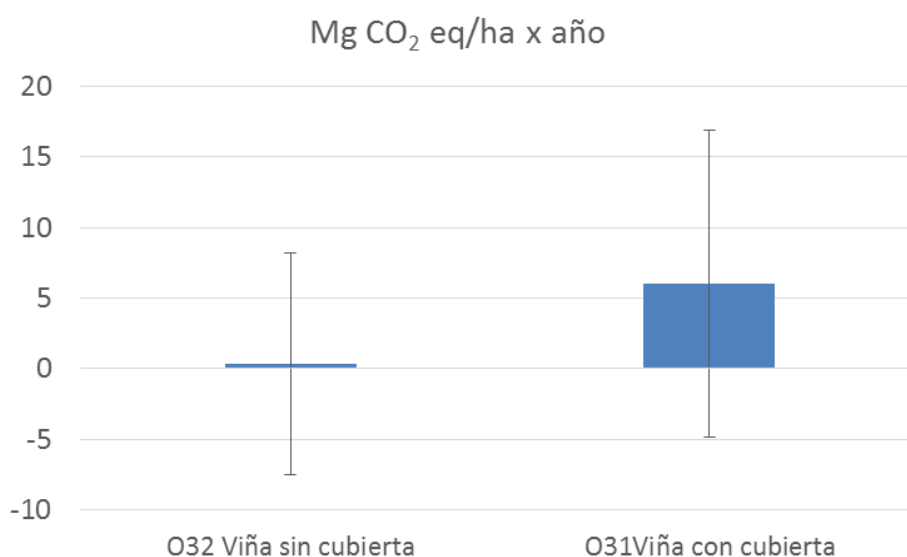


Figura 44. Balances de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en las parcelas correspondientes a la acción B3 en Miranda de Arga. Las barras indican el error estándar.

- Cascante

El valor del balance de GEI toma un valor negativo alto (en valor absoluto), ya que aunque las emisiones son ligeramente superiores a las de la parcela sin cubierta, la tasa de secuestro de carbono es muy importante (Tabla 23 y Figura 45).

Tabla 23. Secuestro, emisiones y balance de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) totales desde la transformación en regadío y tasa anual en las parcelas de la acción B3 en Cascante.

Cascante	Secuestro total ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha}$)	Tasa anual ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Emisiones anuales ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Balance GEI anual ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)
C31 Viña sin cubierta	NA*	NA*	0,65	0,65
C32 Viña con cubierta	106,83	13,35	0,83	-12,52

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de viña sin cubierta es igual a 0.

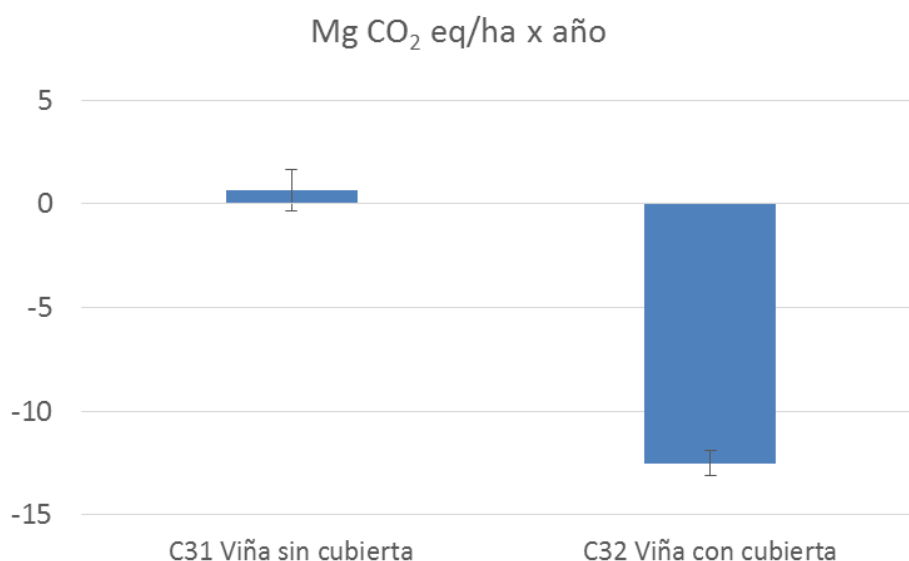


Figura 45. Balances de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) en las parcelas correspondientes a la acción B3 en Cascante. Las barras indican el error estándar.

- Fontellas

Al igual que ocurría en la parcela de viña en Cascante, el cultivo de olivo con cubierta vegetal presenta un balance de GEI muy negativo, ya que además de producir unas emisiones algo inferiores a las de la parcela sin cubierta, supone un aumento muy importante del stock de carbono del suelo (Tabla 24 y Figura 46).

Tabla 24. Secuestro, emisiones y balance de GEI (Mg CO_2 equivalente $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) totales desde la transformación en regadío y tasa anual en las parcelas de la acción B3 en Fontellas.

Fontellas	Secuestro total ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha}$)	Tasa anual de secuestro ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Emisiones anuales ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)	Balance GEI anual ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq/ha} \cdot \text{año}$)
F32 Olivo sin cubierta	NA*	NA*	0,69	0,69
F31 Olivo con cubierta	171,75	11,45	0,49	-10,96

* NA: No Analizado. Se considera que el secuestro de carbono en la parcela de olivos sin cubierta es igual a 0.

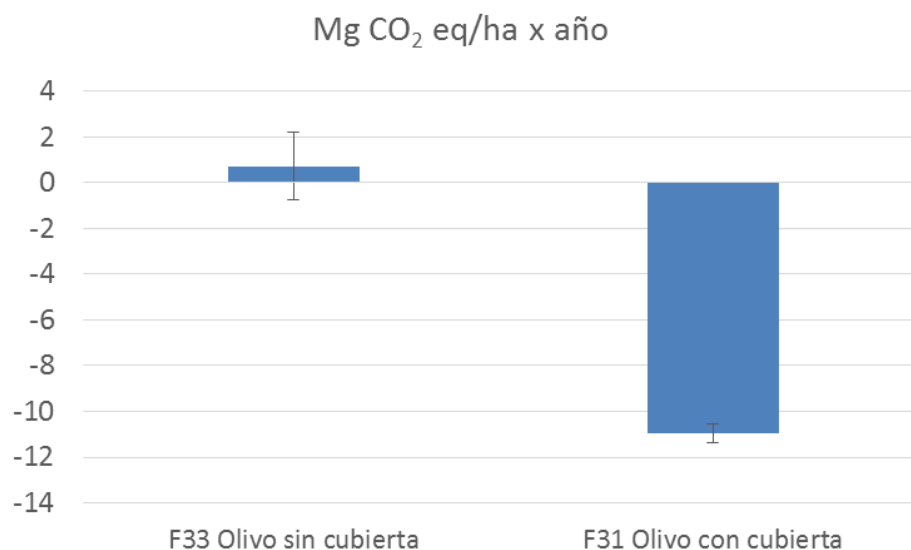


Figura 46. Balances de GEI (Mg CO₂ equivalente ha⁻¹ año⁻¹) en las parcelas correspondientes a la acción B3 en Fontellas. Las barras indican el error estándar.

3.4 Estudio de indicadores ambientales

3.4.1 Erosionabilidad

El factor K de erosionabilidad experimenta, de manera general, una reducción con el aumento de materia orgánica del suelo. Por ejemplo, la parcela de regadío de intensidad media de Valtierra, que tiene claramente un mayor stock de carbono orgánico que el resto de parcelas de esta localidad, posee igualmente un menor factor K (Tabla 25). También se observa este efecto en la parcela de regadío intensivo correspondiente al maíz forrajero en Funes (Tabla 26). En general, las parcelas de regadío intensivo tienden a tener los factores de erosionabilidad más altos.

Sin embargo, el cálculo del factor K depende también de la textura del suelo. Por este motivo, si bien las parcelas de cada localización han sido seleccionadas de forma que se encuentren próximas unas a otras y sobre unidades de suelo similares, pequeñas diferencias texturales pueden, en ocasiones, difuminar el efecto positivo logrado con el aumento del contenido de materia orgánica del suelo. Este es el caso de la acción B1 en Miranda de Arga, en el que la parcela de secano presenta una menor erosionabilidad a pesar de tener un contenido de materia orgánica inferior a las parcelas de regadío (Tabla 25).

Tabla 25. Factor K de erosionabilidad ($\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) en las parcelas de la acción B1

	Valtierra	Miranda de Arga
Secano	0,052 b	0,045 a
Secano enmiendas orgánicas	0,050 b	
Regadío de intensidad media	0,044 a	0,050 b
Regadío intensivo	0,049 b	0,056 c

Letras distintas entre valores de una misma columna indican diferencias significativas según Duncan ($p < 0,05$).

Tabla 26. Factor K de erosionabilidad ($\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) en las parcelas de la acción B2

	Funes	Miranda de Arga
Regadío forrajero	0,057 a	0,058 b
Regadío de intensidad media	0,062 b	0,050 a
Regadío intensivo (hortícolas)	0,060 b	0,056 b

Letras distintas entre valores de una misma columna indican diferencias significativas según Duncan ($p < 0,05$).

En general, donde más claro resulta el efecto del cambio del modelo de gestión del cultivo sobre la disminución del factor de erosionabilidad es en aquellas parcelas de cultivos leñosos con cubierta, cuando ésta tiene una cierta antigüedad (Cascante y Fontellas) (Tabla 27).

Tabla 27. Factor K de erosionabilidad ($\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) en las parcelas de la acción B3

	Miranda de Arga ⁽¹⁾	Olite	Cascante	Fontellas
Cultivo leñoso sin cubierta	0,045 a	0,046 a	0,053 b	0,060 b
Cultivo leñoso con cubierta	0,054 b	0,047 a	0,049 a	0,053 a

(1): En Miranda de Arga la parcela de referencia no es un cultivo leñoso sin cubierta sino un cultivo herbáceo de secano.

Letras distintas entre valores de una misma columna indican diferencias significativas según Duncan ($p < 0,05$).

Cabe añadir, además, que los valores obtenidos para el factor K de erosionabilidad están dentro del rango indicado por Panagos et al., (2012)⁸ para España.

3.4.2 Análisis de la diversidad funcional de los microorganismos del suelo

La Figura 47 muestra la evolución de la absorbancia (indicador del consumo de los sustratos y generación de CO_2 respirado) durante el tiempo en que se han realizado los ensayos con test BioLog de EcoPlate® correspondientes a todas las parcelas de la acción B3. La curva de crecimiento es similar en todas las parcelas: consta de una fase inicial de crecimiento lento, una segunda fase de crecimiento exponencial y una fase final de estabilización.

En primer lugar, debe tenerse en cuenta que, debido a la variabilidad observada en los análisis, no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre ninguna de las localizaciones ni entre distintos manejos del cultivo.

⁸ Panagos, P., Meusburger, K., Alewell, C., Montanarella, L. 2012. *Soil erodibility estimation using LUCAS point survey data of Europe*. Environ Modell Softw 30: 143-145

A pesar de la alta variabilidad característica de este tipo de ensayos, se pueden observar algunas tendencias de modo general: las parcelas con cubierta vegetal presentaron un desarrollo de color más elevado al final del periodo de incubación que aquellas que no poseen cubierta vegetal, con la única excepción de Fontellas. Este mayor desarrollo de color en las parcelas con cubierta vegetal puede deberse a un mayor contenido de biomasa microbiana, o bien a diferencias en la composición de la comunidad microbiana presente en cada parcela.

Además, se distingue otra tendencia que separa las distintas zonas agroclimáticas: en la parte final del ensayo, el desarrollo de color fue mayor en Miranda de Arga y Olite, y menor en Cascante y Fontellas. En momentos anteriores del ensayo no se produce esta circunstancia, ya que la parcela de olivos con cubierta vegetal en Miranda de Arga tiene una actividad comparativamente baja que, sin embargo, aumenta de forma notable en la segunda mitad del ensayo.

No se observa, sin embargo, una relación directa entre el stock de SOC y el desarrollo de color. Entre las parcelas con cubierta vegetal, la situada en Fontellas es la que posee un mayor stock de SOC, mientras que el mínimo se encuentra en Miranda de Arga. Los valores de absorbancia, por el contrario, son máximos en Miranda de Arga y mínimos en Fontellas. Por tanto, es posible que la mayor velocidad e intensidad de metabolización de los sustratos incluidos en las placas de las parcelas con cubierta frente a las parcelas sin cubierta dentro de cada localización sea debida principalmente a cuestiones relacionadas con el diferente manejo de ambos sistemas más que al diferente stock de SOC.

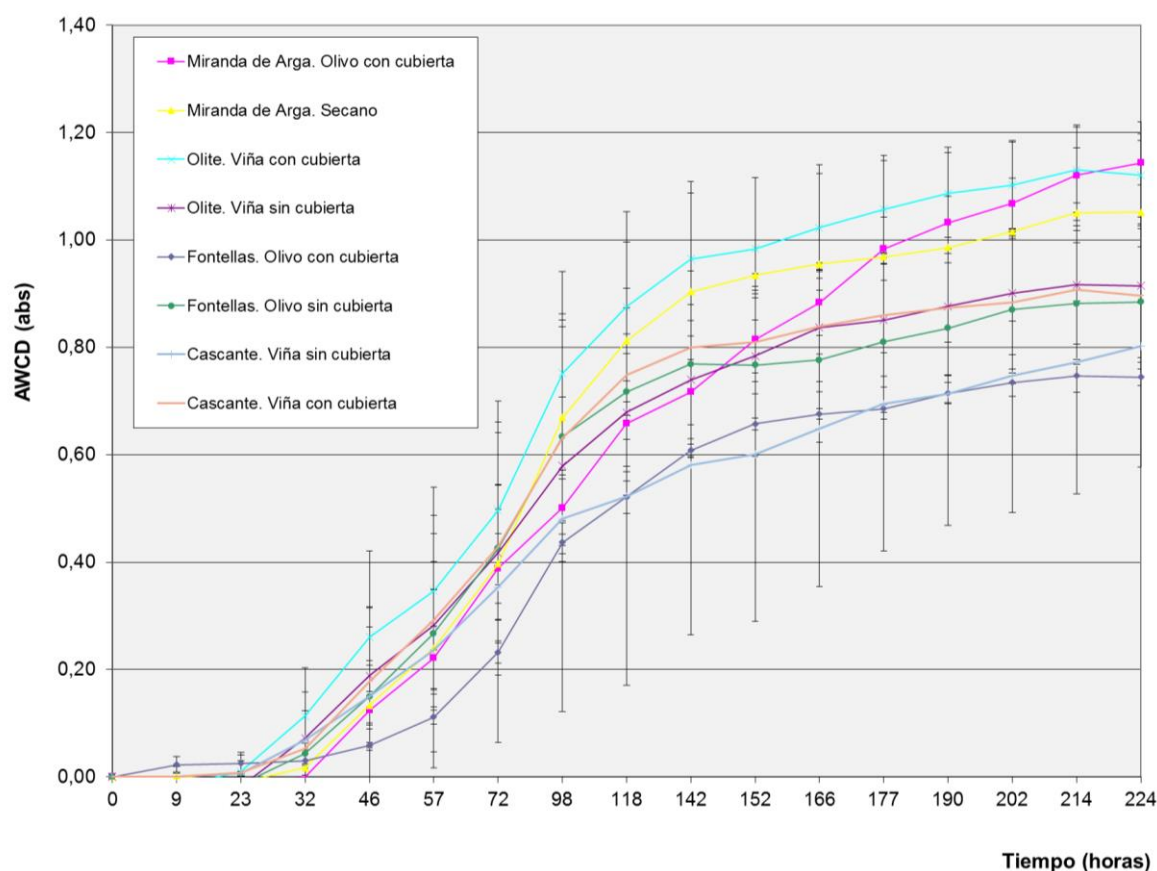


Figura 47. Variación de la absorbancia en el tiempo en los ensayos de Biologs de las parcelas de la acción B3.

El análisis de las curvas de desarrollo de color (AWCD) permite determinar el punto más adecuado para realizar las comparaciones entre parcelas en relación con el número de sustratos utilizados e intensidad de su degradación. Este punto se corresponde con el momento de mayor variación dentro de la fase exponencial, que en el presente estudio ha sido a las 72 horas. Para el cálculo del Número de Sustratos Utilizados (NSU) se consideran aquellos sustratos cuya absorbancia a las 72 horas, una vez corregida, sea superior a 0,25.

No existen diferencias significativas ($P < 0.05$) en el valor de NSU a las 72 horas, tanto si se consideran conjuntamente las ocho parcelas de la acción B3 como si se analiza por separado cada pareja de parcelas de una determinada localización (Tablas 28 y 29). No obstante, de igual forma a lo comentado anteriormente para la evolución del desarrollo de color, las parcelas con cubierta vegetal mostraron una tendencia a poseer un valor de NSU a las 72 horas superior al de las parcelas sin cubierta (salvo en Fontellas). También, en general, el NSU fue superior en las parcelas de Miranda de Arga y Olite, situadas en un clima mediterráneo (Csa) (Köppen)) y menor en las de Cascante y Fontellas, situadas en zonas con clima estepario frío (Bsk) (Figura 48).

Si se comparan las dos parcelas de cada localización (con y sin cubierta vegetal), aparecen diferencias significativas en varios sustratos. Así, en Olite la parcela con cubierta mostró una mayor absorbancia para el metil ester del ácido pirúvico (Tabla 28); en Miranda de Arga, también la parcela con cubierta obtuvo una mayor absorbancia en la α -ciclodextrina y el ácido D-málico (Tabla 29); en el caso de Fontellas, a pesar de que el AWCD era mayor en la parcela sin cubierta, en la parcela con cubierta se registró una mayor absorbancia en la α -D-lactosa. Por el contrario, la absorbancia en la feniletíl-amina fue superior en la parcela sin cubierta, si bien en este último caso los valores son muy bajos en los dos casos. Finalmente, en Cascante no se observaron diferencias significativas para ningún sustrato.

Tabla 28. Número de sustratos utilizados (NSU) total y por grupos de sustratos en las parcelas de viña de la acción B3. Media $\pm$ error estándar (n=3).

Sustratos de carbono		Olite con cubierta	Olite sin cubierta	Cascante con cubierta	Cascante sin cubierta
		16,0 $\pm$ 4,0 a	15,3 $\pm$ 1,3 a	14,0 $\pm$ 3,1 a	11,3 $\pm$ 4,7 a
Polímeros	NSU	3	2	2	4
α -Cyclodextrin					x
Glycogen		x			x
Tween 40		x	x	x	x
Tween 80		x	x	x	x
Carbohidratos	NSU	9	6	7	6
D-Cellobiose		x	x	x	x
i-Erythritol		x		x	
D-Galactonic Acid γ -Lactone		x	x	x	x
N-Acetyl-D-Glucosamine		x	x	x	x
Glucose-1-Phosphate		x	x	x	x
β -Methyl-D-Glucoside		x	x		x
D,L- α -Glycerol Phosphate					
α -D-Lactose		x		x	
D-Mannitol		x	x	x	x
D-xylose		x			
Ácidos carboxílicos	NSU	5	5	3	4
γ -Hydroxybutyric Acid					
α -Ketobutyric Acid			x		
D-Galacturonic Acid		x	x	x	x
D-Glucosaminic Acid		x	x	x	x
Itaconic Acid		x			
D-Malic Acid		x	x		x
Pyruvic Acid Methyl Ester		x*	x*	x	x
Aminoácidos	NSU	3	4	3	3
L-Arginine		x	x	x	x
L-Asparagine		x	x	x	x
Glycyl-L-Glutamic Acid			x		
Phenylethyl-amine					
L-Serine		x	x	x	x
L-Threonine					
Aminas	NSU	1	1	1	0
Putrescine		x	x	x	
L-Phenylalanine					
Compuestos fenólicos	NSU	0	0	1	0
2-Hydroxy Benzoic Acid					
4-Hydroxy Benzoic Acid				x	

Valores marcados con * presentan diferencias significativas ($P < 0,05$) en la absorbancia correspondiente a cada sustrato entre parcelas de la misma localización. Letras diferentes indican diferencias ($P < 0,05$) para el NSU total entre parcelas de la misma localización.

Tabla 29. Número de sustratos utilizados (NSU) total y por grupos de sustratos en las parcelas de olivo de la acción B3. Media $\pm$ error estándar (n=3).

Sustratos de carbono		Miranda con cubierta	Miranda secano	Fontellas con cubierta	Fontellas sin cubierta
	NSU total	17,3 $\pm$ 2,2 a	12,7 $\pm$ 3,5 a	11,3 $\pm$ 1,2 a	15,0 $\pm$ 4,0 a
Polímeros	NSU	4	3	1	3
α -Cyclodextrin		x*	*		
Glycogen		x	x		x
Tween 40		x	x		x
Tween 80		x	x	x	x
Carbohidratos	NSU	6	5	5	8
D-Cellobiose		x	x	x	x
i-Erythritol				x	x
D-Galactonic Acid γ -Lactone		x	x	x	x
N-Acetyl-D-Glucosamine		x	x	x	x
Glucose-1-Phosphate					x
β -Methyl-D-Glucoside		x			x
D,L- α -Glycerol Phosphate					
α -D-Lactose		x	x	*	x*
D-Mannitol		x	x	x	x
D-xylose					
Ácidos carboxílicos	NSU	3	3	3	3
γ -Hydroxybutyric Acid					
α -Ketobutyric Acid					
D-Galacturonic Acid		x		x	x
D-Glucosaminic Acid			x		x
Itaconic Acid			x		
D-Malic Acid		x*	*	x	
Pyruvic Acid Methyl Ester		x	x	x	x
Aminoácidos	NSU	3	2	3	3
L-Arginine		x	x		x
L-Asparagine		x	x	x	x
Glycyl-L-Glutamic Acid		x		x	
Phenylethyl-amine				*	*
L-Serine					x
L-Threonine				x	
Aminas	NSU	2	2	0	1
Putrescine		x	x		x
L-Phenylalanine		x	x		
Compuestos fenólicos	NSU	0	0	0	1
2-Hydroxy Benzoic Acid					
4-Hydroxy Benzoic Acid					x

Valores marcados con * presentan diferencias significativas ($P < 0,05$) en la absorbancia correspondiente a cada sustrato entre parcelas de la misma localización. Letras diferentes indican diferencias ($P < 0,05$) para el NSU total entre parcelas de la misma localización.

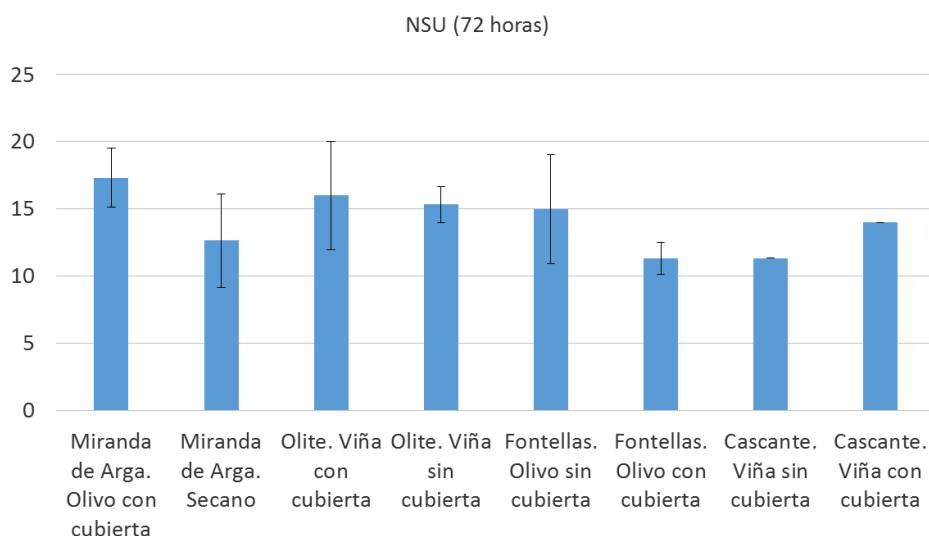


Figura 48. Valor medio del NSU (72 horas) en las parcelas de la acción B3. Las barras indican el error estándar.

Por último, se calcularon los valores del Índice de Shannon modificado (H') para cada una de las parcelas (Figura 49), a partir de los datos de absorbancia medidos a las 72 horas del inicio del experimento. Si bien los valores medios en Miranda (tanto con cubierta como sin cubierta vegetal) son ligeramente superiores al resto, no existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en ningún caso. No se ha observado, por tanto, un efecto de la cubierta vegetal sobre la diversidad funcional de la población microbiana del suelo.

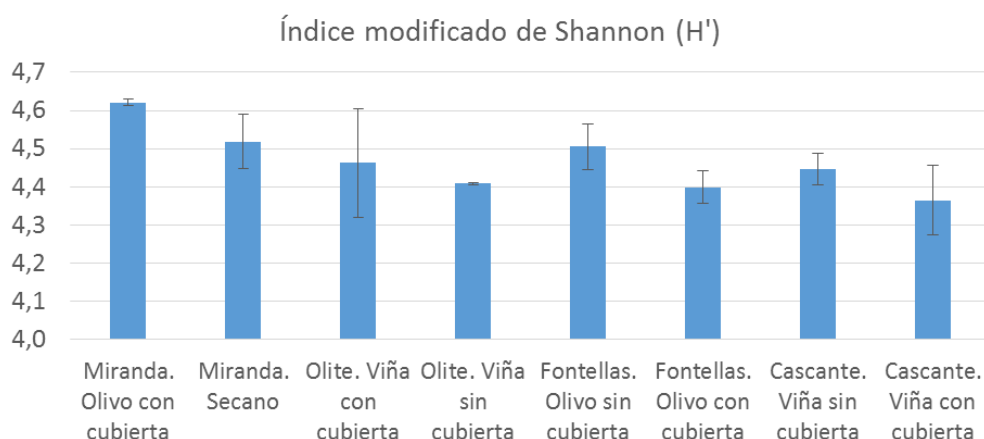


Figura 49. Valor medio del Índice modificado de Shannon (H') para cada parcela de la acción B3, calculado a partir de las absorbancias a las 72 horas. Las barras indican el error estándar.

4. Discusión de resultados y conclusiones

La transformación de secano en regadío ha supuesto un aumento del stock de carbono orgánico del suelo en las parcelas de estudio. Esta tendencia se ha observado en todas las parcelas de cultivos herbáceos en regadío, si bien existe algún caso particular de cultivo intensivo (Valtierra) en la que no hay evidencias de ello.

No existe una correlación clara entre la antigüedad de la puesta en regadío y la magnitud del secuestro de carbono, lo que muestra la importancia de otro tipo de factores, como son la climatología y las características del suelo, en la acumulación y estabilización de la materia orgánica. Sí se observa, en cambio, que la tasa anual de secuestro es, en general, menor en los regadíos antiguos que en los más recientes, lo que posiblemente quiere indicar que el ritmo actual de secuestro en estas parcelas no es sostenible en el tiempo.

No se han observado diferencias claras entre los distintos tipos de cultivo herbáceo en regadío en lo que respecta al secuestro de carbono, si bien parece existir una cierta tendencia a que la tasa máxima se dé en los cultivos forrajeros y la mínima en los cultivos intensivos.

El uso de cubiertas vegetales en cultivos leñosos en regadío es una herramienta muy eficaz para el aumento del contenido de carbono orgánico del suelo. No obstante, los resultados indican que debe transcurrir un tiempo para que esta cubierta sea realmente efectiva (Cascante, Fontellas), ya que en las parcelas con cubierta recién implantada no se observan diferencias con respecto a la ausencia de cubierta (Olite). En aquellas parcelas con cubiertas vegetales con una antigüedad superior a 10 años, la tasa de secuestro de carbono (tanto total como anual) es superior a la mayor parte de las experiencias con cultivos herbáceos anuales.

Los valores de almacenamiento de C orgánico en este proyecto, en términos de stock, se encuentran, en su mayor parte, dentro del rango observado en otros estudios sobre suelos de regadío en la región. En el proyecto INIA RTA2009-00052-C02-02, desarrollado conjuntamente por el Grupo de Gestión Sostenible de Suelos de la UPNA e INTIA, se midió durante varios años el stock de C en los 30 cm superiores del suelo en parcelas de cultivo de trigo y maíz en regadío en Enériz, Santacara y Funes (datos no publicados). Los análisis arrojaron valores de entre 30-60 Mg C ha⁻¹. La antigüedad de estos regadíos en el momento de realizarse los últimos muestreos era de 6, 8 y 10 años, respectivamente. Por su parte, Rodríguez et al. (2016)⁵ indicaron un contenido de C orgánico, también en los 30 cm superiores del suelo, de entre 30-75 Mg C ha⁻¹ en los suelos agrícolas de la zona en la que se ha desarrollado este proyecto (sin diferenciación entre secano y regadío, o según el tipo de manejo). En el proyecto actual, todos los valores se encuentran dentro del rango de 30-75 Mg C ha⁻¹, salvo en los casos de la parcela de regadío de intensidad media de Valtierra (100 Mg C ha⁻¹) y la parcela de olivo con cubierta vegetal en Fontellas (97 Mg C ha⁻¹), que mostraron valores superiores.

En lo referente a la tasa de secuestro, en el marco del proyecto INIA RTA2009-00052-C02-02 se comparó el stock de C de una parcela de regadío de Funes con una parcela control de secano cercana. Tras 7 años de regadío, el stock de C había aumentado una media de $19,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$, lo que supone un secuestro de $10,19 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Por otro lado, en la revisión realizada por González-Sánchez et al. (2012)⁶ (con datos de diferentes zonas de España) se encontró un valor medio de $3,11 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para cultivos realizados en un sistema de no laboreo en secano y de una antigüedad inferior a 10 años. Cuando la duración del no laboreo era superior a 10 años, la tasa descendía hasta $0,59\text{-}1,47 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Comparativamente, los valores de tasa anual de secuestro de C obtenidos en este proyecto mediante la transformación en regadío son similares a los obtenidos en el proyecto INIA RTA2009-00052-C02-02 para el caso de Miranda de Arga (6 años de antigüedad), con tasas de secuestro entre $7,61\text{-}12,35 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Por el contrario, los valores obtenidos en Valtierra (20 años), con un rango de $2,02\text{-}7,76 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y Funes (13 años) con un rango de $3,07\text{-}7,09 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, son algo inferiores. Sin embargo, con respecto a los datos aportados por González-Sánchez et al. (2012)⁶ para un sistema de no laboreo en secano, los valores de tasa anual de secuestro de C obtenidos en este proyecto son superiores, tanto en los regadíos con más de 10 años de antigüedad como en los más reciente transformación.

González-Sánchez et al. (2012)⁶ indicaron así mismo que la tasa anual de secuestro en cultivos leñosos con cubierta vegetal era de $5,65 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y de $1,28 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ dependiendo de si la edad de la cubierta era inferior o superior a 10 años, respectivamente. En este proyecto, por el contrario, se ha observado una tendencia opuesta. Las parcelas en las que la implantación de la cubierta es más reciente muestran las tasas anuales de secuestro más bajas, inferiores a la del estudio citado, como es el caso de los $0,62 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en Miranda de Arga (6 años) o incluso tomando valores negativos, como es el caso de Olite ($-5,5 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), con 2 años de antigüedad. Sin embargo, la tasa de secuestro en Cascante (8 años) es de $13,35 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y la de Fontellas (15 años), $11,45 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, superiores ambas a las referidas por González-Sánchez et al. (2012)⁶.

Lugato et al. (2015)⁷ analizaron el impacto sobre el stock de C del suelo de distintas prácticas de manejo del suelo en los suelos agrícolas de Europa, generalmente en condiciones de secano, mediante la utilización del modelo CENTURY. La mayor tasa de secuestro, con un promedio de $2,2 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el corto plazo (hasta 2020) se obtuvo mediante la conversión de suelos agrícolas en praderas. El enterramiento de la paja de cereal mostró un potencial de secuestro de $0,37 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el mismo plazo, mientras que la realización conjunta del no laboreo y el enterramiento de la paja permitiría conseguir, según este modelo, una tasa de secuestro de $1,14 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Se trata de valores claramente inferiores a los obtenidos en este proyecto. Únicamente a través de la conversión en praderas se conseguirían secuestros similares al rango inferior de los obtenidos en este trabajo a través de la conversión en regadío.

Las emisiones de GEI del regadío de intensidad media y, especialmente, el intensivo, multiplican las del secano debido al mayor uso de materias primas, fertilizantes y a la energía consumida por el bombeo. En el caso del cultivo forrajero, las emisiones pueden variar de forma muy importante

en función de qué cultivo se trate. Así, en uno de baja intensidad como la alfalfa las emisiones de GEI son similares a las del secano; por el contrario, las emisiones del maíz forrajero pueden llegar incluso a superar las de un cultivo hortícola, debido a los altos niveles de insumos utilizados. Por último, las emisiones en las parcelas de cultivos leñosos con cubierta son muy parecidas a las de esos mismos cultivos sin cubierta, con pequeñas variaciones dependiendo de cada caso particular. Cabe destacar, igualmente, que las emisiones de los cultivos leñosos, tanto con cubierta como sin cubierta, son muy inferiores a las de los cultivos herbáceos de regadío, e incluso ligeramente inferiores a las del secano.

La combinación de un aumento del stock de carbono orgánico del suelo y unas emisiones relativamente bajas permiten un balance GEI favorable, en buena parte de los casos, para los regadíos de baja y media intensidad. Resulta, por tanto, una estrategia interesante para la mitigación del Cambio Climático. Cabe destacar, sin embargo, el caso del cultivo de maíz en Funes, tanto el cultivado para grano como para forraje, en el que unas emisiones muy altas (superiores al resto de experiencias con dicho cultivo y causadas sobre todo por las mayores emisiones del suelo y urea) han provocado un balance positivo. En el regadío intensivo, unas mayores emisiones y un efecto variable sobre el stock de carbono orgánico hacen que presente balances de GEI tanto favorables como desfavorables.

En los cultivos leñosos con cubierta, el balance de GEI es muy favorable en aquellas parcelas en las que la cubierta tiene una antigüedad superior a 10 años, debido al elevado secuestro de carbono. En estas parcelas, el balance de GEI es, en valor absoluto, muy superior (tanto total como en tasa anual) al de los cultivos herbáceos en regadío. Por su parte, las parcelas con una cubierta vegetal de menor antigüedad presentan un balance de GEI ligeramente positivo.

Si bien la variabilidad ha impedido observar diferencias significativas en la actividad microbiana entre parcelas y manejos de la acción B3, se observa una clara tendencia a que las parcelas de cultivos leñosos con cubierta vegetal tengan una mayor actividad en comparación con las parcelas sin cubierta. Además, en general, las parcelas de Miranda de Arga y Olite presentan una mayor actividad que las de Cascante y Fontellas, lo que puede estar relacionado con las diferentes condiciones climáticas de cada zona.

En general, se observa una reducción del factor K de erosionabilidad ligado al aumento del stock de carbono orgánico en las parcelas de estudio. No obstante, las diferencias texturales entre distintos suelos pueden desempeñar un papel importante en la determinación de este valor.

Finalmente, respecto a la biodiversidad funcional estudiada a partir de los tests EcoPlate® de BioLog®, no existieron diferencias notables asociables a la implantación de cubiertas, aunque se observó un efecto de la localización geográfica y el tipo de manejo en este parámetro. Las condiciones climáticas y edáficas de Miranda de Arga y Olite favorecieron poblaciones microbianas más diversas. La respuesta a la cubierta en cada localización fue heterogénea.

CONCLUSIONES

- La transformación en regadío es un medio válido para el secuestro de carbono y la consecución de balances GEI favorables en la actividad agrícola, lo que constituye una herramienta útil para la mitigación del Cambio Climático. Esta herramienta debe ser modulada a partir del control de las emisiones de cada sistema.
- Los factores más relevantes en relación a las emisiones de GEI en las parcelas del proyecto son la fertilización nitrogenada y la respiración del suelo, junto con los asociados a las materias primas utilizadas.
- Dentro de los cultivos herbáceos de regadío, no se observan con claridad diferencias entre los distintos sistemas, si bien hay una tendencia más favorable de cultivos forrajeros con laboreo de baja intensidad, como la alfalfa, y peor de los cultivos intensivos.
- En cultivos leñosos, la implantación de cubiertas vegetales resulta igualmente un medio altamente eficaz para el logro de los mismos objetivos.
- Respecto a las consecuencias de estos cambios en otros indicadores de calidad del suelo, un aumento del stock de carbono orgánico implica un descenso del factor K de erosionabilidad del suelo, si bien la textura desempeña también un papel importante. Las diferencias inducidas por la implantación de cubiertas permanentes en cultivos leñosos tuvieron una repercusión menor, con una tendencia a presentar una mayor actividad microbiana que aquellas que no la tienen, si bien se observa una amplia variabilidad.